

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique  
Université Akli Mohand Oulhadj - Bouira -  
Tasdawit Akli Muḥend Ulḥağ - Tubirett -



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة أكلي محمد أولحاج  
- البويرة -

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées

كلية العلوم والعلوم التطبيقية

Référence : ...../MM/2021

المرجع: .....م/م / 2021

## Mémoire de Master

Présenté au

**Département** : Génie Électrique  
**Domaine** : Sciences et Technologies  
**Filière** : Electrotechnique  
**Spécialité** : Réseaux Electriques

Réalisé par :

**ABID MOKHTAR**

Et

**CHATBI ABDELLAH**

## Thème

**Etude de l'influence de la charge sur le régime transitoire pour un transformateur monophasé (ATP-EMTP)**

Soutenu le: **30 /10/2021**

Devant la commission composée de :

HOUASSINE Hamza

M.C.A

Univ. Bouira

Président

YAHIOU Abdelghani

M.C.B

Univ. Bouira

Rapporteur

BENSAID Samir

Prof

Univ. Bouira

Examineur

## Dédicaces 1

*Je dédie ce modeste travail en première lieu*

*La femme la plus affectueuse et la plus douce au monde l'angele  
plus tender qui a été toujours pour moi une source d'amour, depitié  
et d'espoir, ma chère mère Yamina*

*A celui qui m'atoujours encouragé et soutenue moralement, mon  
très cher père Belkacem*

*A mes frères, à mes sœurs*

*A tous les personnes qui m'ont aidé dans ce mémoire et qu'il sont  
fait partie dans Ma réussite.*

*A toute la promotion d'électrotechnique.*

**CHATBI**

---

## Dédicaces 2

*Je dédie ce modeste travail a la femme qui a été ma source de courage, et d'espoire , ma chère mère kacimi fatma*

*~que dieu garde ~.*

*A mon chère père abd el kader , Un symbole de sagesse pour ses sacrifices appréciés.*

*A mes chers frères et mes sœurs, pour leur soutien moral et leurs aides précieuses pendant les longues années d'étude.*

*aux être qui me sont les plus chers, à ma famille et à tous mes amis sans exeption*

*A Toute la promotion de electrotechnique*

*2017/2021*

*ABID*

---

## Remerciements

Avant tout nous remercions le bon dieu tout puissant de nous avoirs donné le courage, la patience et la volonté pour atteindre notre objectif et présenter cet humble travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à notre promoteur Monsieur YAHYOU Abdelghani ; qui nous a aidé et orienté pendant toutes cette étude.

Nos remerciement vont également au membre du jury pour l'intérêt, qu'ils sont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Un grand Merci a tous les enseignants de la faculté sciences et science appliquée de bouira .

Un grand merci a toute notre famille et plus particulièrement nous parents, pour nos avoir soutenue et aidé tout au long de nos études.

Enfin nous remercions toute personne de prés ou de loin qui a participe pour rendre ce travail réalisable et présentable.

## ملخص

يمكن لمحولات الطاقة المنشطة بشكل عشوائي أن تولد عابرات قصيرة العمر ، والتي يمكن أن تكون مصحوبة بتيارات تدفق كبيرة جدًا ، والتي يمكن أن تصل إلى مستويات تيار ماس كهربائي. هذه التيارات ناتجة عن التدفق المتبقي الموجود في الدائرة المغناطيسية في لحظة تشغيل المحول ، وكذلك بسبب تشبع النواة المغناطيسية. تم تخصيص أطروحة الماستر هذه لدراسة تأثير الحمل على النظام العابر لمحول أحادي الطور ، ويتم تنفيذ ذلك من خلال محاكاة هذا النظام على هذا المحول بدون تحميل ثم في التحميل باستخدام البرنامج ATP- EMTP. الهدف هو أن نرى أن العملية تحت الحمل يمكن أن تقلل من تدفق الطاقة العابرة الذي يؤدي إلى تقليل جودة مصدر الطاقة، وعمر المحول.

**الكلمات المفتاحية:** محول أحادي الطور ، تيارات تدفق ، نظام عابر ، تشبع. ATP / EMTP.

## Résumé

La mise sous tension de transformateur de puissance de façon aléatoire peut générer des transitoires de courte durée, qui peut s'accompagner de courants d'appel très importants, pouvant atteindre les niveaux des courants de court-circuit. Ces courants sont causé par le flux rémanent qui existe dans le circuit magnétique à l'instant de la mis sous tension de transformateur, et aussi causé par la saturation de noyau magnétique. Ce mémoire de master est consacré pour l'étude de l'influence de la charge sur le régime transitoire pour un transformateur monophasé, et cela est effectué par la simulation de ce régime sur ce transformateur à vide puis en charge à l'aide de logiciel ATP-EMTP. Dont l'objectif est de voir est ce que le fonctionnement en charge peut réduire les transitoires d'appel qui conduise à réduire la qualité de l'alimentation, et la durée de vie de transformateur.

**Mots-clés :** transformateur monophasé, courants d'appel, régime transitoire, saturation. ATP/EMTP.

## Abstract

Randomly energizing power transformers can generate short-term transients, which can be accompanied by very large inrush currents, which can reach the levels of short-circuit currents. These currents are caused by the flux remanence that exists in the magnetic circuit at the moment of switching on the transformer, and also caused by the saturation of the magnetic core. This master's thesis is devoted to the study of the influence of the load on the transient regime for a single-phase transformer, and this is done by simulating this regime on this transformer with no load and then with load using ATP-EMTP software. The aim of which is to see whether operating under load can reduce inrush transients which leads to reduced power quality, and transformer life.

**Keywords:** Single phase transformer, inrush currents, transient regime, saturation, ATP / EMTP.

# Table des Matières

Remerciements .....	I
Résumé .....	II
Table des Matières .....	III
Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VIII
Listes des Acronymes et Symboles .....	IX

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## ***CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES TRANSFORMATEURS MONOPHASES.....3***

---

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition .....	4
I.3 Historique.....	4
I.4 Constitution.....	5
I.4.1 Circuit magnétique.....	5
I.4.2 Enroulement.....	5
I.4.2.1 Enroulement primaire.....	6
I.4.2.2 Enroulement secondaire.....	6
I.4.3 Isolation .....	6
I.5 Circuit simplifié dans l'hypothèse de KAPP .....	7
I.6 Modélisation de transformateur .....	8
I.6.1 Transformateur monophasé à basse fréquence : .....	8
I.6.1.1.Transformateur monophasé sans saturation .....	8
I.6.1.2.Transformateur monophasé avec saturation.....	9
I.6.1.3.Transformateur monophasé avec saturation et perte fer.....	9
I.6.2. Model électrique de transformateur à haute fréquence.....	9
I.6.2.1. Modèle universel EMTP.....	9
I.7. Types de transformateurs .....	10
I.7.1. Transformateur de puissance .....	10
I.7.2. Transformateurs de Mesures.....	10
I.7.2.1. Transformateur de Potentiel « tension » TT.....	10
I.7.2.2.Transformateur d'intensité .....	11

I.7.3. Transformateur d'isolement.....	12
I.8. Fonctionnement de transformateur .....	12
I.8.1 Principe de fonctionnement .....	12
I.8.2 Fonctionnement à vide.....	12
I.8.3 Fonctionnement en charge .....	13
I.9 Essai sur le transformateur.....	13
I.9.1 Essai à vide .....	13
I.9.2 Essai en court-circuit .....	14
I.10. Pertes dans un transformateur.....	15
I.10.1.Pertes par effet joule .....	15
I.10.2. Pertes magnétiques .....	15
I.10.2.1 Pertes par hystérésis.....	15
I.10.2.2 Pertes par courants de Foucault .....	15
I.11. Transformateur parfait .....	16
I.12. Transformateur réel.....	17
I.13. Conclusion .....	17

**Chapitre II: ETUDE DES PHENOMENES TRANSITOIRES DANS LES TRANSFORMATEURS MONOPHASES.....18**

II.1 Introduction .....	19
II.2 Régimes transitoire .....	19
II.2.1 Principaux phénomènes affectent le transformateur .....	19
II.3. Courant d'appel .....	19
II.3.1. Définition .....	19
II.3.2 Relation entre le courant et la densité de flux .....	20
II.4. Flux rémanent .....	21
II.4.1. Origine de flux rémanent .....	21
II.4.2.Création de flux rémanent .....	21
II.4.3. Calcul analytique de flux rémanent .....	21
II.5. Courant magnétisant .....	22
II.6. Coupure d'un courant en régime établi .....	22
II.7. Transformateur avec saturation .....	23
II.8. Courant d'appel et Flux rémanent .....	23

II.9 Phénomènes d'enclenchement du transformateur de puissance .....	25
II.9.1 Effets de l'instant de commutation sur le courant d'appel .....	25
II.10. Facteurs qui influencent sur l'amplitude et la durée de courant d'appel .....	28
II.11. Influence de courant d'appel sur le fonctionnement du transformateur .....	28
II.12. Atténuation de courant d'appel .....	28
II.13. Conclusion.....	29
<b>Chapitre III:ETUDE DE L'INFLEUNCE DE LA CHARGE SUR LE REGIME</b>	
<b>TRANSITOIRE DE TRANSFORMATEUR .....</b>	<b>30</b>
III.1 Introduction .....	31
III.2 Description de l'ATP / EMTP .....	31
III.3.Modèles du transformateur dans l'ATPDraw .....	32
III.4.Transformateur BCTRAN.....	32
III.5 Identification des paramètres du transformateur .....	33
III .5.1Model de transformateur utilisé .....	33
III.5.2Matériels utilisées.....	33
III.5.3.Détermination des paramètres de circuit équivalent par l'essai à vide .....	34
III.5.3.1.Calculer la résistance et la réactance de magnétisation .....	35
III.5.4.Détermination des paramètres de circuit équivalent par l'essai court- circuit .....	35
III.6.Saturation des branches magnétisantes .....	37
III.7.Implantation du modèle élaboré dans ATPDraw .....	40
III.7.1.Première cas : transformateur à vide.....	40
III.7.2.Deuxième cas : transformateur en charge .....	41
III.7.2.1.Un charge purement résistive .....	41
III.7.2.2.Un charge RL .....	45
III.7.2.3.Un charge RLC.....	48
Conclusion .....	52
Conclusion Générale .....	53
Références bibliographiques .....	55



## Liste des Figures

Figure I.1 Transformateur de Zipernowsky, Déri et Bláthyde en 1885.....	5
Figure. I.2 Bobines primaire et secondaire d'un transformateur.....	6
Figure I.3 Schéma électrique équivalent d'un transformateur réel en charge. ....	7
Figure I.4 Schéma simplifié de KAPP. ....	7
Figure I.5 Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation. ....	8
Figure I.6 Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation. ....	8
Figure I.7 Modélisation d'un transformateur avec saturation. ....	9
Figure I.8 Modélisation d'un transformateur avec saturation et perte fer. ....	9
Figure I.9 Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP .....	10
Figure I.10 Schéma d'un exemple d'utilisation du TT. ....	11
Figure I.11 Schéma d'un exemple d'utilisation du TI .....	11
Figure I.12 Fonctionnement à vide. ....	13
Figure I.13 Schéma équivalente d'un essai à vide. ....	14
Figure I.14 Schéma équivalent d'un essai en court-circuit. ....	14
Figure.II.1 Cycle d hystérésis.....	20
Figure.II.2 Valeur de flux à l'instant de coupure $t_0$ . ....	23
Figure.II.3 Valeur de courant magnétisant à l'instant de coupure $t_0$ . ....	23
Figure II.4 Flux et courant magnétisant en régime établi Régime permanent $\lambda < \lambda_S$ .....	24
Figure. II.5 Flux et courant magnétisant en régime transitoire $\lambda > \lambda_S$ .....	24
Figure II.6 Deux régimes sur la courbe de saturation. ....	25
Figure II.7 Courant d'appel pour un instant de commutation égal a 0.3040.....	26
Figure II.8 Courant d'appel pour un instant de commutation égal a 0.3070s. ....	27
Figure II.9 Courant d'appel pour un instant de commutation égal à 0.3048s. ....	27
Figure III.1 Fenêtre principale de ATPdraw et l'ATPlancher.....	32
Figure III.2 Symbole du transformateur BCTRAN.dans ATP/EMTP.....	32
Figure III.3 Model de transformateur utilisé dans la simulation.....	33
Figure III.4 Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé. ....	34
Figure III.5 Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé.....	35
Figure III.6 Courbe de la résistance non linéaire $v = f(ir)$ .....	39
Figure III.7 Courbe de saturation $\lambda = f(il)$ . ....	39
Figure III.8 Représentation du transformateur à vide sur ATP-EMTP .....	40
Figure III.9 Régime permanant à vide. ....	40
Figure III.10 Régime transitoire à vide. ....	41
Figure III.11 Transformateur avec une charge résistive .....	41
Figure III.12.Courant primaire avec une charge résistive. ....	43
Figure III.13.Forme d'ondes du courant avec 50% la charge nominale charge résistive. ....	44

Figure III.14. Forme d'ondes du courant avec 120% la charge nominale charge résistive. ....	44
Figure III.15. Transformateur avec une charge RL.....	45
Figure III.16. Courant primaire avec une charge RL.....	46
Figure III.17. Forme d'ondes du courant avec 50% la charge RL nominale. ....	47
Figure III.18. Forme d'ondes du courant avec 120% la charge RL nominale. ....	47
Figure III.19 Transformateur avec une charge RLC.....	48
Figure III.20. Courant primaire avec une charge RLC.....	50
Figure III.21. Forme d'ondes du courant avec 50% la charge RLC nominale.....	50
Figure III.22. Forme d'ondes du courant avec 120% la charge RLC nominale.....	51

## Liste des Tableaux

Tableau III.1 : Résultats de l'essai à vide.....	34
Tableau III.2 : Résultats du l'essai court-circuit. ....	36
Tableau III.3. Caractéristiques calculées en valeurs. ....	37

## Listes des Acronymes et Symboles

A	Ampère
B	Induction magnétique
C	Capacite
AC	Courant altérnative
DC	Courant continue
m	Rapport de transformation
$I_m$	Courant magnetisante (A)
$I_1$	Courant primaire
$I_2$	Courant secondaire
$I_r$	Courant reactif
$I_a$	Courant actif
$I_0$	Courant à vide
$I_{10}$	Courant de branche magnétisante
$R_1$	Resistance primaire ( $\Omega$ )
$R_2$	Resistance secondaire
$L_1$	Inductance primaire (H)
$L_2$	Inductance secondaire
$X_m$	Impedance magnetisante
$R_m$	Resistance magnetisante( $\Omega$ )
$L_m$	Inductance magnetisante
$V_{20}$	Tension secondaire à vide (V)
$V_1$	Tension primaire
$V_2$	Tension secondaire
$V_{max}$	Valeur maximale de la tension
$V_{eff}$	Valeur efficace de la tension
EMTP	ElectromagneticTransient Program
HTA	Haute tension A
HTB	Haute tension B
f.e.m.	Force électromotrice
$P_{10}$	Puissance active à vide (W)
$P_1$	Puissance primaire
$P_2$	Puissance secondaire
$P_{cc}$	Puissance active en court-circuit
$P_{Joul}$	Perte joule
$N_1$	Nombre de spire primaire

$N_2$	Nombre de spire secondaire
F	Frequence (Hz)
$P_j$	Perte joule (W)
$P_{hys}$	Perte par hystérésis
$B_{max}$	Valeur maximale de la densité de flux
K	Constante qui dépend du matériau,
$P_f$	Perte fer
$\rho$	Résistivité
d	L'épaisseur du panneau
D	Densité du matériau
$\varphi$	Flux
$\mu$	Perméabilité
$\mu_r$	Perméabilité relative
$\varphi_r$	Flux remanent
$H_m$	Champs magnetique
$H_C$	Champ correctif
w	Vitesse angulaire (rad/s)
$\lambda_S$	Flux de saturation
$\lambda$	Flux
RLC	Charge contient ( resistance +inductance + capacité)
RL	Charge contient ( resistance +inductance )
H	Champs magnétique
W	Watt
flux <sub>10</sub>	Flux à vide
V	Volt
$x_1$	Reactance primaire
$x_2$	Reactance secondaire

## Introduction générale

Le réseau est un élément fondamental qui a pour tâche de réaliser à chaque instant l'équilibre entre la production d'énergie électrique et la consommation nécessaire à l'ensemble des clients, l'architecture du réseau est basée sur le transformateur qui assure la transformation de l'énergie électrique quel que soit le niveau de la production ou du transport.

Les transformateurs sont des appareils électriques qui modifient ou transforment les niveaux de tension entre deux circuits. Cependant, la puissance transférée entre les circuits est inchangée, à l'exception d'une perte généralement faible qui se produit dans le processus. Ce transfert ne se produit que lorsqu'un courant alternatif ou des conditions électriques transitoires sont présents. [1]

En raison du fonctionnement du disjoncteur, le transformateur de puissance peut subir des transitoires. La fermeture du disjoncteur sur le transformateur à vide va produire un courant à forte composante continue, appelé « courant d'appel ». L'amplitude de ces courants peut atteindre la valeur maximale du courant de court-circuit. La raison principale de ces courants est le flux magnétique résiduel qui existe dans le noyau de fer et la saturation du noyau de fer lorsque le transformateur de puissance est mis hors service. Ces courants peuvent entraîner des contraintes électriques importantes dans le transformateur.[2]

Le phénomène de courant d'appel magnétisant dans les transformateurs à la mise sous tension depuis longtemps est un problème dans la conception et les performances des relais de protection différentiels utilisés dans les systèmes de transmission et de distribution d'énergie électrique.

Le courant magnétisant en régime permanent d'un transformateur peut ne représenter que 1 à 2% du courant nominal, mais il peut atteindre 2 à 10 fois le courant nominal lorsque le transformateur à vide est mise sous tension. Cet effet transitoire peut persister pendant plusieurs millisecondes avant que l'état d'équilibre ne soit atteint et provoquer le déclenchement inutile d'un relais de protection différentiel.[3]

L'étude de l'influence de la charge sur le régime transitoire d'un transformateur monophasé de 2 KVA qui est l'objectif principale de ce travail est réalisée en utilisant un circuit de simulation à vide et en charge sur le logiciel ATP/EMTP.

Pour réaliser cette étude, le présent travail contient trois chapitres :

- ✓ Le premier chapitre est consacré à la recherche théorique des transformateurs, leur modélisation à basse fréquence et à haute fréquence, différents types ( transformateur de puissance , de mesure et transformateur d'isolement ), fonctionnement à vide et en charge et leurs pertes (pertes joules et pertes magnétiques) .

- ✓ Le deuxième chapitre expose quelques notions de courant d'appel: définition, caractéristiques, leurs effets sur les transformateurs, le flux rémanent et son origine et la relation entre le flux rémanent et le courant d'appel.
- ✓ Le troisième chapitre sert à identifier les paramètres du transformateur à l'aide de l'essai à vide et en court-circuit, les caractéristiques de la branche magnétisante (l'inductance et la résistance) et l'influence de la charge sur le régime transitoire d'un transformateur monophasé à l'aide du logiciel ATP draw.

**Chapitre I :**  
**Généralité sur les transformateurs**  
**monophasés**



## I.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la généralité des transformateurs, qui sont des machines statiques que l'on trouve dans les réseaux de transport et de distribution d'électricité. Nous commençons d'abord par la définition du transformateur, son historique et sa constitution, ainsi la modélisation des transformateurs basses fréquences et haute fréquence, puis étude des différents types de transformateurs et de leur fonctionnement à vide et en charge.

## I.2 Définition

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation.

Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

Seuls les transformateurs de puissance permettent, très économiquement, de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée (200kV et 400kV et plus entre phases), puis d'abaisser ensuite cette tension, étape par étape, pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux, jusqu'à la tension d'alimentation domestique. [4]

## I.3 Historique

Le fonctionnement du transformateur est basé sur le principe de l'induction découvert par Faraday en 1831. Il a découvert que lorsqu'un flux magnétique changeant relie un circuit, une tension ou une force électromotrice (f.é.m.) est induite dans le circuit. La tension induite est proportionnelle au nombre de spires liées par le flux changeant. Ainsi, lorsque deux circuits sont liés par un flux commun et qu'il y a différentes spires liées dans les deux circuits, il y aura différentes tensions induites.

L'invention du premier transformateur pratique est attribuée aux ingénieurs hongrois Karoly Zipernowsky, Otto Blathy et Miksa Deri en 1885. Ils travaillaient pour l'usine hongroise Ganz. Leur appareil avait un noyau toroïdal fermé en fil de fer. La tension primaire était de quelques kilovolts et la tension secondaire d'environ 100 volts. Il a d'abord été utilisé pour alimenter l'éclairage électrique. Les transformateurs modernes diffèrent considérablement de ces premiers modèles, mais le principe de fonctionnement est toujours le même. [1]



**Figure I.1** Transformateur de Zipernowsky, Déri et Bláthyde en 1885.[5]

## **I.4 Constitution**

### **I.4.1 Circuit magnétique**

Le circuit magnétique est constitué par empilage de tôles de fer silicium (0,8 à 3,5 % de silicium) à grains orientés, de faible épaisseur (0,3 à 0,35 mm), isolées entre elles. Son rôle essentiel est la canalisation du flux magnétique. La structure de sa section droite en gradins lui confère une forme circulaire semblable à celle des bobines afin de réduire les fuites magnétiques d'une part, et de présenter une bonne résistance mécanique aux efforts électrodynamiques de court-circuit d'autre part.[6]

### **I.4.2 Enroulement**

L'enroulement est composé d'un conducteur de section circulaire ou rectangulaire, qui est enroulé en bobine sur la colonne du transformateur.[07]

Il est composé d'un primaire et d'un secondaire. Ces enroulements de transformateur font partie de l'enroulement primaire et de l'enroulement secondaire qui assurent la transmission de la puissance par des phénomènes électromagnétiques.

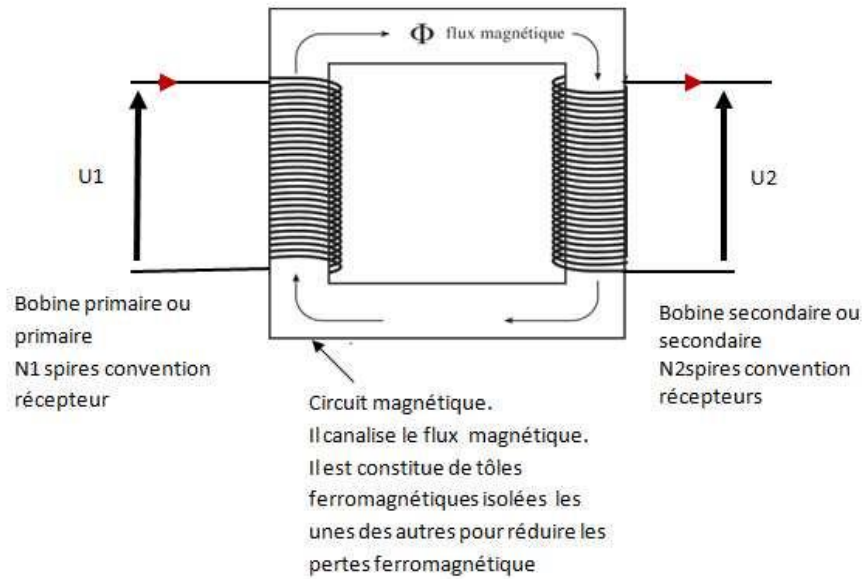


Figure. I.2 bobines primaire et secondaire d'un transformateur.

### I.4.2.1 Enroulement primaire

Le rôle de l'enroulement primaire est de générer un champ alternatif. La tension à ses bornes est élevée et l'intensité du courant qui le traverse est faible, ce qui se traduit par une petite section et un grand nombre de spires.[8]

### I.4.2.2 Enroulement secondaire

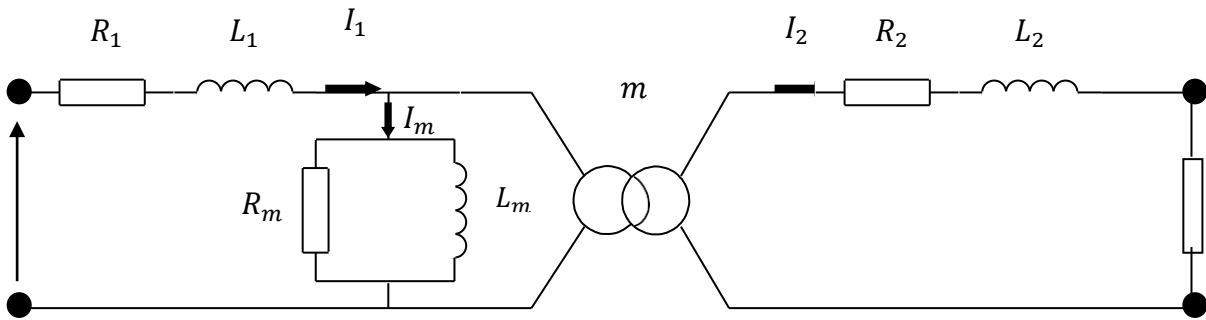
Le rôle de l'enroulement secondaire est production du courant induit, celui -ci se caractérise par une forte intensité. Cette caractéristique impose une section des conducteurs relativement importante et un nombre de spires limité.[8]

### I.4.3.Isolation

Les enroulements sont constitués de fils conducteurs en cuivre isolés entre eux par du papier Kraft, dénommé papier d'enrubannage ou de guipage. Chaque enroulement du primaire doit être correctement isolé des enroulements du secondaire. De ce fait, des écrans protecteurs (généralement en carton) sont disposés entre les enroulements. Des cales, en bois sont disposées entre chaque enroulement ainsi qu'entre les bobines et le circuit magnétique, de manière à obtenir un ensemble très rigide et ainsi limiter les contraintes mécaniques. Des canaux verticaux sont aménagés entre les cales pour permettre un bon refroidissement par circulation du liquide caloporteur à travers la bobine.[9]

### I.5 Circuit simplifié dans l'hypothèse de KAPP

L'hypothèse de KAPP consiste à négliger la résistance et réactance magnétisante dans le fer. Les tensions primaire et secondaire à vide sont proportionnelles : dans le rapport de transformation  $m$ . En ce qui concerne les courants, le courant  $I_m$  intervient. Cependant, ce courant est en général négligeable, l'hypothèse de KAPP revient à négliger ce courant, si bien que les Courants  $I_1$  et  $I_2$  sont également proportionnels (le rapport de proportionnalité étant  $m$ ).[10]



**Figure I.3** Schéma électrique équivalent d'un transformateur en charge.

De plus, il est possible encore de simplifier le schéma du transformateur en ramenant tous les branches à un circuit RL série au secondaire. Dans ce cas, on peut montrer que le secondaire se comporte comme une source de tension de f.é.m. [10]

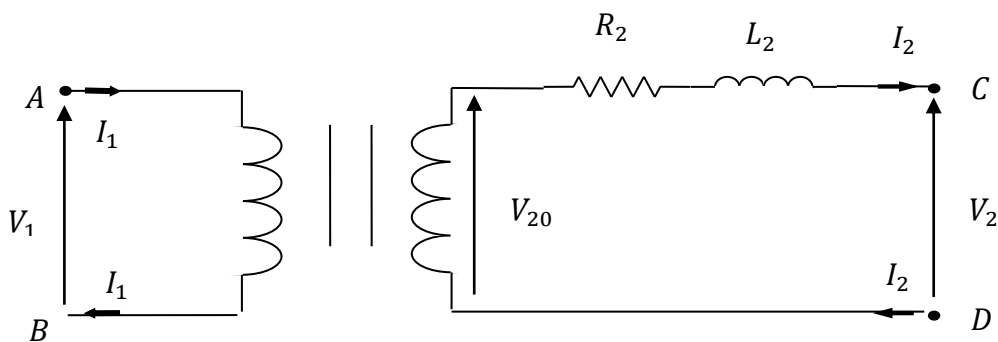
$$V_{20} = mV_1 \quad (I.1)$$

en série avec une résistance

$$R_2 = R_2 + m^2R_1 \quad (I.2)$$

et une inductance

$$L_2 = L_2 + m^2L_1 \quad (I.3)$$



**Figure I.4** Schéma simplifié de KAPP.

## I.6 Modélisation de transformateur

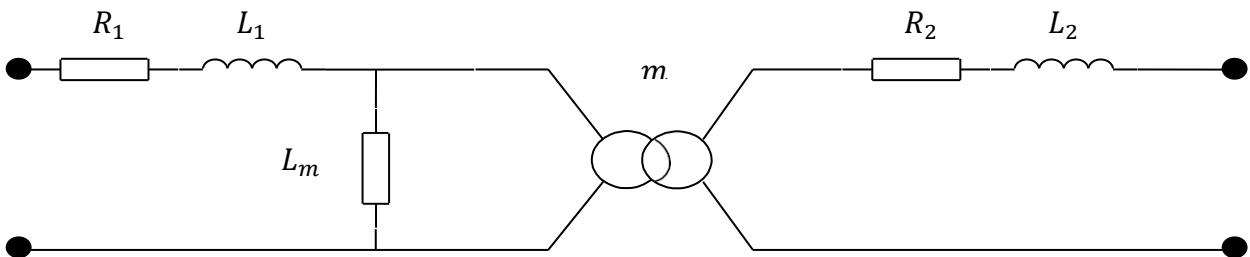
### I.6.1 Transformateur monophasé à basse fréquence

La modélisation d'un transformateur monophasé à basse fréquence se fait en s'appuyant sur différents principes. L'un de ces derniers consiste à prendre en considération l'état de circuit magnétique associé par la présence ou l'absence des pertes.

#### I.6.1.1. Transformateur monophasé sans saturation

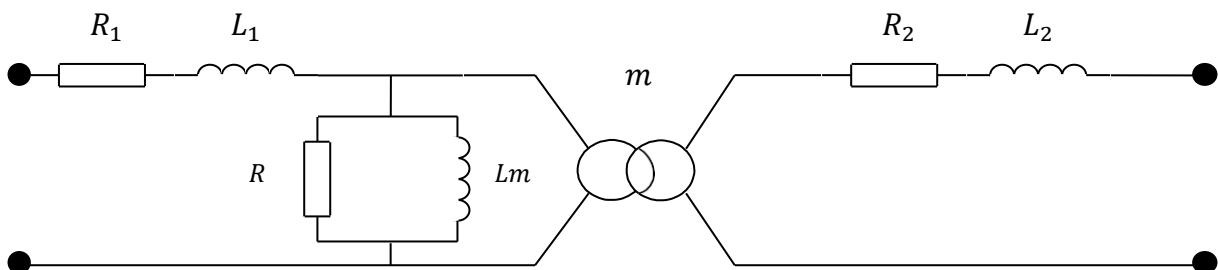
Lors de fonctionnement du transformateur monophasé dans la zone linéaire sans pertes, le schéma équivalent contient des impédances linéaires et un rapport de transformation comme c'est montré dans la figure (figI.5). Chacun de ses composants à sa propre représentation.

- ❖  $R_1, L_1$  : 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



**Figure I.5** Modélisation d'un transformateur monophasé sans pertes fer, sans saturation.

L'existence de pertes fer impose une résistance magnétisante qui doit être branché en parallèle avec l'inductance magnétisante comme c'est montré dans la figure suivante.[11]



**Figure I.6** Modélisation d'un transformateur monophasé avec pertes fer, sans saturation.

### I.6.1.2. Transformateur monophasé avec saturation et avec perte fer

La caractéristique de saturation donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non-linéaire. Notons que l'inductance non linéaire peut être placée indifféremment côté primaire ou côté secondaire tant que le rapport de transformation est respecté. [12]

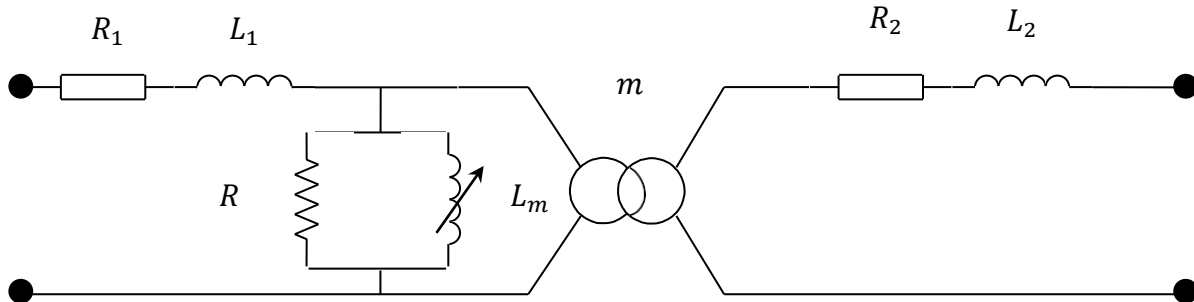


Figure I.7 Modélisation d'un transformateur avec saturation.

### I.6.1.3. Transformateur monophasé avec saturation et perte fer et avec une résistance non-linéaire

Dans ce modèle la résistance  $R$  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. [13]

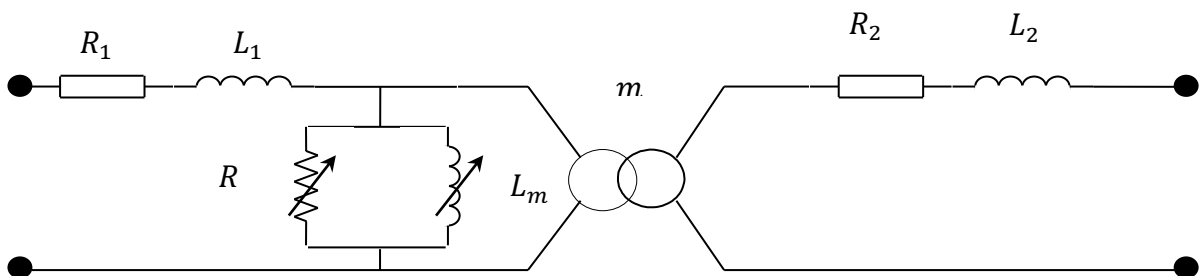


Figure I.8 Modélisation d'un transformateur avec saturation et perte fer.

## I.6.2. Model électrique de transformateur à haute fréquence

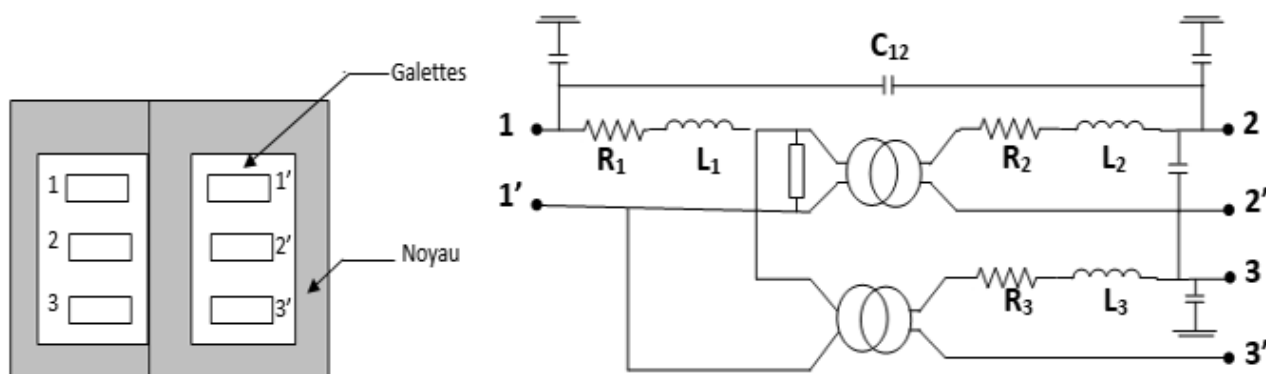
### I.6.2.1. Modèle universel EMTP

Le code informatique général EMTP (Electromagnetic Transient Program) est utilisé pour étudier le comportement du réseau électrique en régime transitoire. Il est utilisé comme standard pour la recherche de temps et de fréquence. Utilisez ce code de calcul pour simuler un

transformateur, notamment en représentant ce dernier avec des schémas électriques équivalents, dont :

- ✓ Transformateur parfait ;
- ✓ la branche magnétisante saturable modélisant le noyau de fer ;
- ✓ Inductance de fuite de groupe (couche ou bobine);
- ✓ Enfin, la résistance d'enroulement et le condensateur de couplage.

Le principal avantage de l'utilisation du modèle EMTP est qu'on peut effectuer des études d'interaction du transformateur, avec le réseau, dans des configurations quasi-réelles (présence de protections,...). En effet, outre les éléments linéaires (résistances et inductances linéaires), il traite aussi les éléments non linéaires, tels que les parafoudres. [14]



**Figure I.9** Schéma équivalent du transformateur en vue de traitement par EMTP[14]

- a) Coupe transversale du transformateur.  
b) Circuit équivalent.

## I.7. Types de transformateurs

### I.7.1. Transformateur de puissance

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Les transformateurs de distribution dont la tension d'au moins une des phases dépasse 1 000 V, sont considérés comme des transformateurs de puissance. Leur rôle est essentiel pour permettre de transporter l'électricité sur de longues distances et de réduire les pertes dans les réseaux électriques. D'autre par leur haut niveau de tension, ils répondent à des contraintes spécifiques notamment au niveau de l'isolation. Leur fiabilité et leur durée de vie doivent être particulièrement élevées.[13]

### I.7.2. Transformateurs de Mesures

#### I.7.2.1. Transformateur de Potentiel « tension » TT

le transformateur fait partie d'un appareil qui mesure une tension alternative élevée. C'est une sorte de transformateur avec la particularité de calibrer avec précision le rapport de transformation,

mais il est conçu pour ne fournir qu'une charge particulièrement faible au secondaire, ce qui équivaut à un voltmètre. Le rapport de transformation est utilisé pour mesurer la tension primaire en kilovolts (kV). Il existe en HTA et HTB. D'autres technologies existent, comme le diviseur de tension capacitif.[15] La figure ci-dessus représente un schéma d'utilisation d'un transformateur de tension.

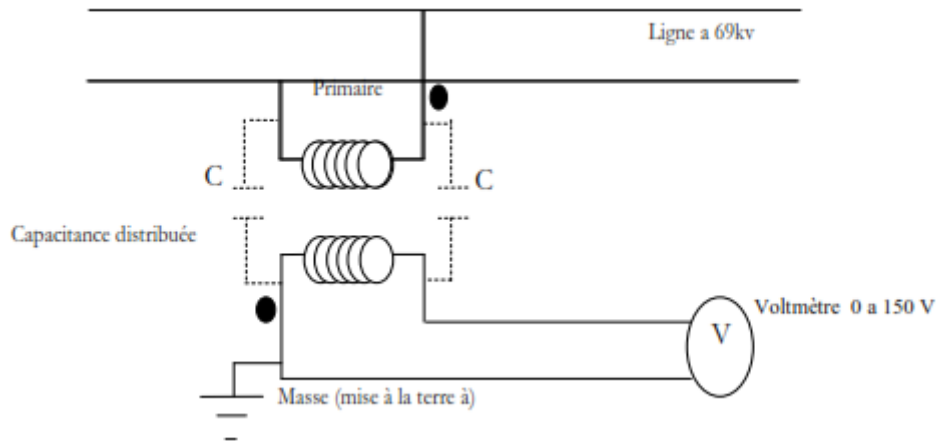


Figure I.10 Schéma d'un exemple d'utilisation du TT. [16]

### I.7.2.2. Transformateur d'intensité TI

Ce type de transformateur, également appelé transformateur de courant, est spécifiquement conçu pour s'adapter aux courants mis en jeu dans des circuits différents mais fonctionnellement interdépendants. Un tel transformateur autorise la mesure des courants alternatifs élevés. Il possède une spire au primaire, et plusieurs spires secondaires : le rapport de transformation permet l'usage d'un ampèremètre classique pour mesurer l'intensité au secondaire, image de l'intensité au primaire pouvant atteindre plusieurs kiloampères (kA). [15] La figure ci-dessus représente un schéma d'utilisation d'un transformateur de courant.

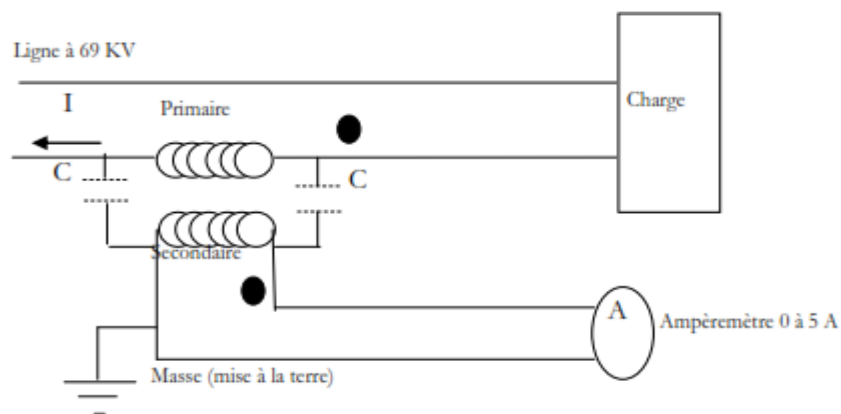


Figure I.11 Schéma d'un exemple d'utilisation du TI.[16]



### **I.7.3. Transformateur d'isolement**

Un transformateur d'isolement est un appareillage électrique qui tient un rôle capital dans toute installation électrique en aval. Il s'agit d'un dispositif de sécurité permettant de mettre en garde aussi bien les personnes que les autres équipements électriques.

Un transformateur d'isolement ou transformateur de séparation est un équipement de sécurité qui intègre une installation électrique afin de protéger d'un côté les personnes et de l'autre côté tous les appareils qui se trouvent en aval. En d'autres termes, cet appareillage électrique préserve tout dysfonctionnement notamment plusieurs circuits d'une même installation électrique. Son principal rôle est alors d'isoler toutes les parties actives qui pourront être sources de danger. Donc, un transformateur de séparation, comme son nom l'indique, est à recourir pour la séparation entre deux réseaux. [17]

## **I.8. Fonctionnement de transformateur**

### **I.8.1 Principe de fonctionnement**

Un transformateur est un élément statique qui transfère de l'énergie électrique entre deux circuits grâce à l'induction électromagnétique. Les deux circuits sont donc séparés électriquement, mais couplés magnétiquement. [13]

Le courant alternatif arrive dans le primaire et, par un phénomène d'induction, ressort par le secondaire élevé ou abaissé à la tension désirée, Les deux enroulements ne sont pas liés physiquement, ce qui permet d'avoir une totale isolation entre les deux enroulements. Le circuit magnétique fermé qui transmet la variation de champ magnétique produit par la tension primaire au bobinage du secondaire, et canalisé le flux créé par les enroulements.[08]

### **I.8.2 Fonctionnement à vide**

Lorsque le transformateur fonctionne à vide, l'enroulement secondaire est en circuit ouvert, ce qui signifie qu'il n'y a pas de charge du côté secondaire du transformateur, et donc le courant dans le secondaire sera nul, tandis que l'enroulement primaire supporte un faible courant  $I_0$  appelé courant à vide qui représente 2 à 10 % du courant nominal. Ce courant est responsable de l'alimentation des pertes fer (hystérésis et pertes par courants de Foucault) dans le noyau et d'une très faible quantité de pertes cuivre dans l'enroulement primaire.

- ✓ Le courant à vide se compose de deux composants :

- ✓ Composant réactif : (Il est en quadrature avec la tension appliquée  $V_1$ . Il produit un flux dans le cœur et ne consomme pas d'énergie).
- ✓ Composant actif : (Il est en phase avec la tension appliquée  $V_1$ . Il fournit les pertes fer et une petite quantité de perte cuivre primaire). [18]

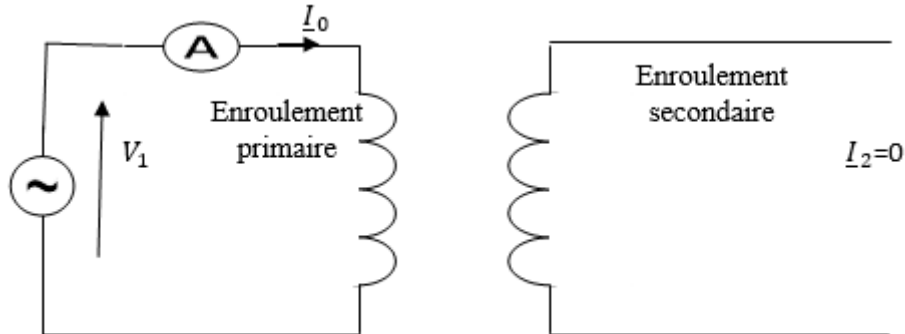


Figure I.12.Fonctionnement à vide.[18]

### I.8.3 Fonctionnement en charge

Le fonctionnement d'un transformateur en charge se produit lorsqu'un récepteur est raccordé à sa sortie. Le courant traversé par le secondaire transmet alors un champ magnétique opposé au champ magnétique généré par le primaire. Cela augmente le courant dans le primaire, et éventuellement la puissance produite par le secondaire est presque égale à la puissance consommée par l'enroulement primaire. Strictement parlant, il y a une certaine perte entre la puissance consommée par l'enroulement primaire et la puissance consommée par l'enroulement secondaire, mais au moins en théorie, on peut dire :

$$P_1 = P_2 \quad (I.4)$$

Les flux magnétiques générés par les courants primaires et secondaires s'annulent. Le flux magnétique produit par la bobine est proportionnel au courant et au nombre de spires, ce qui peut être compris comme : [15]

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \quad (I.5)$$

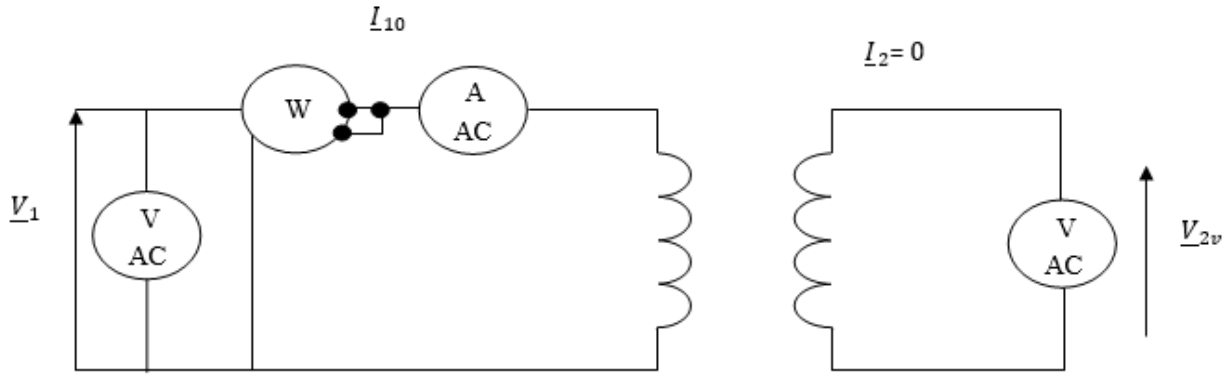
## I.9.Essai sur le transformateur

### I.9.1 Essai à vide

La perte fer est fonction de la fréquence  $f$ , de la valeur et de la forme de la tension  $V_1$ , et des propriétés de la partie du circuit magnétique. Ces pertes sont constantes en fonction de la charge. Afin de mesurer les pertes dans le fer et les fuites de flux magnétique, un état de faible perte Joule est requis, ce qui est courant, et l'endroit avec une perte magnétique élevée est le fonctionnement à

vide, et ce n'est pas le cas. Il n'y a pas de récepteur connecté au secondaire. La puissance consommée par le primaire du transformateur est presque égale. [13]

L'essai à vide permet le calcul des paramètres shunt (l'inductance et la résistance magnétisantes).

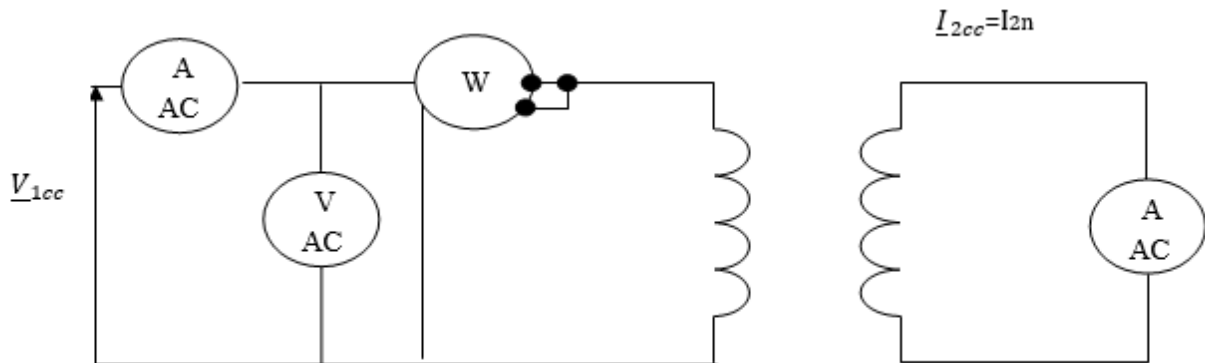


**Figure I.13** Schéma équivalente d'un essai à vide

### I.9.2 Essai en court-circuit

L'essai en court-circuit consiste à appliquer une tension réduite (minimum) au primaire tout en gardant le secondaire en court-circuit. Augmenter ensuite la tension primaire jusqu'à ce que le courant secondaire atteigne sa valeur nominale. Mesurer la tension, le courant et la puissance de court-circuit.[19]

L'essai en court-circuit permet de calculer les paramètres série (résistance et inductance) soit on les ramenant au primaire ou bien au secondaire.



**Figure I.14** Schéma équivalent d'un essai en court-circuit.

## I.10. Pertes dans un transformateur

### I.10.1. Pertes par effet joule

Les pertes par effet joule dans les enroulements sont appelées également pertes cuivre, elles dépendent de la résistance de ces enroulement et de l'intensité du courant qui les traverse, elles sont proportionnelles au carré de l'intensité du courant.[6]

$$P_J = \sum_i R_i I_i^2 \quad (I.6)$$

$R_i$  : Résistance de l'enroulement  $i$  ( $i = 1, 2$ ),

$I_i$ : Intensité du courant qui le traverse.

### I.10.2. Pertes magnétiques

Il y a deux grandes types de pertes dans les matériaux magnétiques :

1. Pertes par hystérésis.
2. Pertes par courants de Foucault.

#### I.10.2.1 Pertes par hystérésis

Sous excitation cyclique (sinusoïdale, par exemple), le matériau magnétique fait un cycle d'hystérésis et crée ainsi des pertes d'énergie dans le noyau sous forme de chaleur. Les pertes par hystérésis sont directement proportionnelles à la surface du cycle d'hystérésis et à la fréquence d'opération. Une formule empirique permet de calculer les pertes (par  $m^3$ ) :

$$P_{hys} = K B_{max}^2 f \quad (I.7)$$

Ou :

$K$  est une constante qui dépend du matériau,

$B_{max}$  est la valeur maximale de la densité de flux,

$f$  est la fréquence de fonctionnement.

On réduit les pertes par hystérésis en utilisant des tôles ayant un faible pourcentage de silicium (0.8 à 3.5%) ou en utilisant des tôles à courants orientés (tôles en silicium à faible teneur en carbone).[20]

#### I.10.2.2 Pertes par courants de Foucault

Le champ magnétique alternatif induit dans le noyau de fer par la force électromagnétique a créé un courant induit dans le matériau. Ces courants dans les conduits provoquent des pertes  $R I^2$  (car les matériaux magnétiques ont une résistivité non nulle). Ces pertes sont formées sous forme de chaleur. Afin de minimiser le courant induit dans le noyau magnétique, des noyaux feuilletés

(bobines pour un fonctionnement à basse fréquence) ou des noyaux de ferrite (bobines pour un fonctionnement à haute fréquence) isolés électriquement les uns des autres sont utilisés. On peut estimer la perte par courants de Foucault grâce à la relation précédente[20] :

$$P_f = \frac{\pi^2 d^2 B_{max}^2 f^2}{6 \rho D} \quad (I.8)$$

Où :

$d$  est l'épaisseur du panneau,  $\rho$  est la résistivité,

$D$  est la densité du matériau et

$f$  est la fréquence.

Les données fournies par le fabricant sont généralement utilisées pour estimer la perte.

### I.11. Transformateur parfait

Un transformateur parfait satisfait aux conditions suivantes :

- ❖ les fuites magnétiques sont nulles, c'est-à-dire que le même flux parcourt les deux enroulements  $B_1$  et  $B_2$  ; on a donc  $\varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$ .
- ❖ les résistances  $R_1$  et  $R_2$  des enroulements sont négligeables ; on a donc  $R_1 = R_2 = 0$  ;
- ❖ la perméabilité  $\mu$  du circuit magnétique est infinie ; il en résulte que la réluctance  $R$  du circuit magnétique (qui est égale au rapport  $l/\mu S$ ) et les pertes électromagnétiques sont nulles.

Le flux variable  $\overline{\varphi}_1$  induit dans le primaire une f.é.m. égale à  $-jN_1\omega\overline{\varphi}_1$ . L'application de la loi d'Ohm aux bornes de cet élément conduit à :

$$\overline{V}_1 = R_1\overline{I}_1 + jN_1\omega\overline{\varphi}_1 \quad (I.9)$$

De même  $\overline{\varphi}_2$  induit dans le secondaire une f.é.m. égale à  $-jn_2\omega\overline{\varphi}_2$ .

$$\overline{V}_2 = -R_2\overline{I}_2 - jN_2\omega\overline{\varphi}_2 \quad (I.10)$$

Dans ces conditions, les équations (I.9) et (I.10) deviennent :

$$\overline{V}_1 = jN_1\omega\overline{\varphi}, \overline{V}_2 = -jN_2\omega\overline{\varphi} \quad (I.11)$$

Elles conduisent à :

$$\overline{V}_2 = -\frac{N_2}{N_1}\overline{V}_1 = -m\overline{V}_1 \quad (I.12)$$

D'autre part, la loi d'Hopkinson s'écrit, dans le cadre des hypothèses faites,

$$N_1\overline{I}_1 + N_2\overline{I}_2 = \Re\overline{\varphi} = 0 ; \quad (I.13)$$

On en déduit :

$$\bar{I}_1 = -\frac{N_2}{N_1}\bar{I}_2 = -m\bar{I}_2 \quad (\text{I.14})$$

La puissance primaire  $P_1 = \bar{V}_1\bar{I}_1$  est intégralement transférée au secondaire. Le modèle du transformateur parfait et les équations (I.13) et (I.14) qui en découlent constituent une approximation valable dans le cas de transformateurs de faible puissance, utilisés par exemple dans les montages électroniques. [21]

## I.12. Transformateur réel

Le transformateur réel ne possède pas des caractéristiques parfaites comme le transformateur idéal. On doit tenir compte de :

1. Noyau magnétique. Le noyau possède une caractéristique B(H) non-linéaire, avec hystérésis, et une perméabilité non-infinie ( $\mu_r \neq \infty$ ).
2. Bobinages. Les bobinages sont en cuivre, ayant une résistivité non-nulle ( $\rho \neq 0$ ).

Compte tenu de ces caractéristiques, on peut déduire plusieurs sources de pertes dans le transformateur tel que:

- 1) Puisque la perméabilité du noyau est non-infinie, la reluctance du noyau ne sera pas Nulle. Il y a par conséquent des fuites de flux :
  - (a) au primaire
  - (b) au secondaire
- 2) On a déjà vu qu'il existait des fuites par hystérésis et des fuites par courants de Foucault.

La résistivité des filles de cuivre implique une résistance interne au primaire et au secondaire.

Les conséquences de ces phénomènes parasites sont :

- Le rendement du transformateur est inférieur à 100%.
- Le rapport de tension entre le primaire et le secondaire ne sera pas exactement égal au rapport du nombre de tours. La tension au secondaire variera aussi en fonction de la charge.[22]

## I.13. Conclusion

Le but de ce chapitre est de faire une rappelle sur la généralité et notions de base sur le transformateur : définition, constitution, hypothèse de Kapp, nous avons vu la modélisation du transformateur (à basse fréquence et à haut fréquence), les types de transformateur, le fonctionnement de transformateur à vide et en charge, Les essais sur le transformateur à vide et en court-circuit.

**Chapitre II:**  
**ETUDE DES PHENOMENES**  
**TRANSITOIRES**  
**DANS LES TRANSFORMATEURS**  
**MONOPHASES**

## **II.1 Introduction**

La mise sous tension du transformateur génère peu de transitoire généralement de courte durée, mais qui peut néanmoins s'accompagner d'effets importants et dangereux pour le transformateur tel que apparition de très grandes contraintes mécaniques très élevées entre les enroulements ou entre les parties des enroulements, répartition très inégale de la tension entre les différentes parties des enroulements ou même entre les différentes spires, et le plus important pour notre étude c'est l' apparition de courant d appel de grande amplitude. Ces courants sont causés par plusieurs facteurs, tel que la saturation du noyau magnétique de transformateur, la valeur et la polarité du flux rémanent.

L'étude du régime transitoire dans ce chapitre est souvent nécessaire afin de déterminer si les courants qui en découlent ne présentent pas des évolutions dangereuses.

## **II.2 Régimes transitoire**

Lors de la mise sous tension des transformateurs ou des modifications de structure des systèmes électriques, le transformateur passe par des différentes phases. Chaque une est caractérisée par des phénomènes électriques propres, parmi ces phases il se produit une phase de transitions qu'on appelle régimes transitoires. Qui n'obéissent pas nécessairement aux règles du régime permanent. [23]

### **II.2.1 Principaux phénomènes affectent le transformateur**

En fonction du facteur principal qui détermine le régime transitoire (courant ou tension) on distingue deux principaux groupes de phénomènes :

- ❖ Surintensités causés par les enclenchements qui peuvent détériorer l'isolation.
- ❖ Surtensions causés par les courts circuits et qui engendrent des échauffements et des efforts électrodynamiques importants au niveau des enroulements.[11]

## **II.3. Courant d'appel**

### **II.3.1. Définition**

Le courant d'appel du transformateur est le maximum courant instantané consommé par le primaire du transformateur lorsque son secondaire est en circuit ouvert. Le courant d'appel ne crée pas de défaut permanent, mais provoque une commutation indésirable dans le disjoncteur du transformateur. Pendant le courant d'appel, la valeur maximale atteinte par le flux dépasse le double du flux normal.[24]



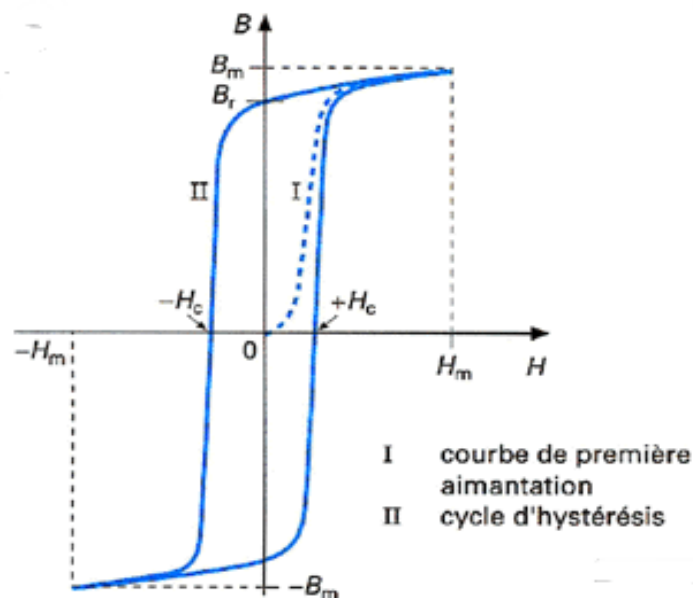
Ces courants sont riches en harmoniques et possèdent une composante apériodique. Pour mieux comprendre ce phénomène électrique, il est nécessaire de tout d'abord étudier un phénomène magnétique, le flux rémanent.

### II.3.2.Relation entre le courant et la densité de flux

Il est connu que si l'on fait circuler un courant  $I$  dans une bobine entourant un circuit magnétique, la densité de flux  $B$  dans le circuit augmente avec le champ magnétique  $H$ . Si le flux initial est nul, cette augmentation suit la courbe (I) de la figure (II.1), la densité de flux atteint la valeur  $B_m$  pour un champ magnétique  $H_m$ .

Le processus d'aimantation présente une contribution irréversible, 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 (I), mais une courbe située au-dessus de (II). Ainsi, quand le champ magnétique revient à zéro, l'aimantation totale n'est pas nulle : c'est l'aimantation Rémanente  $M_r$ . Pour annuler cette aimantation, un champ inverse d'une amplitude suffisante doit être appliqué : c'est le champ coercitif  $H_C$ .

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.[25]



**Figure II.1** Cycle d'hystérésis

## II.4.Flux rémanent

Lorsque le transformateur est hors tension. Une valeur de flux qui persiste dans le circuit magnétique appelé flux rémanent, qui peut générer un courant d'appel si le transformateur n'est pas complètement démagnétisé après la mise hors tension.[2]

### II.4.1.Origine de flux rémanent

Pendant l'alimentation de bobinage primaire dont la bobine qui est concentrique de  $N_1$  spires entoure le tore magnétique, la densité de flux croît et tend vers une valeur d'aimantation correspond à la saturation.

$$B = \mu * H \quad (\text{II.1})$$

$$B = \mu_0 * \mu_r * H \quad (\text{II.2})$$

Lorsque l'intensité du champ magnétique diminue pour atteindre une valeur nulle, la densité de flux diminue et tend vers une valeur différente de zéro. Ceci est justifié par le déplacement des parois de Bloch qui n'est pas instantané, et qui se ne présente plus un retour à la situation initial, mais il se fait d'une manière à avoir une induction non nulle lors désaimantation dite induction rémanente [26].Sa valeur dans les matériaux ferromagnétiques de type doux est assez petite.

### II.4.2.Création du flux rémanent

Les transformateurs peuvent être réenclenchés suite au déclenchement provenant de différentes sources (foudre, isolation, protection). Cette remise sous tension peut s'accompagner d'un courant d'appel provoqué par la valeur de flux rémanent. Cette dernière se calcule par l'utilisation des méthodes dans différentes conditions.[11]

- ❖ Méthode directe qui se base sur l'intégral de la tension lors la mise sous tension de transformateur.
- ❖ Méthode indirecte qui est réalisée lors de la mise hors tension de transformateur.
- ❖ Méthode qui s'appuie sur l'analyse de courant d'appel lors la remise sous tension de transformateur.

### II.4.3. Calcul analytique de flux rémanent

L'équation suivante représente l'expression de flux imposé dans le circuit magnétique :

$$\varphi(t) = \left[ \frac{V\sqrt{2}}{NW} \right] \cos(\omega t + \alpha) + [\varphi_r - (V\sqrt{2})/n\omega \cos(\alpha)] e^{-t/\tau} \quad (\text{II.3})$$

$$\tau = L/R$$

Le flux rémanent et l'angle de déphasage varient sous les deux cas suivants qui traduisent respectivement l'apparition et l'absence de courant d'appel [26].

Si  $\varphi_r = \varphi_{max}$  et  $\alpha = 0$  sont remplacées dans l'équation (II.3), l'expression de flux devient sous l'expression suivante, en entraînant un appel de courant important. Alors ce cas est défavorable.

$$\varphi(t) = \left[ \frac{V\sqrt{2}}{Nw} \right] \cos(\omega t) + [\varphi_{max} - (V\sqrt{2})/Nw]e^{-t/\tau} \quad (\text{II.4})$$

Si  $\varphi_r = 0$  et  $\alpha = \pi/2$  sont remplacées dans l'équation (II.3) comme c'est montré ci-dessous, il n'aura plus de phénomènes transitoires qui va apparaître.

$$\varphi(t) = (V\sqrt{2})/[Nw \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})] \quad (\text{II.5})$$

$\varphi_r$ : Le flux rémanent.

L : l'inductance de l'enroulement primaire.

$\alpha$  : L'instant de fermeture sur l'onde de tension.

## II.5. Courant magnétisant

Le courant magnétisant représente la composante réactive du courant à vide, qui sert à excité le circuit magnétique. En régime linéaire, il existe sous une forme non sinusoïdale, d'une valeur admissible au fonctionnement du transformateur .Par contre en régime transitoire lorsque les paramètres du transformateur (l'inductance magnétisante) sont variables ou bien régime non linéaire, il possède une valeur pic très élevée qui provient d'un dépassement de flux lors d'une remise sous tension non vérifiée. Cette valeur influence sur le fonctionnement du transformateur.[11]

## II.6.Transformateur avec saturation

L'enclenchement et le ré-enclenchement avec flux rémanent font que la zone de fonctionnement non-linéaire du transformateur est sollicitée. La caractéristique de saturation donnée par une courbe du flux dans le noyau en fonction du courant magnétisant est représentée par une inductance non-linéaire (figure.7 chapitre I). Notons que l'inductance non linéaire peut être placée indifféremment côté primaire ou côté secondaire tant que le rapport de transformation est respecté.[12]

## II.7. Coupure d'un courant en régime établi

Le courant magnétisant d'un transformateur à vide est généralement faible en régime établi. Pour la plupart des transformateurs de puissances modernes, il se situe entre 0.1% et 0.5% du courant nominal. La forme d'onde du courant n'est pas sinusoïdale et la valeur crête  $\hat{i}$  atteint normalement 2.5 fois la valeur rms (dite aussi valeur efficace) Le disjoncteur est capable d'arracher ce courant même à son maximum. Les figures II.2, II3 et montrent la forme typique de flux et courant magnétisant à L'instant d'ouverture  $t_0$ . Le transformateur n'est pas démagnétisé mais le noyau du transformateur reste dans un état magnétique d'où vient la notion du flux rémanent.[12]



Figure. II.2 : Valeur de flux à l'instant de coupure  $t_0$ .

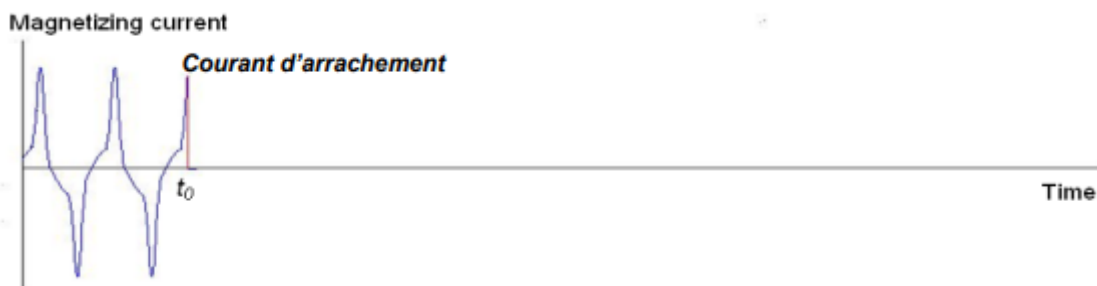
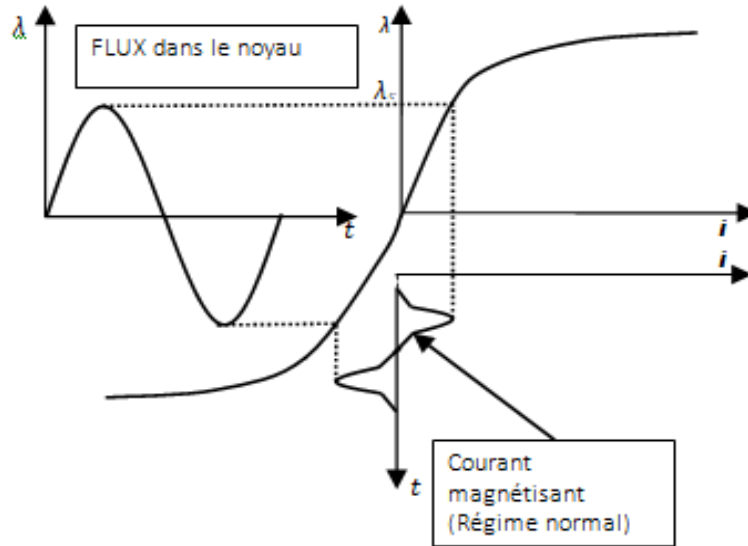


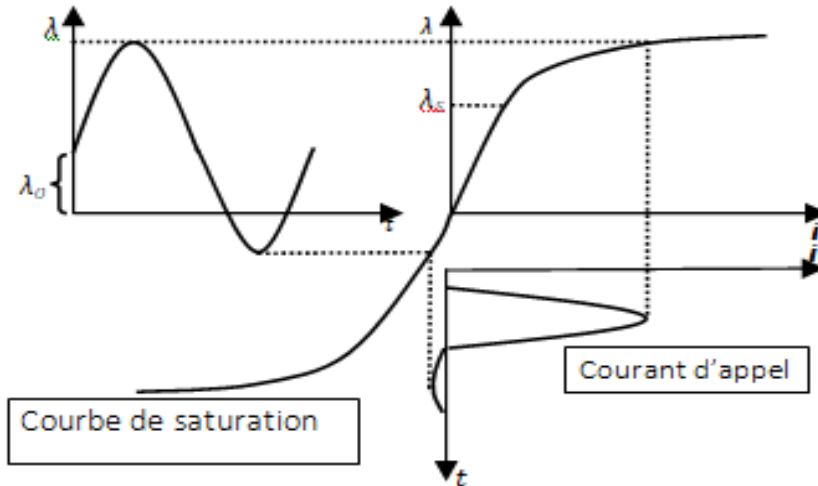
Figure. II.3 : Valeur de courant magnétisant à l'instant de coupure  $t_0$ .

## II.8.Courant d'appel et Flux rémanent

La saturation du noyau magnétique d'un transformateur est la principale cause d'un transitoire de courant d'appel. La saturation du noyau est due à un changement brusque de la tension du système qui peut être provoqué par des commutations transitoires, la synchronisation hors phase d'un générateur, des défauts externes et la restauration des défauts. La mise sous tension d'un transformateur donne le cas le plus grave de courant d'appel et le flux dans le noyau peut atteindre une valeur théorique maximale de deux à trois fois le pic du flux nominal. [27]. Les Figure II.4 et Figure II.5 illustre la relation entre le flux et le courant en régime établi et en régime transitoire.



**Figure II.4** Flux et courant magnétisant en régime établi Régime permanent  $\lambda < \lambda_S$



**Figure. II.5** Flux et courant magnétisant en régime transitoire  $\lambda > \lambda_S$

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 II. 4.

Pour un réenclenchement 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 grande que sa valeur crête en régime établi selon la courbe du flux et Courant du transformateur comme dans indiqué la figure II.5.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 II.6, d'où l'origine du courant d'appel.

Mathématiquement, en considérant que  $\bar{\varphi}$  est la valeur crête du flux pour un transformateur en régime établi,  $\bar{V}$  la tension crête, nous avons  $v(t) = \bar{V}\sin(\omega t)$  et  $\bar{V} = \omega\bar{\varphi}$ . Pour des raisons économiques, les transformateurs sont conçus avec une valeur de flux crête opérationnelle aussi proche que possible de la valeur de saturation.

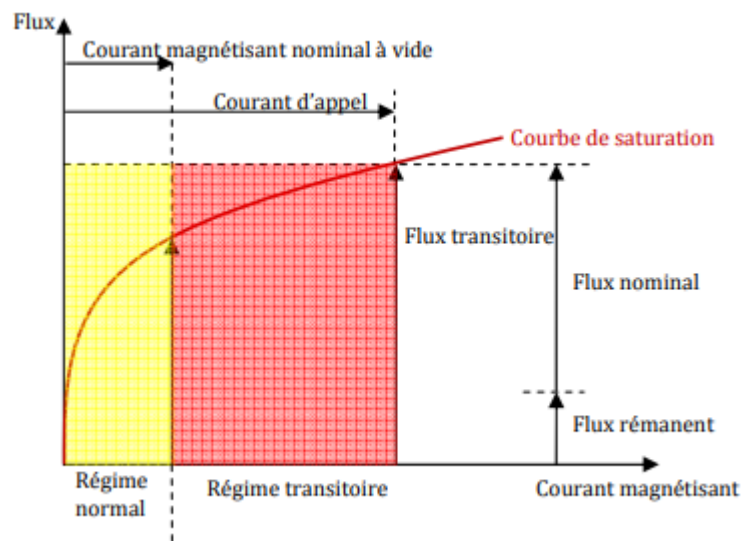
Soit  $T$  la période du signal de tension,  $t_0$  l'instant de la mise hors tension du transformateur, nous cherchons à calculer la valeur instantanée du flux à demi-période.

$$\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = \varphi(t_0) + \int_{t_0}^{\frac{T}{2}} d\varphi = \varphi(t_0) + \frac{\bar{V}}{\omega}(1 + \cos\omega t_0) \quad (\text{II.6})$$

Les cas extrêmes sont alors :

$t_0 = T/4$ ,  $\varphi(t_0) = 0$ , nous avons  $\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{\bar{V}}{\omega}$  c'est le cas de la coupure à zéro de flux, donc sans flux rémanent, la mise sous tension reste en zone linéaire.

$t_0 = 0$ ,  $\varphi(t_0) = \frac{\bar{V}}{\omega}$ , nous avons  $\varphi\left(\frac{T}{2}\right) = 2\frac{\bar{V}}{\omega} = 2\bar{\varphi}$  c'est le cas de la coupure au maximum de flux, la mise sous tension atteint la zone saturée.[19]



**Figure II.6** 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).

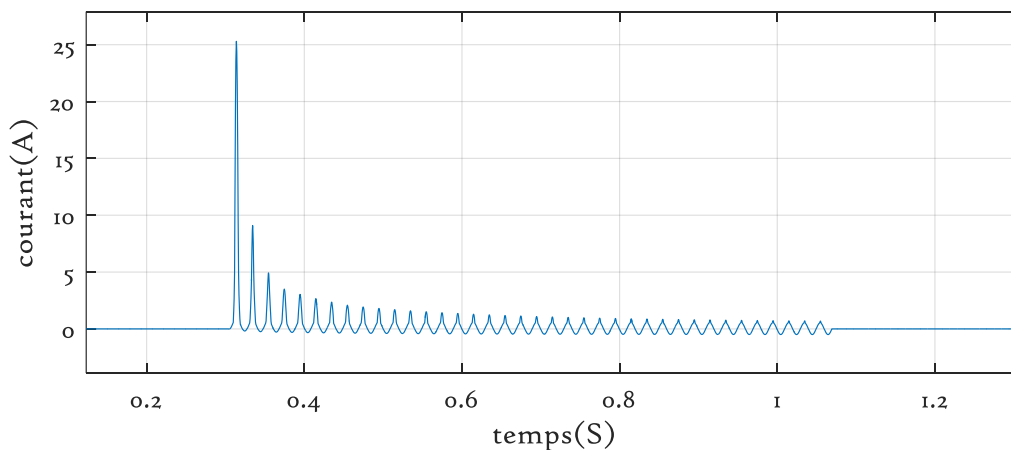
Ainsi, l'amplitude du courant magnétisant peut atteindre en zone saturée (alors que le transformateur est à vide) plusieurs fois celle du courant nominal. Le rapport du courant magnétisant en zone saturée sur le courant nominal dépend de la puissance des transformateurs. En pratique, pour les gros transformateurs, 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.[12]

## II.9 Phénomènes d'enclenchement du transformateur de puissance

### II.9.1 : Effets de l'instant de commutation sur le courant d'appel

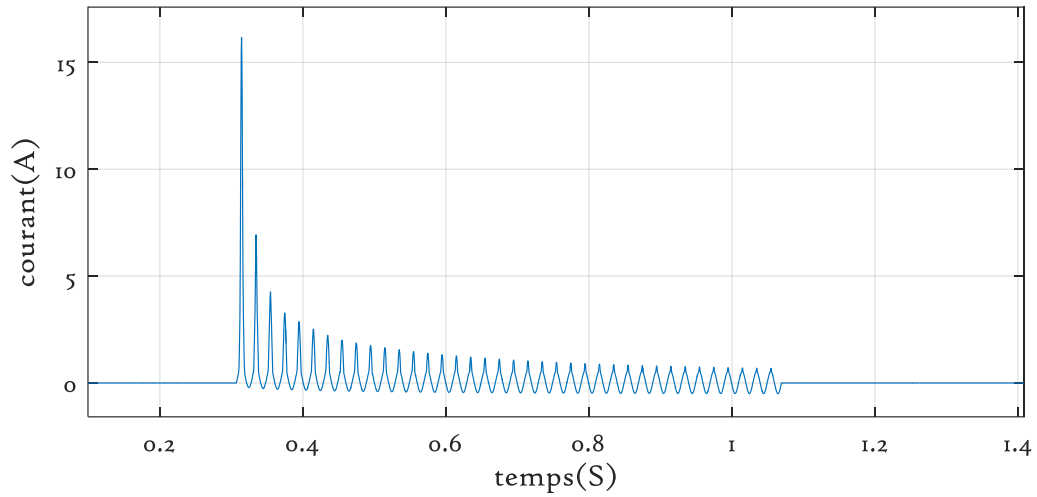
Il est bien connu qu'un transformateur subira un courant d'appel magnétisant pendant la mise sous tension. Un courant d'appel se produit dans un transformateur chaque fois que le flux résiduel ne correspond pas à la valeur instantanée du flux en régime permanent qui serait normalement requis pour le point particulier de la forme d'onde de tension auquel le circuit est fermé.[29]

Une simulation a été effectuée par ATP/EMTP sur un modèle électrique d'un transformateur monophasé avec les paramètres de la plaque signalétique (la tension primaire nominale :  $V_{1n} = 220V$ , la tension secondaire nominale :  $V_{2n} = 25 V$ , la puissance apparente :  $S_n = 2000 VA$ , la fréquence :  $f = 50 HZ$ ,  $I_{1n} = S_n / V_{1n} = 2000 / 220 = 9,1 A$   $I_{2n} = S_n / V_{2n} = 2000 / 25 = 80 A$ ), avec différentes instant de commutation sur l'onde de tension. Pour le but d'observer l'effets de l'instant de commutation sur le courant d'appel. Les résultats sont représentés dans les figures suivantes :



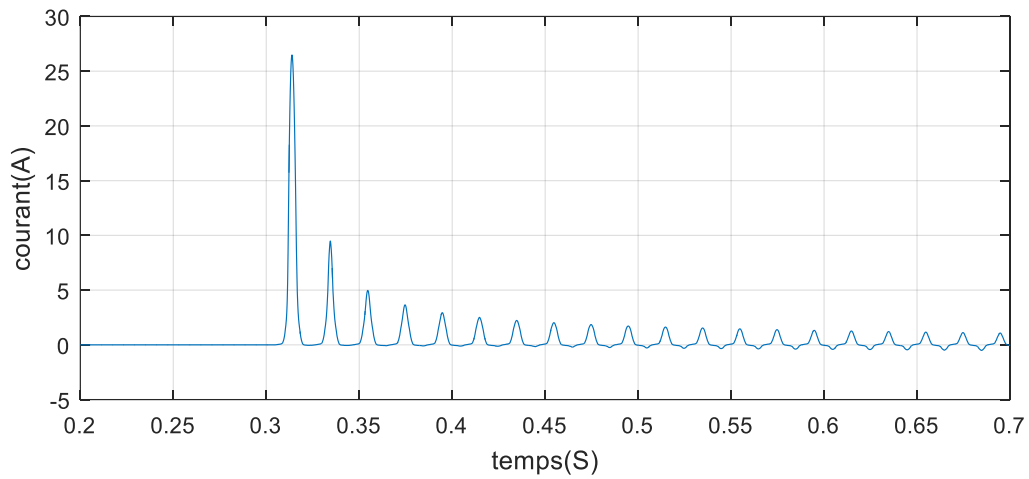
**Figure II.7** Courant d appel pour un instant de commutation égal a0.3040

Pour un instant de commutation 0.3040 s le pic de courant arrive a une valeur de 25.03(A) comme montre la figure II.7



**Figure II.8** Courant d’appel pour un instant de commutation égal à 0.3070 s

Pour un instant de commutation 0.3070s le pic de courant arrive aune valeur de 16.46(A)comme montre la figure II.8.



**Figure II.9** Courant d’appel pour un instant de commutation égal à 0.3048s

Après plusieurs essais avec plusieurs instants de commutation. Le courant d’appel le plus grand a l’instant 0.3048s .comme montre la Figure II.9 une valeur de 26.43 (A)

Cet instant de commutation sera appliqué dans le chapitre III pour l’étude de l’influence de la charge sur le régime transitoire.



## **II.10. Facteurs qui influent sur l'amplitude et la durée du courant d'appel**

Le phénomène d'appel du courant magnétisant est dû au surflux temporaire du noyau du transformateur au moment de la mise sous tension. Les principaux facteurs affectant le courant magnétisant d'appel sont identifiés dans [3] et sont

- ❖ La forme d'onde de tension au moment de la fermeture de disjoncteur.
- ❖ La valeur de flux magnétisant résiduel.
- ❖ Le signe de flux magnétisant résiduel.
- ❖ La constitution du noyau de transformateur.
- ❖ La densité de flux de saturation.
- ❖ L'impédance totale du circuit d'alimentation.

## **II.11. Influence du courant d'appel sur le fonctionnement du transformateur**

Il n'y a aucune preuve directe que la mise sous tension d'un transformateur peut provoquer une panne immédiate en raison de courants d'appel élevés. Cependant, les défaillances d'isolement dans les transformateurs de puissance qui sont fréquemment alimentés à vide ou faiblement chargés.[30]

Mais l'influence de courant d'appel sur le fonctionnement du transformateur elle est sur le long terme pour les transformateurs affectés successivement. On cite par exemple :

- ❖ Les contraintes mécaniques comme le transformateur peut subir des déplacements des bobines. Dégradation accélérée du transformateur provoquée par des efforts électromagnétiques importants au niveau du bobinage.
- ❖ Le fonctionnement involontaire de système de relai de protection .[11]

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.[31]

## **II.12. Atténuation de courant d'appel**

Pour avoir une bonne qualité d'énergie électrique transportée ou consommée, il y a plusieurs techniques qui consistent à réduire le courant d'appel, on cite par exemple [11] :

- ❖ Utilisation des résistances et des inductances de pré-insertion à l'ouverture et surtout à la fermeture des disjoncteurs HT.
- ❖ Utilisation d'un système qui se base sur la commande des instants de la remise sous tension.

- ❖ Utilisation des appareils supplémentaires pour effectuer la démagnétisation du noyau magnétique de transformateur.
- ❖ Les constructeurs des transformateurs peuvent adapter des solutions pour la réduction, par exemple l'insertion des intervalles d'air dans le circuit magnétique du noyau pour réduire la perméabilité magnétique du noyau de fer.
- ❖ Insertion des résistances neutres : cette technologie propose des résistances de mise à la terre dont la connexion se fait avec le neutre de l'enroulement triphasé.
- ❖ Utiliser une technique qui consiste à enclencher la transformatrice triphasée phase par phase tout en sélectionnant avec soin l'instant d'enclenchement des trois phases.

### **II.13. Conclusion**

Ce chapitre est consacré pour l'étude de quelques notions sur le régime transitoire et le courant d'appel dans le transformateur : définition, caractéristiques, les causes de ces phénomènes, tel que le flux rémanent et la saturation du noyau magnétique de transformateur.

Une simulation a été effectuée avec un modèle de transformateur sur l'ATPdraw pour observer l'influence de point sur l'onde de la tension l'instant dont le transformateur a été mis sous tension sur l'amplitude de courant d'appel. Ainsi que l'influence de ce courant et leur effets sur le fonctionnement de transformateur et aussi la manière de sa minimisation.

# **Chapitre III:**

## **ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA CHARGE SUR LE REGIME TRANSITOIRE DU TRANSFORMATEUR**

### **III.1 Introduction**

Le transformateur de puissance est une machine électrique, qui peut être exposé a des nombreux variations des conditions de fonctionnement pendant ça duré du vie.

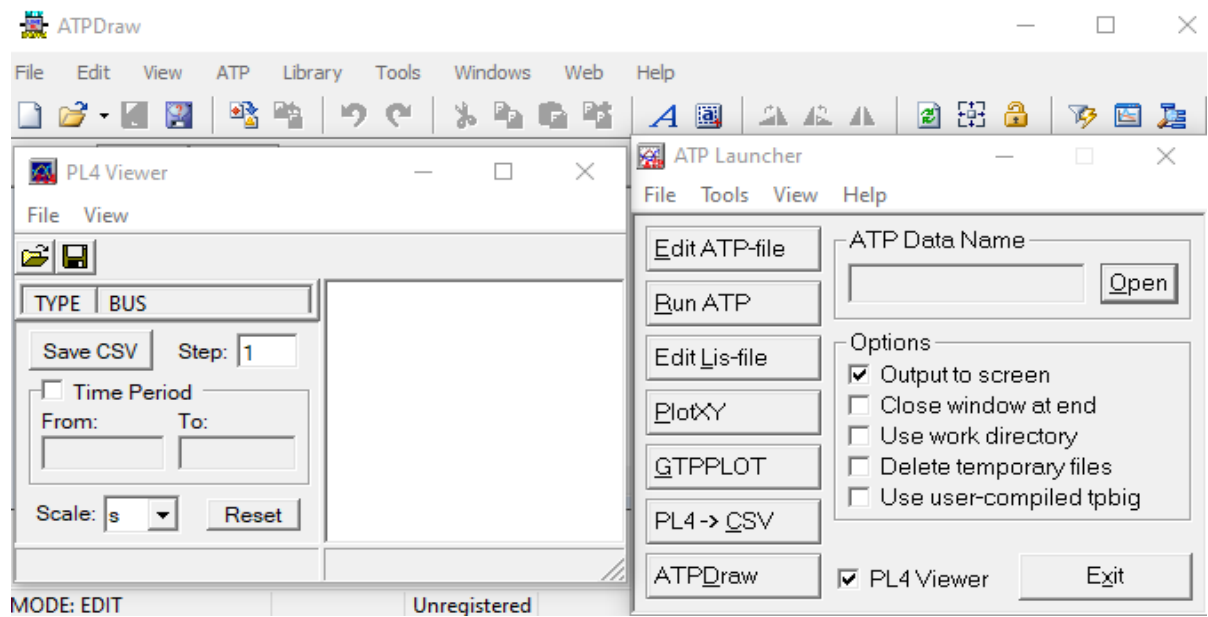
Lorsqu'une ou plusieurs grandeurs qui déterminent le fonctionnement d'un transformateur varient, il se produit un passage d'un état permanent à un autre. L'objectif de ce chapitre est de présenter la procédure de calcule des paramètres de transformateurs, puis les introduit dans un model de transformateur BCTRAN dans l'ATPdraw pour observer le comportement de transformateur dans le régime transitoire à vide et en charge.

### **III.2 Description de l'ATP / EMTP**

ATP / EMTP est considéré comme le programme le plus largement utilisé pour la simulation numérique des phénomènes transitoires de nature électromagnétique et électromécanique dans les systèmes d'alimentation électrique. Il a été continuellement développé grâce à des contributions internationales.

Le programme ATP calcule les variables d'intérêt au sein des systèmes d'alimentation électrique en fonction du temps, généralement déclenchées par certaines perturbations. Fondamentalement, la règle d'intégration trapézoïdale est utilisée pour résoudre les équations différentielles des composants du système dans le domaine temporel. Les conditions initiales non nulles peuvent être déterminées automatiquement par une solution de phaseur en régime permanent ou elles peuvent être saisies par l'utilisateur pour certains composants. ATP/EMTP dispose de nombreux modèles dont des machines tournantes, des transformateurs, des parafoudres, des lignes de transmission et des câbles. Avec ce programme numérique, des réseaux complexes de structure arbitraire peuvent être simulés. L'analyse des systèmes de contrôle, des équipements électroniques de puissance et des composants avec des caractéristiques non linéaires telles que les arcs et la couronne sont également possibles. Des perturbations symétriques ou asymétriques sont autorisées, telles que des défauts, des surtensions ou tout type d'opérations de commutation, y compris la commutation de vannes. Le calcul de la réponse en fréquence des réseaux de phaseurs est également pris en charge.

ATP Drawa une interface utilisateur Windows standard, ATPDraw prend en charge plusieurs documents et offre à l'utilisateur de travailler sur plusieurs circuits simultanément avec la possibilité de copier des informations entre les circuits. La taille de la fenêtre de circuit est beaucoup plus grande que l'écran réel, comme l'indiquent les barres de défilement de chaque fenêtre de circuit.[32]



**Figure III.1** Fenêtre principale de ATPdraw et l'ATPlancher.

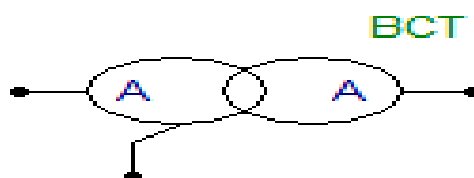
### III.3.Modèles du transformateur dans l'ATPDraw

Les modèles existants dans la version 5 de l'ATPDraw sont :

- ❖ Transformateur idéal monophasé et triphasé.
- ❖ Transformateur saturable monophasé et triphasé.
- ❖ Transformateur BCTRAN et hybride triphasé (XFMR)

### III.4.Transformateur BCTRAN

Le transformateur BCTRAN peut être utilisée pour dériver une représentation linéaire pour une phase monophasée ou triphasée,transformateurs à deux, trois ou plusieurs enroulements, en utilisant les données d'essai de l'essai d'excitation et de l'essai de court-circuit. Le comportement non linéaire ne peut pas être inclus dans le modèle BCTRAN.



**Figure III.2** Symbole du transformateur BCTRAN dans ATP Draw.

## III.5 Identification des paramètres du transformateur

### III.5.1 Model de transformateur utilisé



(a)

(b)

**Figure III.3** Model de transformateur utilisé dans l'étude.

(a) plaque signalétique de transformateur

(b) transformateur réel

La tension primaire nominale :  $V_{1n} = 220V$

La tension secondaire nominale :  $V_{2n} = 25 V$

La puissance apparente :  $S_n = 2000 VA$

La fréquence :  $f = 50 HZ$

$I_{1n} = S_n / V_{1n} = 2000 / 220 = 9,1 A$

$I_{2n} = S_n / V_{2n} = 2000 / 25 = 80 A$

### III.5.2. Matériels utilisés

- ❖ Transformateur monophasé.
- ❖ Source d'alimentation alternative (Autotransformateur).
- ❖ Appareils de la mesure : Voltmètre, Ampèremètre, Wattmètre.
- ❖ Câbles de raccordement.

### III.5.3.Détermination des paramètres de circuit équivalent par l'essai à vide

On alimente le côté primaire par une tension nominale (220 V), et le secondaire est ouvert, les appareils de mesure permettent de prendre les valeurs de la tension  $V_{10}$ , courant  $I_{10}$  et puissance active  $P_{10}$ (pertes fer).

L'essai à vide, nous permet de déterminer le rapport de transformation  $m$  ainsi la résistance ( $R_m$ ) et la réactance de magnétisation ( $X_m$ ).

La figure III.4 montre un schéma explicatif du montage réalisé au laboratoire.[19]



**Figure III.4** Montage de l'essai à vide du transformateur monophasé.

Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai à vide :

**Tableau III.1** : Résultats de l'essai à vide.

	$V_1$	$V_{20}$	$P_{10}$	$\cos\phi_{10}$	$I_{10}$
Essai a vide	220	25	17	0.2	0.369

La puissance absorbée  $P_{10}$  représente les pertes fer du circuit magnétique à vide.

$$P_{10} = I_{10} * V_{10} * \cos \varphi_{10} \quad (\text{III.1})$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_{10}}{I_{10} * V_{10}} = \frac{17}{220 * 0.369} = 0.20 \quad (\text{III.2})$$



Le facteur de puissance a vide égale a 0.20

### III.5.3.1.Calcul de la résistance et la réactance de magnétisation

Le courant à vide  $I_{10se}$  se divise dans la branche magnétisant en deux composantes :

Composante active  $I_{10a}$  et la Composante réactive  $I_{10r}$  les relations de ces derniers sont comme suit :

$$I_{10a} = I_{10} * \cos \varphi_{10} \quad (III.3)$$

$$I_{10r} = I_{10} * \sin \varphi_{10} \quad (III.4)$$

Résistance shunt

$$R_m : \quad R_m = \frac{V_1}{I_{10a}} = \frac{V_1}{I_{10} * \cos \varphi_{10}} \quad (III.5)$$

$$R_m = 2847,05 \Omega.$$

$$\text{Reactance shunt } X_m : \quad X_m = \frac{V_1}{I_{10r}} = \frac{V_1}{I_{10} * \sin \varphi_{10}} \quad (III.6)$$

$$X_m = 609,72 \Omega$$

### III.5.4.Détermination des paramètres de circuit équivalent par l'essai court-circuit

A l'aide d'un autotransformateur, on alimente le transformateur sous une tension très réduite  $V_{1cc}$  qui nous permet d'avoir le courant secondaire nominal. Dans cet essai les pertes dans le fer sont donc négligeables puisque elle dépend de la tension et de la puissance absorbée qui représente pratiquement les pertes par effet joule.

la figure III.5 montre l'expérience effectuée et le montage réalisé au laboratoire.[19]



**Figure III.5:** Montage de l'essai en court-circuit d'un transformateur monophasé.



Le tableau suivant représente les résultats de mesure, pour l'essai court-circuit

**Tableau III.2 :** Résultats du l'essai court-circuit.

	$V_{1cc}(V)$	$I_{1cc}(A)$	$P_{1cc}(W)$	$I_{2cc}(A)$
Essai court-circuit	22	9.1	87	80

### Calcule la résistance $R_1$ et $R_2$

$R_{eq1}$  la résistance équivalente du primaire.

$$\text{On a: } P_{1cc} = R_{eq1} * (I_{1cc})^2 \quad (\text{III.7})$$

$$\text{Alors: } R_{eq1} = \frac{P_{1cc}}{(I_{1cc})^2} \quad (\text{III.8})$$

$$R_{eq1} = 3,48 \Omega$$

En pratique, la résistance et la réactance de primaire égale à celles du secondaire ramenée au primaire ou bien le contraire, donc pour l'obtention de ces deux paramètres on peut utiliser la méthode suivante :

$$R_1 = \frac{R_{eq1}}{2} = \frac{3,48}{2} = 1,74 \Omega \quad (\text{III.9})$$

$$m = \frac{V_{20}}{V_1} = \frac{25}{220} = 0,11 \quad (\text{III.10})$$

$$\text{Et : } \frac{R_2}{m^2} = \frac{R_{eq1}}{2} \quad (\text{III.11})$$

$$\text{Alors : } R_2 = m^2 * R_1 \quad (\text{III.12})$$

$$R_2 = (0,11364)^2 * 1,74 = 0,02246 \Omega$$

### Calcule les réactances $X_1$ et $X_2$

On a :

$$V_{1cc} = Z_{eq1} * I_{1cc} \quad (\text{III.13})$$

Donc :

$$Z_{eq1} = \frac{V_{1cc}}{I_{1cc}} \quad (\text{III.14})$$

$$Z_{eq1} = \frac{22}{9,1} = 2.41 \Omega \quad (\text{III.15})$$

la réactance équivalente au primaire :

$$X_{eq1} = \sqrt{(Z_{eq1})^2 - (R_{eq1})^2} \quad (\text{III.16})$$

$$X_{eq1} = 2,69248 \Omega$$

Par la même méthode appliquée pour obtenir les résistances on peut introduire les réactances primaire et secondaire

$$X_1 = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.17})$$

$$X_1 = \frac{2,69248}{2} = 1,34624 \Omega$$

$$\text{Et : } \frac{X_2}{m^2} = \frac{X_{eq1}}{2} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{Alors : } X_2 = m^2 * X_1 \quad (\text{III.19})$$

$$X_2 = (0,11364)^2 * 1,34624 = 0,0178 \Omega$$

### III.6. Saturation des branches magnétisantes

La caractéristique  $v = f(i_r)$  et la conversion en valeurs de flux-courant pour la caractéristique de saturation  $\lambda = f(i_l)$  sont effectuées en utilisant la méthode proposée dans[19]. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau III.3.**Caractéristiques calculées en valeurs.

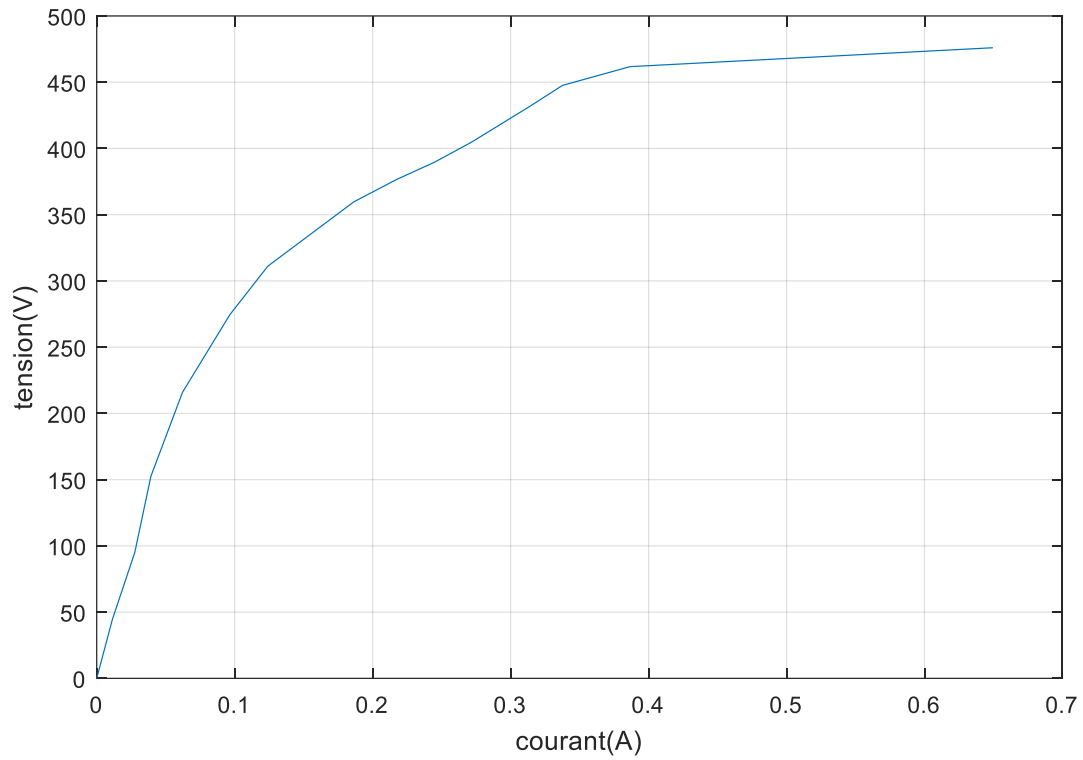
$V_{max}$ (V)	$i_r$ (A)	$\lambda$ (V.s)	$i_l$ (A)
0	0	0	0
14.001	0.0036	0.0446	0.0061
44.2649	0.0113	0.1409	0.0139
95.0352	0.0276	0.3025	0.0237
152.596	0.0393	0.4857	0.045
215.954	0.0622	0.6874	0.1271
274.4989	0.0965	0.8738	0.4319
311.127	0.124	0.9903	0.7668
359.6345	0.1863	1.0156	0.8384

376.3222	0.2169	1.1448	1.4873
389.7573	0.2451	1.1979	1.7384
404.7479	0.2717	1.2406	2.0274
431.7594	0.3139	1.2884	2.3863
447.5986	0.3376	1.3343	2.947
461.7407	0.3866	1.3743	3.6569
476.0243	0.6496	1.4248	5.0491
		1.4698	8.9502
		1.5152	20.7086

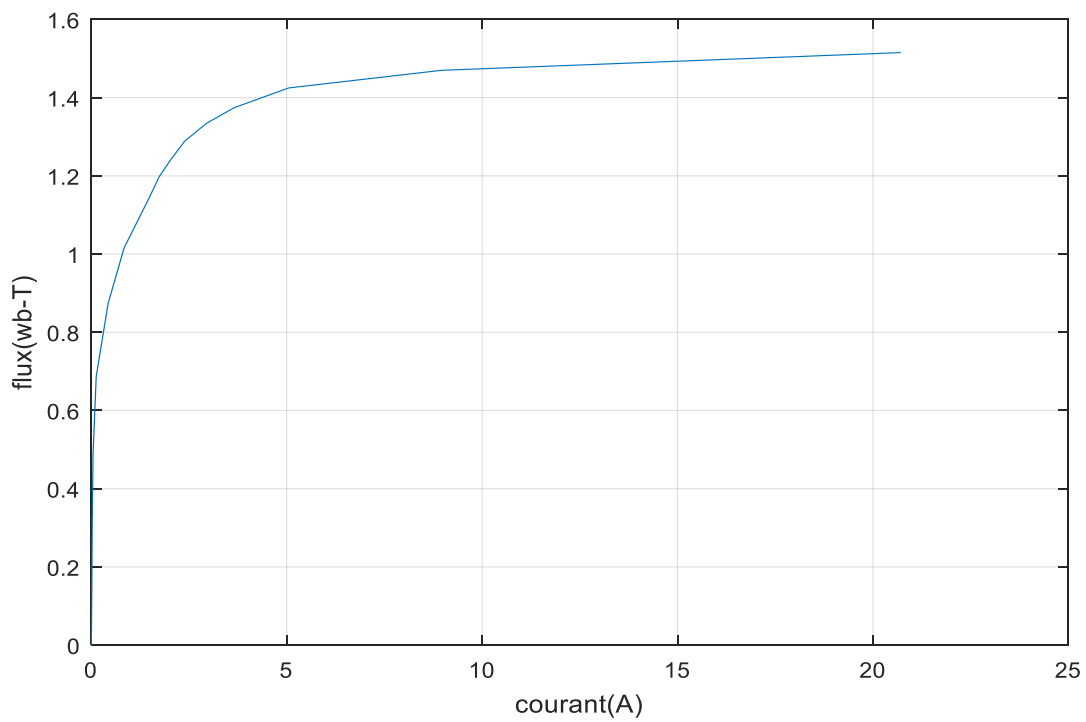
les résultats du tableau III.3. Seront représentées sous forme de courbes.

La figure III.6 représente la variation de tension  $V_{max}$  en fonction du courant actif  $i_r$  qui passe à travers la résistance de la branche magnétisante  $R_m$ . Cette courbe  $v = f(i_r)$  représente la résistance non linéaire du modèle de la branche magnétisante.

D'autre part, la figure III.7 représente la variation du flux de liaison magnétique  $\lambda$  en fonction de courant électrique  $i_l$  qui traverse la bobine. Cette courbe  $\lambda = f(i_l)$  représente l'inductance non linéaire du modèle de la branche magnétisante.



**Figure III.6** Courbe de la résistance non linéaire  $v = f(i_r)$ .



**Figure III.7** Courbe de saturation  $\lambda = f(i_l)$ .

### III.7.Implantation du modèle élaboré dans ATPDraw

Nous avons implanté notre modèle élaboré dans un circuit électrique pour observer le comportement du transformateur pour les deux cas.

Remarque : Les valeurs de courant obtenue de la simulation sont des valeurs max.

#### III.7.1.Premiere cas : Transformateur à vide

Le but est de visualiser le courant d'appel à vide et la forme d'onde du courant en régime transitoire et aussi le régime permanent.

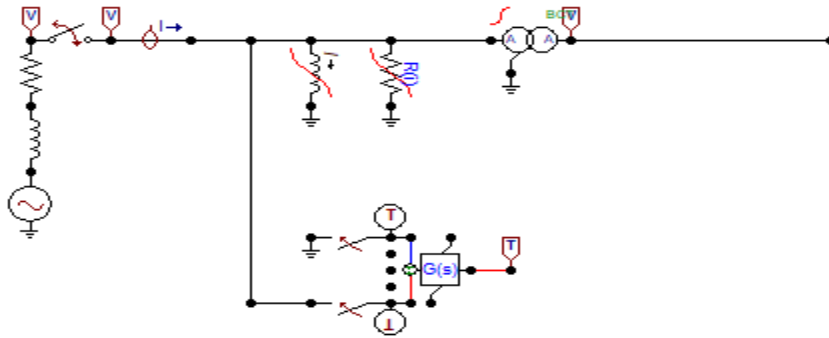


Figure III.8 Représentation du transformateur à vide sur ATP-EMTP .

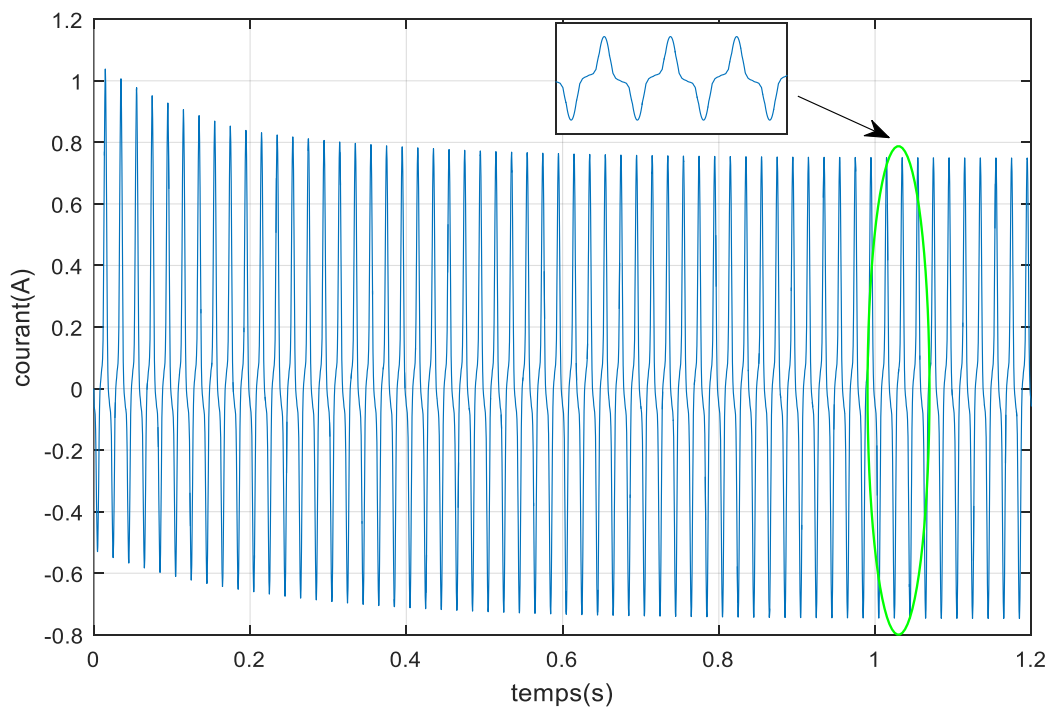
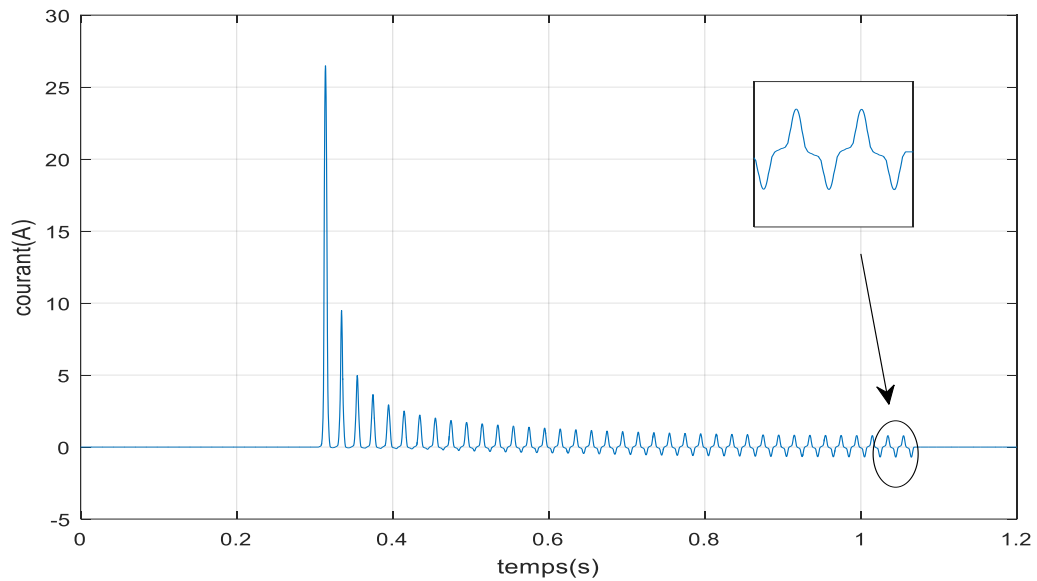


Figure III.9 Régime permanent à vide.



**Figure III.10.**Régime transitoire à vide.

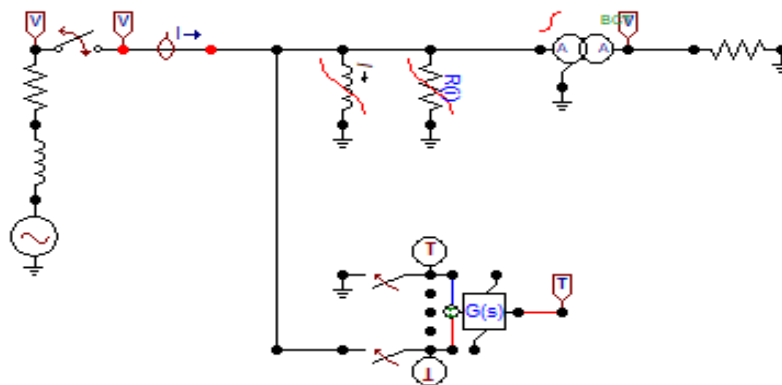
On remarque que le courant dans régime transitoire est très grand par rapport au régime permanent .Ces simulations montrent le caractère non sinusoïdal des courants pendant le régime transitoire et aussi le régime permanent à vide du fait de l'existence d'harmoniques, qui sont le résultat du comportement non linéaire du circuit magnétique du transformateur.

### III.7.2.Deuxième cas : transformateur en charge

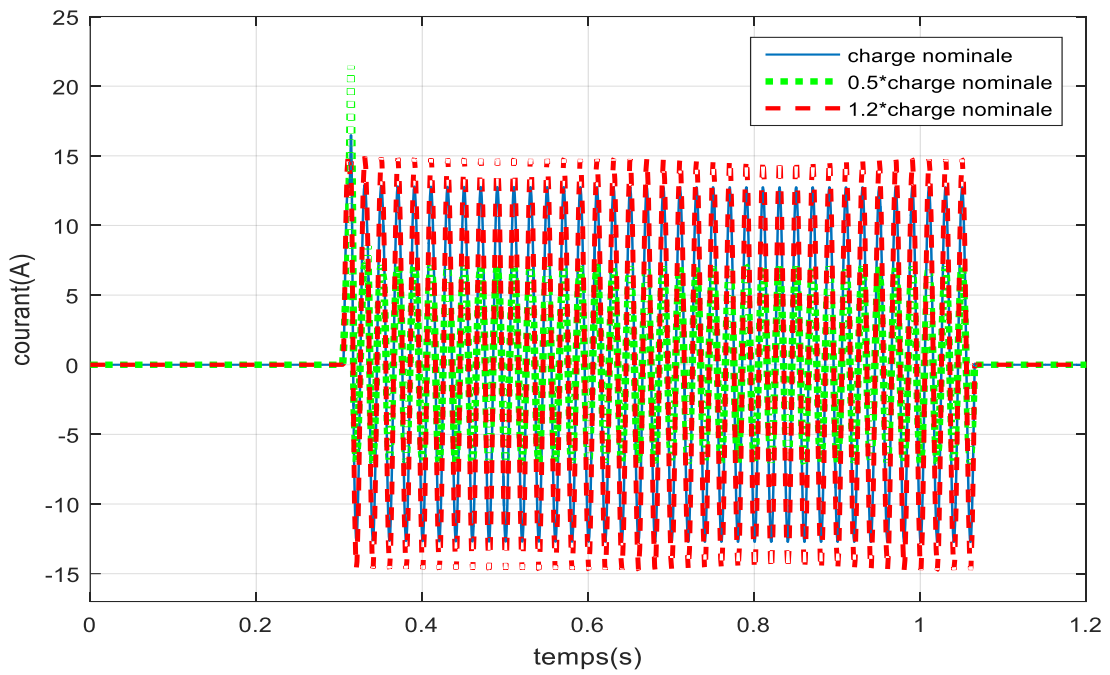
Le but est d'appliqué différents charge avec différents valeurs pour observer l'influence de cette variation sur le régime transitoire de transformateur.

#### III.7.2.1.Une charge purement résistive

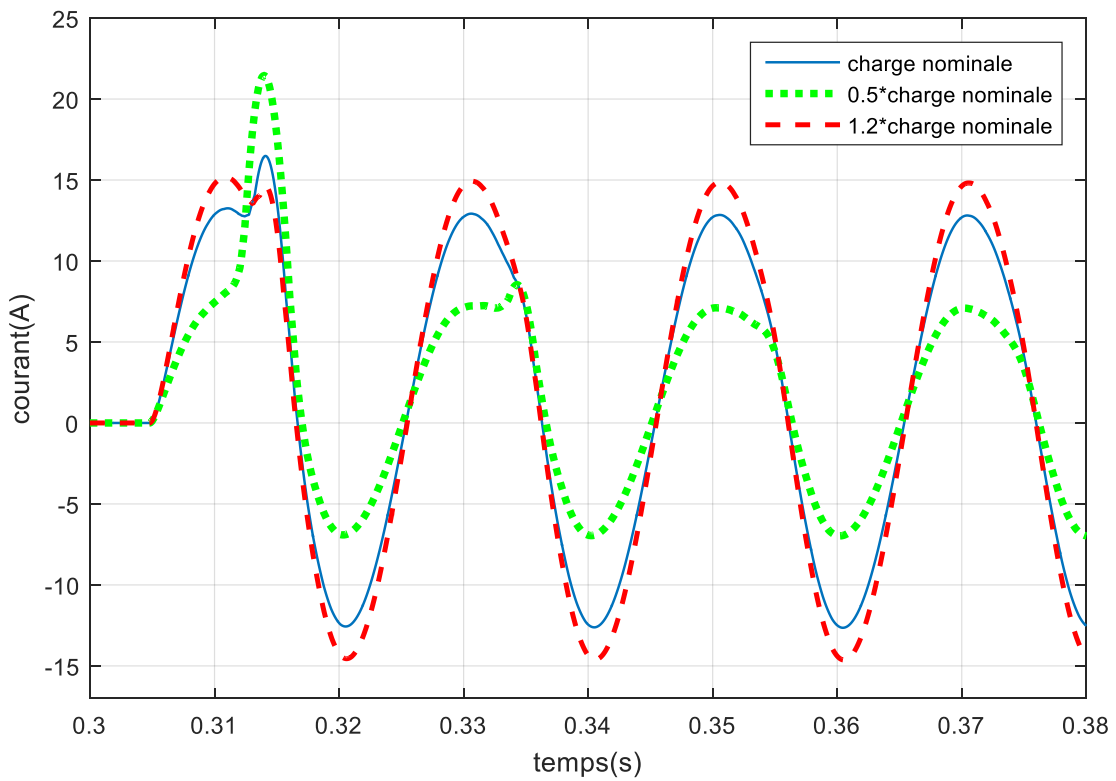
La simulation a été effectuée avec 3 valeur de charge pour un  $\cos\varphi = 1$



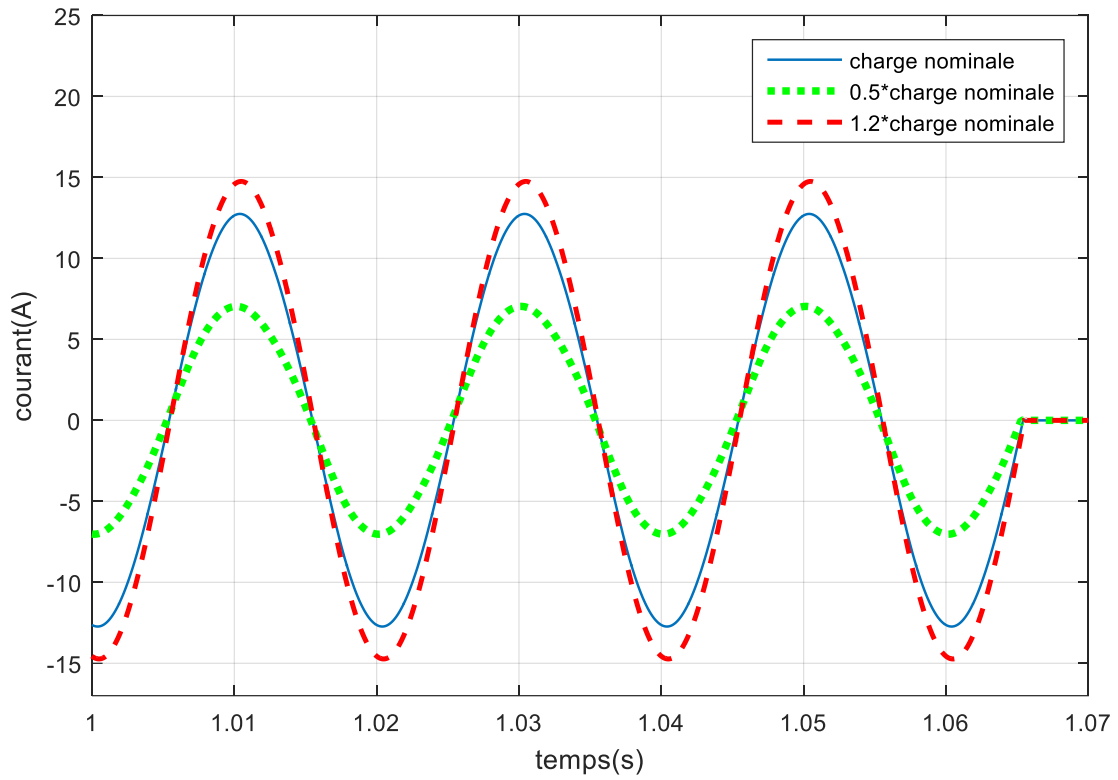
**Figure III.11** Transformateur avec une charge résistive.



(a)



(b)



(c)

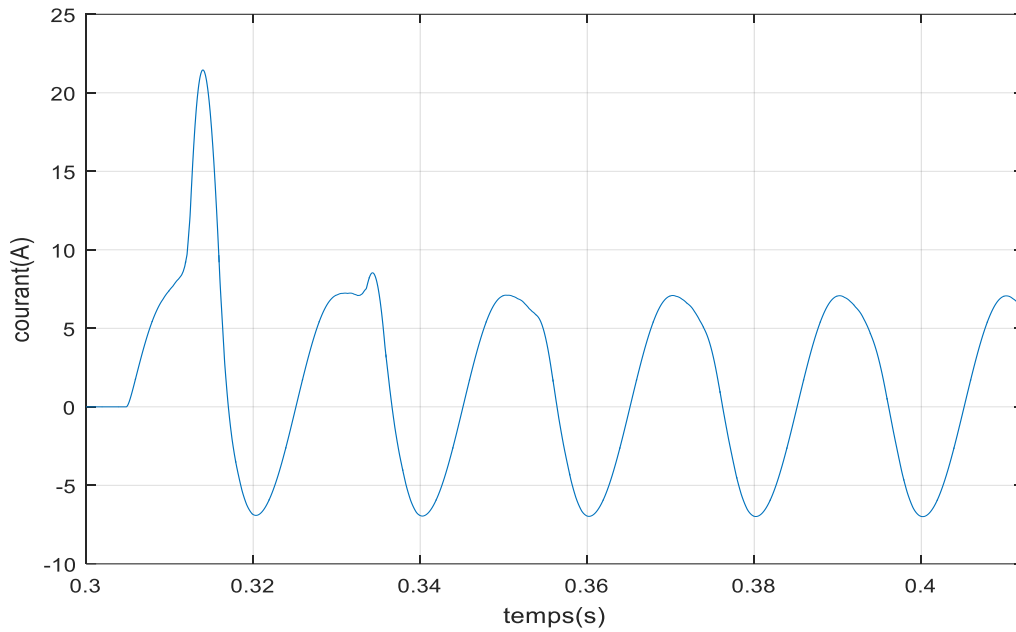
**Figure III.12 .** Courant primaire avec une charge résistive.

(a) Forme d'onde du courant primaire avec une charge résistive

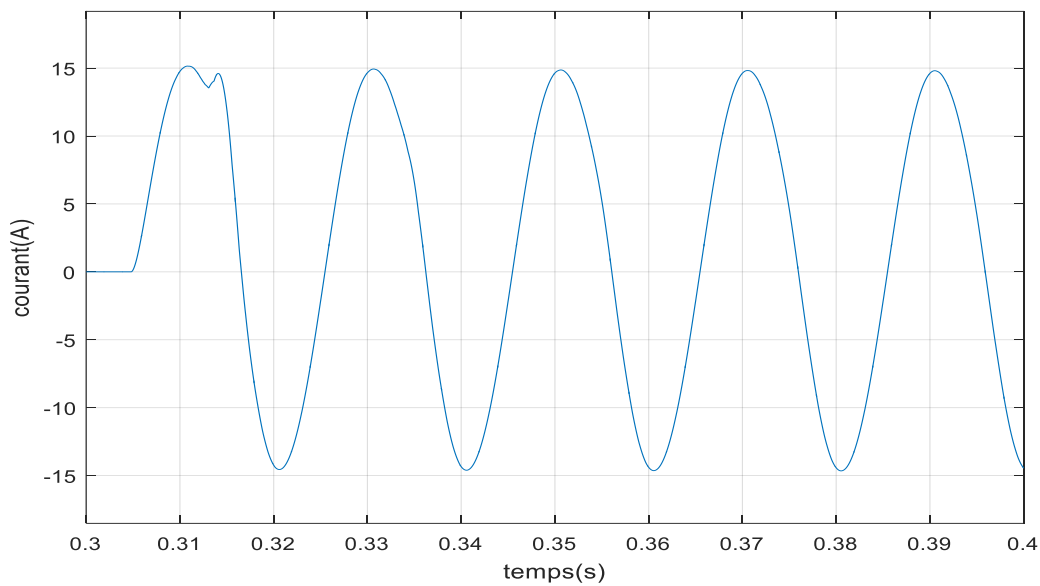
(b) Zoom sur le régime transitoire.

(c) Zoom sur le régime permanent .





**Figure III.13** Forme d'ondes du courant avec 50% la charge nominale charge résistive .



**Figure III.14** Forme d'ondes du courant avec 120% la charge R nominale charge résistive.

La figure III.12(a, b, c) montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge résistive avec différentes valeurs (la charge nominale est multipliée par 0.5 et 1.2).

Les valeurs du courant sont comme suit :

- La charge nominale est multipliée par 0.5 : le pic de courant dans régime transitoire égal à 21.45(A) et 7.037 (A) dans le régime permanent.
- La charge nominale: le pic de courant dans régime transitoire égal à 16.48 (A). Et 12.73 (A) dans le régime permanent.

- La charge nominale est multipliée par 1.2 : le pic de courant dans régime transitoire égal à 15.14 (A) et 14.74 (A) dans le régime permanent.

### III.7.2.2. Une charge RL

La simulation a été effectuée avec 3 valeur de charge pour un  $\cos\varphi = 0.8$

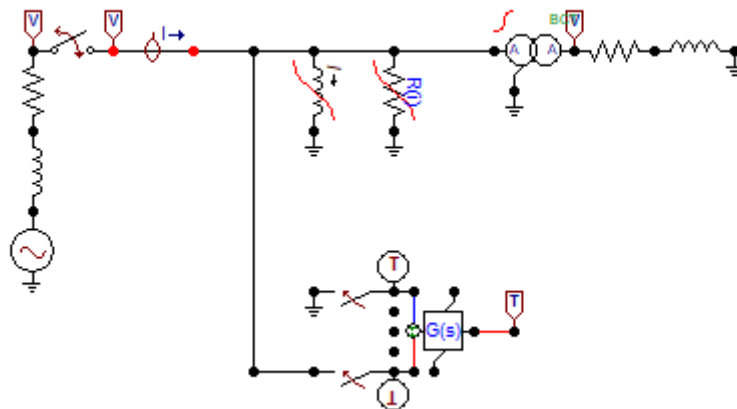
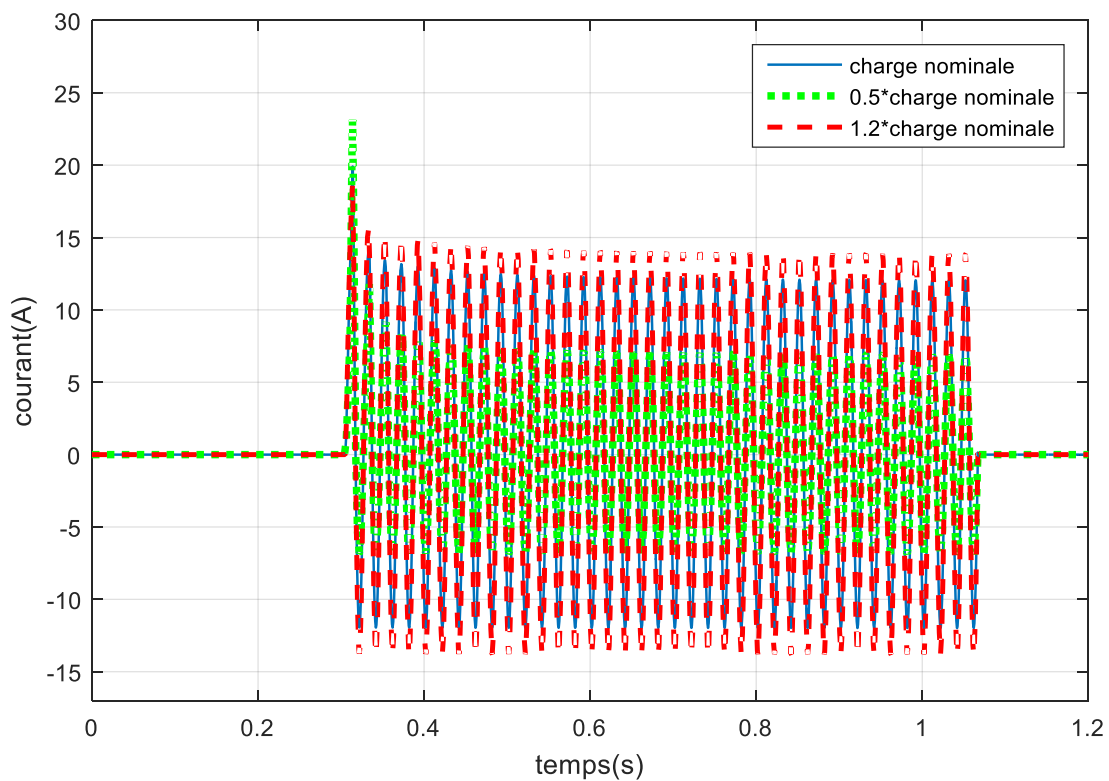
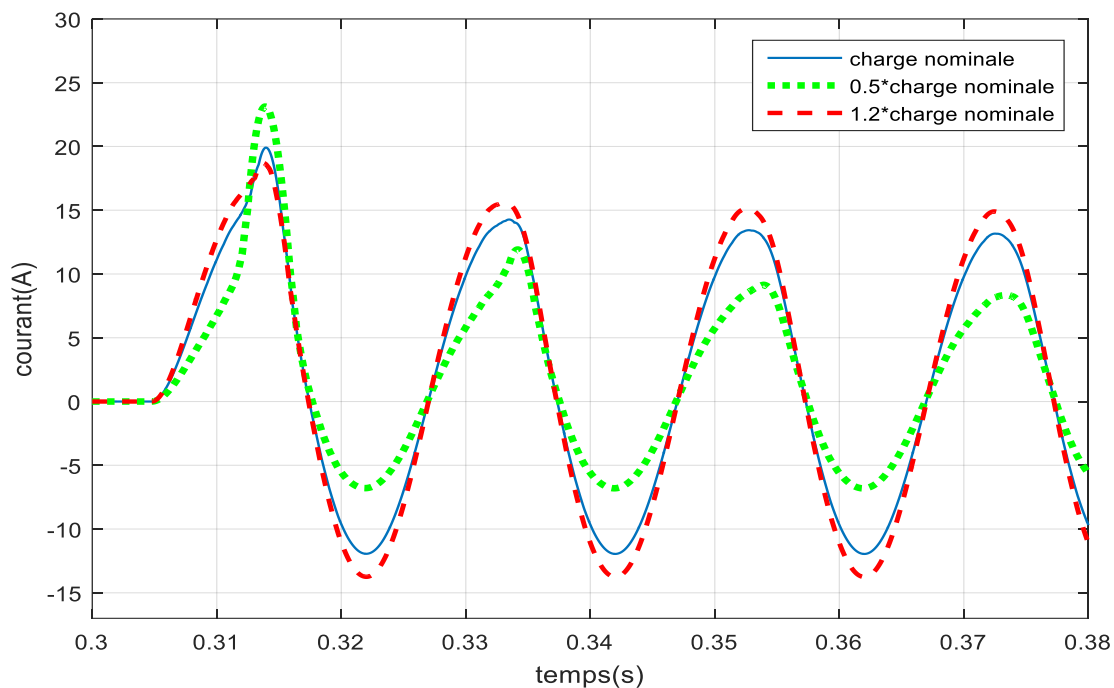


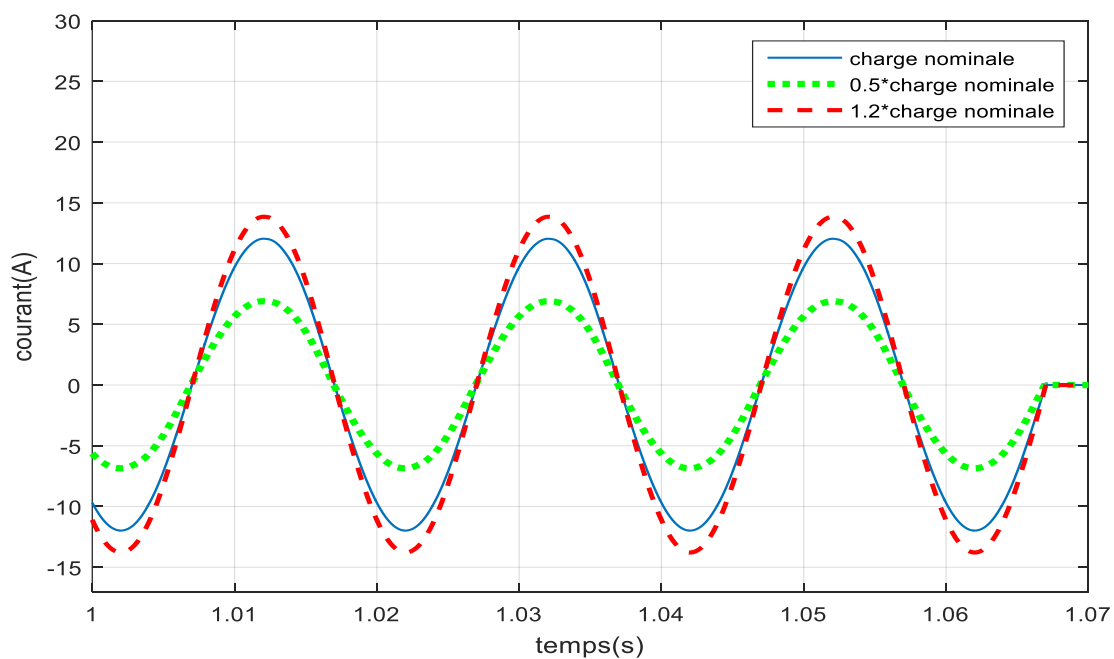
Figure III.15 Transformateur avec une charge RL.



(a)



(b)



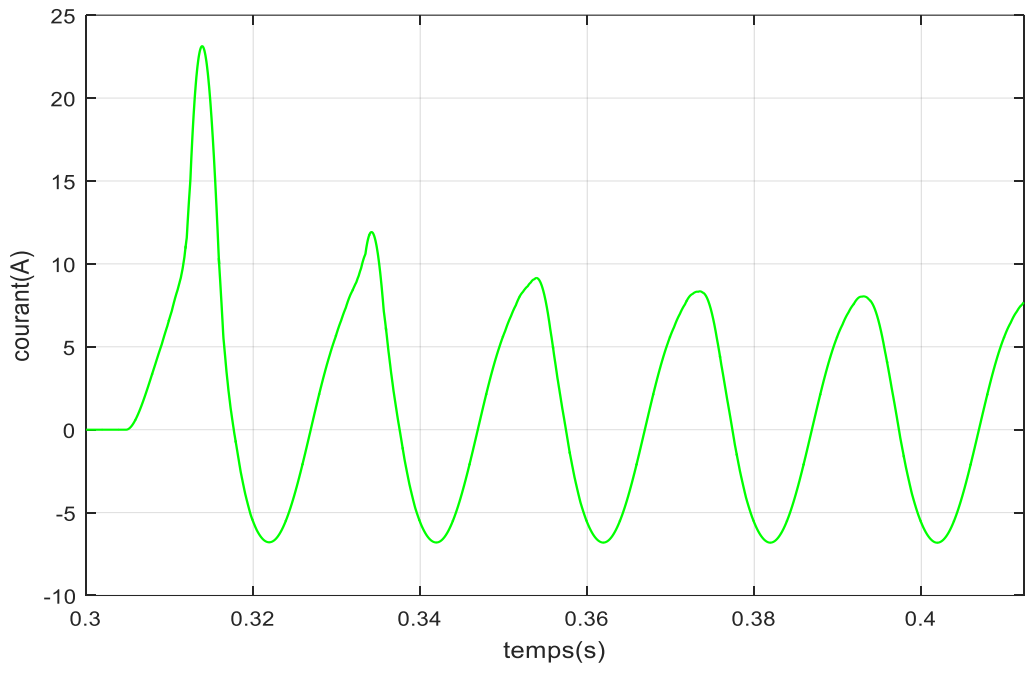
(c)

**Figure III.16** Courant primaire avec une charge RL.

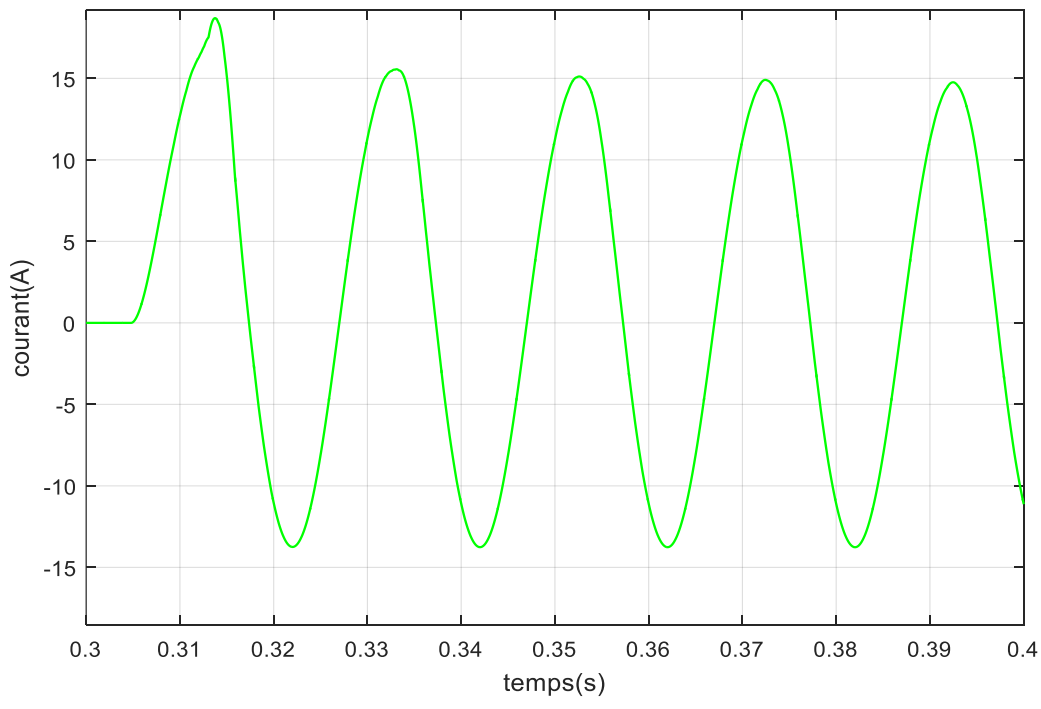
(a) Forme d'onde du courant primaire avec une charge RL.

(b) Zoom sur le régime transitoire.

(c) Zoom sur le régime permanent.



**Figure III.17** Forme d'ondes du courant avec 50% la charge RL nominale.



**Figure III.18.** Forme d'ondes du courant avec 120% la charge RL nominale.

La figure III.16(a.b.c.) montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge RL avec différents valeurs (la charge nominale est multiplié par 0.5, et 1.2).Les valeur du courant son comme suit :

- la charge nominale est multipliée par 0.5 : le pic de courant dans régime transitoire égal a 23.13 (A) et 6.82 (A) dans le régime permanent
- la charge nominale: le pic de courant dans régime transitoire égal a 19.9 (A). Et 12.04 A) dans le régime permanent
- la charge nominale est multipliée par 1.2 : le pic de courant dans régime transitoire égal a 18.7 (A) et 14.74 (A) dans le régime permanent

### III.7.2.3.Une charge RLC

La simulation a été effectuée avec 3 valeur de charge pour un  $\cos\varphi = 0.8$

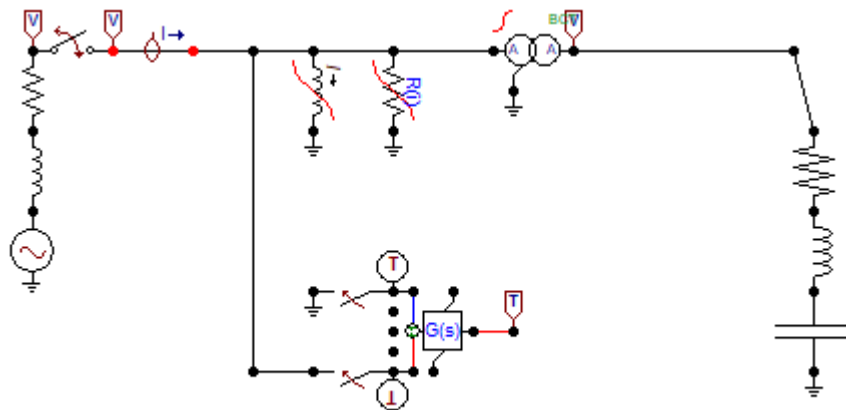
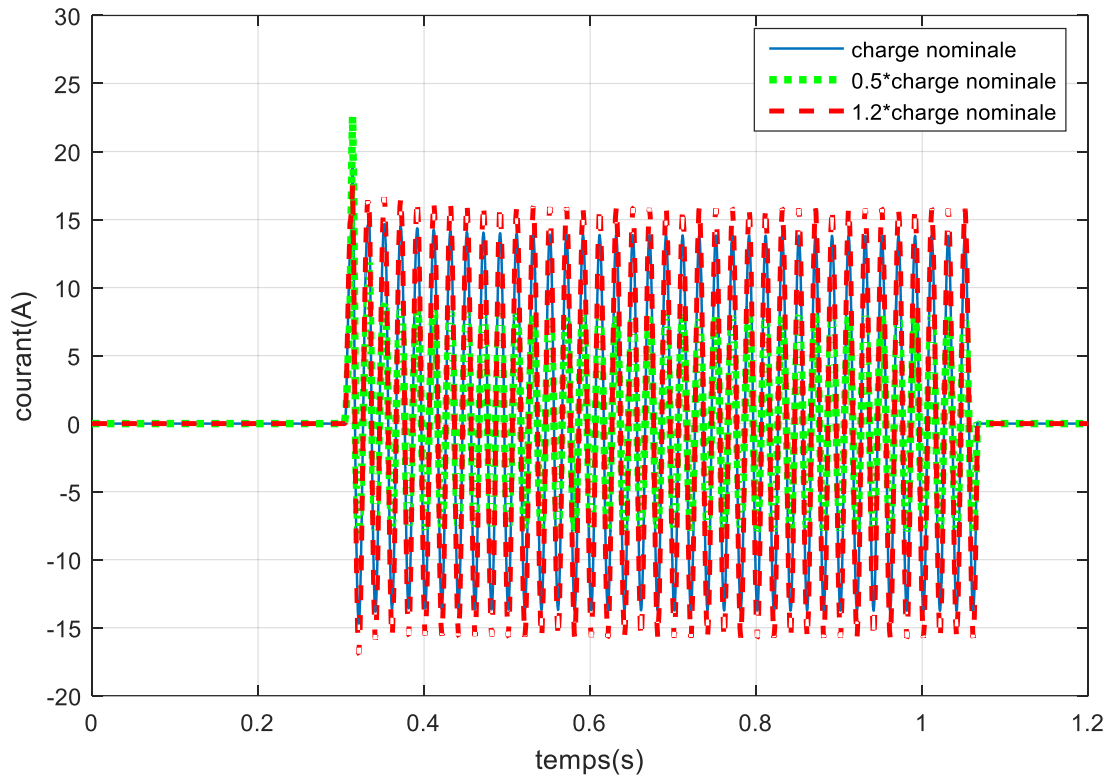
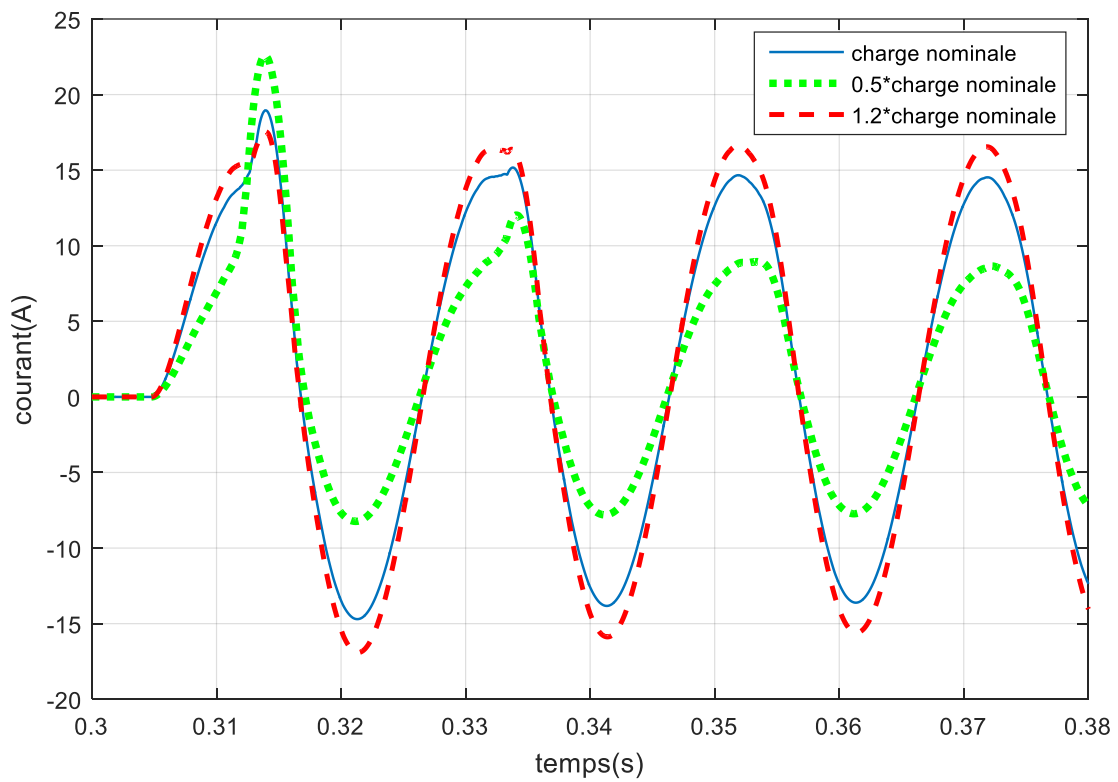


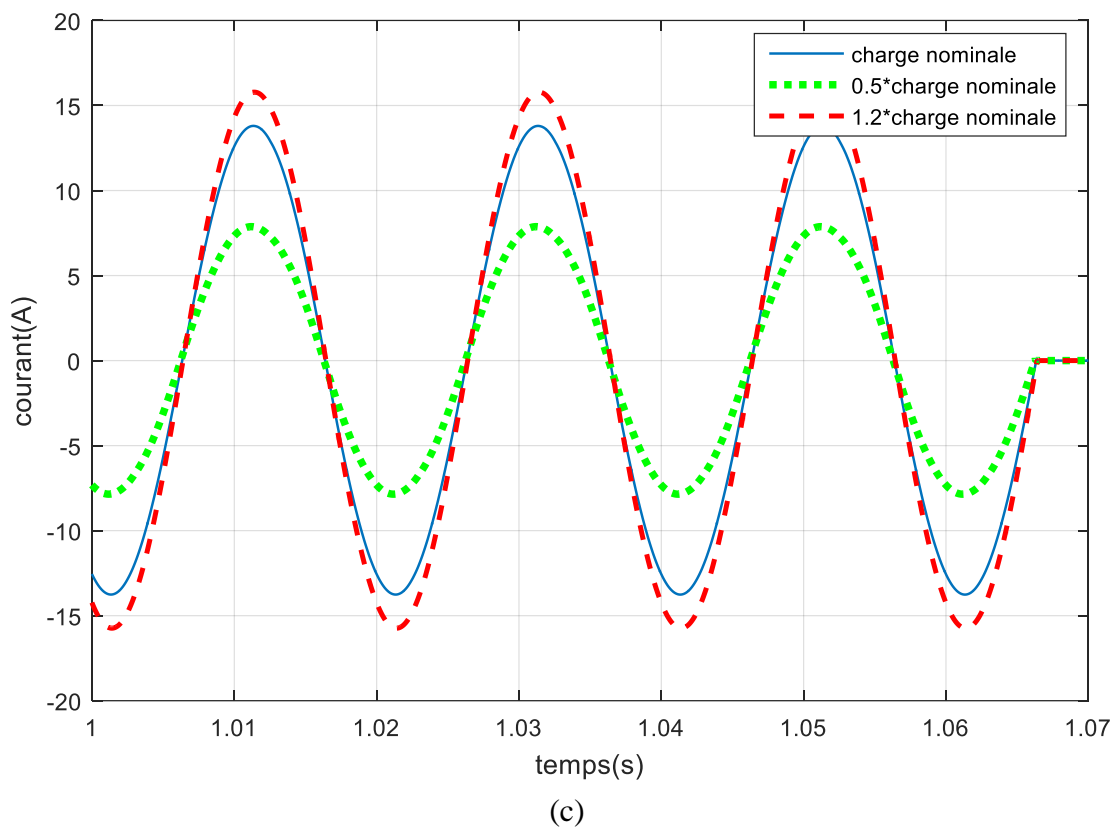
Figure III.19 Transformateur avec une charge RLC.



(a)



(b)

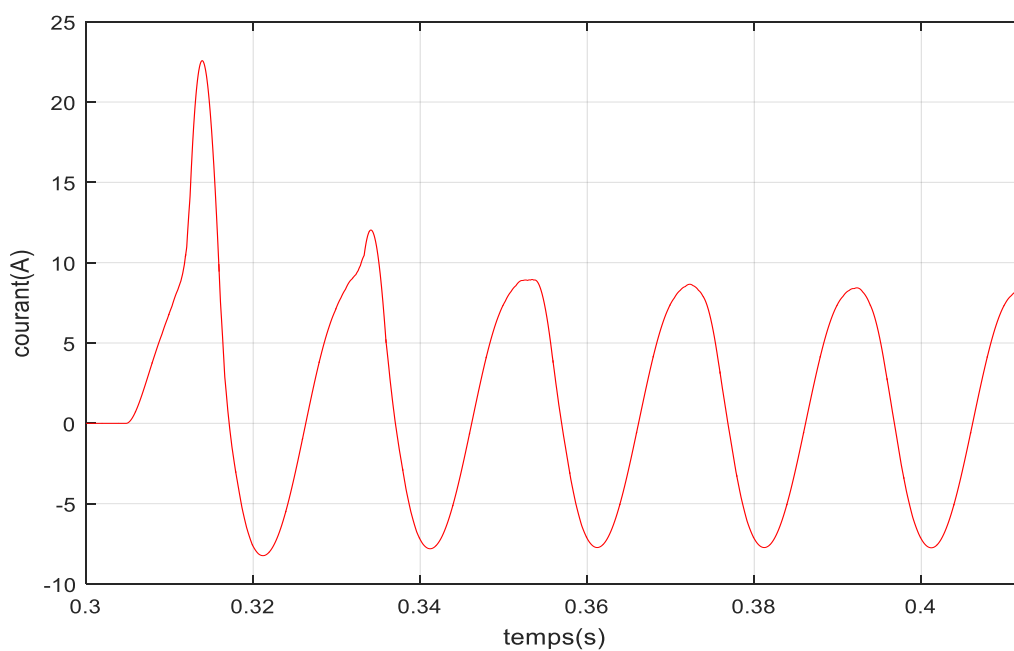


**Figure III.20.** Courant avec une charge RLC.

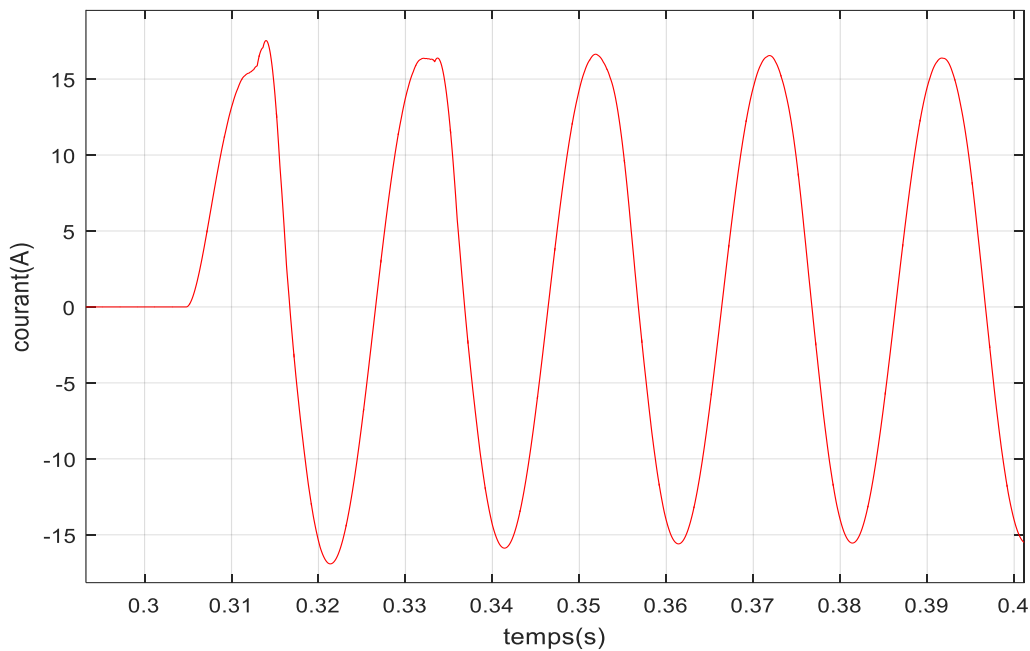
(a) Forme d'onde du courant primaire avec une charge RLC.

(b) Zoom sur le régime transitoire.

(c) Zoom sur le régime permanent.



**Figure III.21** Forme d'ondes du courant avec 50% la charge RLC nominale.



**Figure III.22** Forme d'ondes du courant avec 120% la charge RLC nominale.

La figure III.20 (a,b,c) montre une comparaison entre les formes d'ondes et les valeurs de courant dans le régime transitoire et le régime permanent après l'application d'une charge RLC avec différents valeurs (la charge nominal est multiplié par 0.5 et 1.2).

Les valeurs du courant sont comme suit :

- La charge nominale est multipliée par 0.5 : le pic de courant dans régime transitoire égal à 22.57(A) et 7.9 (A) dans le régime permanent.
- La charge nominale: le pic de courant dans régime transitoire égal à 18.4(A). Et 13.8 (A) dans le régime permanent.
- La charge nominale est multipliée par 1.2 : le pic de courant dans régime transitoire égal à 17.5 (A) et 15.79(A) dans le régime permanent.

Les figures ( III.13, III.17 et III.21) représentent les formes d'ondes des courants lorsque le transformateur alimente des charges atteignent 50% de la charge nominale, avec différents type de charge. Ces figures montrent que l'alimentation de transformateur faiblement chargé provoque des régimes transitoires proches à celle de transformateur à vide.

D'autre part. Les figures (III.14 ,III.18 et III.22) représentent les formes d'ondes des courants lorsque le transformateur alimente des charges atteignent 120% de la charge nominale, avec différents type de charge. Ces figures montrent que l'alimentation de transformateur avec des grandes charges provoque des faibles régimes transitoires.



Après l'application de différents types de charge à différentes valeurs. On remarque que à chaque fois qu'on augmente la valeur de la charge le régime transitoire diminue. Par contre dans le régime permanent la valeur du courant est proportionnelle à la valeur de charge.

Dans le cas où le transformateur est à vide la forme d'onde du courant n'était pas sinusoïdale. Par contre la mise en charge de transformateur rétablit la forme d'onde sinusoïdale du courant dans le régime permanent

Ces simulations montrent que la mise en charge de transformateur diminue les amplitudes du courant dans le régime transitoire. C'est-à-dire ces régimes transitoires sont fréquemment présents et avec des grandes amplitudes dans les transformateurs à vide ou bien faiblement chargés.

### **III.8.Conclusion**

Le transformateur de puissance peut être fonctionné de plusieurs manières, à vide, chargé avec différentes valeurs. Ces modes de charge influent sur le régime transitoire de transformateur. Dans l'objectif de mieux comprendre cette influence, une simulation a été effectuée sur un modèle transformateur BCTRAN par l'ATPdraw. Les résultats de ces simulations montrent que :

La mise sous tension du transformateur à vide provoque des transitoires à grandes amplitudes, avec l'effet de comportement non linéaire de circuit magnétique sur la forme d'onde du courant qui apparaît dans ce mode de fonctionnement.

À chaque fois qu'on augmente la valeur de la charge le régime transitoire diminue, et aussi l'application de la charge rétablit la forme d'onde sinusoïdale du courant dans le régime permanent. Les régimes transitoires dans les transformateurs sont fréquemment présents dans les deux cas suivants :

- dans les transformateurs à vide
- dans les transformateurs faiblement chargés.

## Conclusion Générale

Un transformateur est un dispositif d'induction électromagnétique statique conçu pour convertir un nombre variable de systèmes en un autre système avec généralement des courants et des tensions différents mais la même fréquence.

En raison du fonctionnement du disjoncteur, le transformateur de puissance peut subir des transitoires. La fermeture du disjoncteur sur le transformateur à vide génère des courants avec des valeurs élevées, appelées "courants d'appel". La raison principale de ces courants est le flux rémanent qui existe généralement dans le noyau de fer, et la saturation du noyau de fer lorsque le transformateur de puissance est éteint. Ces courants peuvent provoquer des contraintes électriques et mécaniques importantes dans le transformateur.

Le courant d'appel causé par les manœuvres des disjoncteurs provoque une dégradation de la longue durée de vie des transformateurs de puissance. Il apparaît sous certaines conditions, et il provient de la saturation du transformateur de puissance provoquée par la variation de la tension magnétisante, aussi de la valeur de flux rémanent existant dans le circuit magnétique.

Plusieurs facteurs qui influencent sur l'amplitude et la durée de courant d'appel sont : le point sur l'onde de la tension à l'instant de la mise sous tension, l'amplitude et la polarité du flux rémanent, la capacité de transport de flux maximale du matériau de noyau.

Il n'y a aucune preuve directe que la mise sous tension d'un transformateur peut provoquer une panne immédiate, mais l'influence de courant d'appel sur le fonctionnement du transformateur est sur le long terme.

Ce travail est basé sur l'étude de l'influence de la charge sur le régime transitoire d'un transformateur, après la détermination des paramètres de ce transformateur, nous avons choisi le logiciel de simulation ATP-EMTP pour élaborer ces paramètres dans un modèle du transformateur 'BCTRAN'. Une simulation a été effectuée sur un transformateur monophasé de puissance de 2 KVA pour observer le régime transitoire de ce transformateur en deux modes de fonctionnement qui sont le fonctionnement à vide et en charge.

Ces simulations montrent que la mise sous tension de transformateur à vide provoque des transitoires à grandes amplitudes, avec un courant de forme d'onde non sinusoïdale, ce dernier est causé par l'effet de la non linéarité du circuit magnétique du transformateur.

La simulation de transformateur en charge nous a montré que l'insertion de la charge de façon progressive diminue le régime transitoire et aussi rétablit la forme d'onde sinusoïdale du courant dans le régime permanent.

---

A la fin on constat que le régime transitoire est fréquemment présents dans les transformateur à vide ou bien faiblement chargé.

Donc pour assurez une bonne fiabilité de transformateur ,avec une longue duré de vie il est déconseillé de fonctionné le transformateur à vide, ou bien avec des faibles charge.

Cette étude peut être complétée par les perspectives suivantes :

- Application de cette étude dans laboratoire, et comparer les résultats de simulation avec les résultats expérimentales.
- Généraliser l'étude sur les transformateurs de grande puissance.

## Références bibliographiques

- [01] Robert M.DelVecchio, Bertrand Poulin, Pierre T.Feghali, DilipkumarM.Shah, Rajendra Ahuja "Transformer design principles", 2e édition,CRC PRESS, Boca Raton London New York Washington, p-596, D.C, 2002.
- [02] C.Khelifi, H.Dadi, "Etude de réduction de courant d'appel dans les transformateurs par une manœuvre contrôlée", thèse de Master, Université de AKLI MOHAND OULHADJ de Bouira, Algérie, 2017.
- [03] PAUL C . Y. LING, AMITAVA BASAK, "Investigation of Magnetizing Inrush Current in a Single-phase Transformer", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Transactions on Magnetics, VOL 24, NO 6, pp 3217-3222 Novembre1988.
- [04] N. MEZARI , " Diagnostic des transformateurs de puissances ", Thèse de magister, Université de MOULOUD MAMMERI de TiziOuzou, Algérie, Juillet 2011.
- [05] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_%C3%A9lectrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_%C3%A9lectrique) Consulter le 07/09/2021.
- [06] A.Lounis, L.Seggar,"Impact de changement de l'épaisseur de la tôle magnétique sur le dimensionnement d'un transformateur triphasé 630 KV-30KV/400V", thèse de Master professionnel, Université de MOULOUD MAMMERI de TiziOuzou, Algérie, 2012-2013.
- [07] O. AMRANI, "Etude des surtensions impulsionnelles dans les enroulements de réglage des transformateurs et autotransformateurs", Thèse de magister, Université de MOULOUD MAMMERI de TiziOuzou, Algérie,2009.
- [08] S. Larabi, DJ. Moussaoui, "Modélisation dynamique d'un transformateur", Thèse de Master, Université de MOULOUD MAMMERI de TiziOuzou, Algérie, 2011/2012.
- [09] F.Metalbi, H.Bouhallab, " Diagnostic et localisation des défauts dans les enroulements du transformateur ", thèse de Master, université de SAAD DAHLAB de Blida, Algérie, 2011-2012.
- [10] Yves Quiquempois, "Transformateur monophasé", Service Enseignement et Multi Media (SEMM) Université de Lille1.

- [11] N. DJELLAOUI, H.OUAHAB, "Etude du courant d'appel sympathique dans les réseaux électriques (transformateurs en parallèles) ", Thèse de master, Université AKLI MOHAND OULHADJ ,Bouira,Algerie.
- [12] T. LIU, " Manoeuvre contrôlée des transformateurs de puissance avec flux rémanent ", Thèse de doctorat, L'École supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette, France, 2011.
- [13] A.CHELALI, " Génération d'harmoniques par transformateur de puissance sous condition de saturation ", Thèse de master, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie,2015.
- [14] A. RAKOTOMALALA, " Contribution a la modélisation des transformateurs de puissance en régimes hautes fréquences ", Thèse de doctorat, L'ECOLE CENTRALE DE LYON, France, 1996.
- [15] E.BENHARKOU, " Calculs des paramètres physique par une efficacité énergétique optimisée d'un transformateur électrique ", Thèse de master, Université ABOU BACKR BEL KAID, Tlemcen, Algérie, 2018.
- [16] N. Meddour, " Etude et diagnostic du transformateur de puissance Pendant les défauts de court circuit internes ", Thèse de master, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2012.
- [17] <https://www.energy-online.fr/news/ca-est-quoi-un-transformateur-da-isolementa117.html>, Consulter le 04/08/2021.
- [18] <https://illustrationprize.com/fr/686-transformer-on-no-load-condition.html>, Consulter le 28/08/2021.
- [19] A.YAHIOU, " Contribution to study and simulation of transients in power transformers", Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2021.
- [20] Gabriel Cormie, "Circuits Magnétiques et Inductance", Chapitre 7, GEN1153.
- [21] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/transformateurs-d-energie-electrique/4transformateur-reel/>, consulter le 15/08/2021.
- [22] Gabriel Cormie, " Transformateur ", Chapitre 8, GEN1153.

- [23] S.Rahal, F.Gouadma, " Effets des harmoniques sur les transformateurs de puissance en régime transitoire et sous protection numérique ", Thèse de master, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2012.
- [24] <https://illustrationprize.com/fr/683-transformer-inrush-current.html>, consulter le 20/08/2021
- [25] L.François, "Développement de l'analyse quantitative de texture utilisant des détecteurs bidimensionnels : application à la texture magnétique", Thèse de doctorat, Université de Caen, Normandie, France, 2009.
- [26] N.Nahouli, " Etude et Réalisation d'un hystérésis-graphed'un système de mesure du cycle 'hystérésis ", Thèse de master, Université Libanaise, institut des sciences appliquées et économiques, Liban, 2014.
- [27] D.CAVALLERA, "Contribution au renvoi de tension et à la reconstitution du réseau, Identification des paramètres d'un réseau, Estimation des flux rémanents dans un transformateur ", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, France, 2011.
- [28] L. F. Blume, " *Transformer engineering : a treatise on the theory, operation, and application of transformers*", 2nd ed. New York, N.Y.: John Wiley and Sons, Inc., 1951.
- [29] M. Jamali, M. Mirzaie, S. AsgharGholamian, "Calculation and Analysis of Transformer Inrush Current Based on Parameters of Transformer and Operating Conditions", Department of Electrical and Computer Engineering, Babol University of Technology, P. O. Box. 484, Shariaty Ave., Babol, Iran, 2011.
- [30] Michael Steurer, Member IEEE, KlausFröhlich, Senior Member, "The Impact of Inrush Currents on the Mechanical Stress of High Voltage Power Transformer Coils", Institute of Electrical and Electronics Engineers, Transactions on Power Delivery, VOL. 17, NO. 1, January 2002.
- [31] A.YAHIOU, " Contribution à l'étude et à l'analyse du régime transitoire dans les transformateurs de puissance : Cas du courant d'appel", Thèse de magister, Université FERHAT ABBAS, Sétif, Algérie, 2012.
- [32] Bienvenido Rodriguez, Medina et Marianela Santiago-Luna, "ATP/EMTP Quick Guide", l'Université de Porto Rico-Mayagüez avec le Center for Power Electronics Systems(CPES), p34, June 18,2002.

