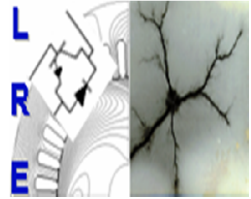




Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Mémoire de  
**Master en Electrotechnique**

Présenté par  
**DJEBLI Abdelmalek**

Intitulé

**Ferrorésonance dans le cas des  
transformateurs triphasés type  
CORE**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

**Membres du Jury d'examen**

Président	A. Mekhaldi	Professeur à l'ENP
Rapporteur	O. Touhami	Professeur à l'ENP
	F. Aboura	Doctorant à l'ENP
Examineurs	A. Boubakeur	Professeur à l'ENP
	MO. Mahmoudi	Professeur à l'ENP

**ENP 2015**

## ملخص

الهدف من هذا البحث هو القيام بدراسة تجريبية على ظاهرة الرنين المغناطيسي غير الخطي، مستعملين في هذه الدراسة محول كهربائي ثلاثي الأوجه، وقد تم استعمال نموذج " Tellinen " من اجل محاكاة المحول الكهربائي، وقد تمت كتابة النموذج بواسطة برنامج " Matlab/Simulink " المقارنة التي اجرية بين الإشارات التجريبية والمحاكاة تظهر صحة النموذج المستعمل.

**كلمات مفتاحية** الرنين غير الخطي، منحى المغناطيسية، المحول الكهربائي، Matlab/Simulink

## Résumé :

Le but de ce mémoire de master est de faire une étude expérimentale de la ferrosésonance sur un transformateur triphasé du type Core, avec une simulation numérique par un modèle électromagnétique qui a été élaboré basant sur le modèle d'hystérésis de Tellinen et tenant compte des interactions magnétiques entre les flux générés par les trois phases, ainsi que les pertes par courant de Foucault. Les résultats issus des tests expérimentaux sont comparés à ceux obtenus par simulation, montrant la validité du modèle élaboré.

**Mots-Clés :** Ferrosésonance, Transformateur, Modèle d'hystérésis, Matlab\Simulink

## Abstract:

The objective of this work is to make an experimental studies of ferrosésonance phenomena using a three-phase Core type transformer, an electromagnetic model of transformer has been elaborate using Tellinen hysteresis model and taking count of different magnetic interaction between the three phase and the eddy currant loss. The comparison between the experimental, and the simulation results, validate the elaborated model.

**Key words :** Ferrosésonance, Transformer, hysteresis model, Matlab\Simulink.

**A mes parents**

## **Remerciements**

Je remercie vivement mes promoteurs le Pr O.Touhami et Mr F.Abouira pour M' avoir proposés et diriger cet intéressant thème.

Je remercie également tous les enseignants qui ont contribué à mon formation et plus particulièrement ceux du département d'Electrotechnique.

Nous remercions également les membres du jury qui ont bien voulu examiner mon travail.

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Généralités sur la ferrorésonance</b>	<b>2</b>
2.1	Différence entre résonance et ferrorésonance . . . . .	2
2.2	Classification des régimes ferrorésonants . . . . .	2
2.3	Diagramme du plan de phase . . . . .	3
2.4	Section de Poincaré . . . . .	3
2.5	Régime périodique . . . . .	4
2.6	Régime quasi-périodique . . . . .	4
2.7	Régime chaotique . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Situation réelles pouvant donner lieu à la ferrorésonance</b>	<b>5</b>
3.1	Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts . . . . .	6
3.2	Transformateur condensateur de tension (TCT) . . . . .	7
3.3	Reprise de service ou renvoi de tension sur une longue ligne . . . . .	9
3.4	Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé .	10
3.5	Cas à étudier . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Modèle dynamique du Transformateur triphasé asymétrique à trois colonnes</b>	<b>11</b>
4.1	Identification du transformateur d'essai . . . . .	12
4.1.1	Mesure des caractéristiques non-linéaires ( $\phi - i$ ) . . . . .	12
4.1.2	Mesure de la séquence zero ( $\phi_0 - i_0$ ) . . . . .	14
4.2	Modèle d'hystérésis de Tellinen . . . . .	15
4.3	Résultats théoriques obtenus par le modèle de Tellinen . . . . .	17
<b>5</b>	<b>Circuit de tests de la ferrorésonance</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Résultats expérimentaux et simulés</b>	<b>20</b>
6.1	Mode fondamental . . . . .	21
6.2	Mode sous-harmonique . . . . .	23
6.3	Mode quasi-périodique . . . . .	23
6.4	Mode chaotique . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Cas où le neutre est relié</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>27</b>
	Références	28

# 1 Introduction

La ferrorésonance est un phénomène oscillatoire touche les systèmes électriques qui contient des inductances de magnétisation non linéaire (Transformateurs) et un système de condensateurs, elle se manifeste par des surtensions et des surintensités ainsi que des harmoniques dans les ondes de la tension et du courant conduisant potentiellement à un échauffement excessif, un défaut d'isolation dans les transformateurs ainsi que d'importantes perturbations sur les réseaux électriques.

Le circuit général pouvant donner naissance à la ferrorésonance est essentiellement constitué :

- d'une inductance de magnétisation non-linéaire (cas des transformateurs);
- d'un condensateur mis en série avec cette inductance et court-circuité à l'aide d'un interrupteur;
- d'une source de tension alternative sinusoïdale;
- de faibles pertes (résistance de ligne, pertes fer du transformateur, etc...).

L'apparition de la ferrorésonance est d'autant plus accentuée qu'en l'absence d'un amortissement, cas du transformateur à vide ou faiblement chargé.

La situation la plus courante sur les réseaux électriques reste le cas du transformateur triphasé. Ceci nous a poussés à explorer cette voie en effectuant une étude expérimentale. Plusieurs études analytiques et numériques basées sur l'approximation par phase des transformateurs triphasés ont été effectuées mais donnant des résultats imprécis. Dans ces approximations, il a été négligé :

- les interactions magnétiques entre les flux générés par les trois phases dans le noyau du transformateur,
- la différence entre les trois courants absorbés par le transformateur à vide,
- et la différence entre les harmoniques existants dans le courant à vide d'un transformateur triphasé par rapport à ceux du transformateur monophasé.

Pour aboutir à des résultats beaucoup plus précis, il est nécessaire d'établir une simulation du modèle complet du transformateur en tenant en compte des différentes interactions magnétiques.

Ce chapitre traite du domaine d'apparition de la ferrorésonance dans un transformateur triphasé asymétrique à trois colonnes, tout en prenant en compte l'effet du couplage magnétique, l'hystérésis et les pertes par courant de Foucault.

Pour cela, un modèle dynamique approprié est implémenté sur Matlab/Simulink pour la simulation du phénomène transitoire du transformateur. Ce modèle est basé sur la théorie des circuits électromagnétiques utilisant le modèle dynamique de Telli-

nen, [1]. L'étude est effectuée en suivant les mêmes étapes que celles du transformateur monophasé. Nous commençons par l'identification du transformateur, puis on élabore le modèle magnétique pour la simulation, ensuite on détermine le domaine d'apparition des différents modes ferrorésonants. Suite à cela, on passe aux tests expérimentaux. La précision des tests, lors de l'identification du transformateur, est très importante car elle permet de déterminer les valeurs des paramètres influençant les modes ferrorésonants. Les tests expérimentaux sont effectués sur un transformateur de laboratoire triphasé asymétrique de puissance 3kVA.

## **2 Généralités sur la ferrorésonance**

### **2.1 Différence entre résonance et ferrorésonance**

Les différences majeures d'un circuit ferrorésonant par rapport à un circuit résonant sont :

- La possibilité de raisonner dans une large plage de valeur de la capacité  $C$  ;
- L'apparition des fréquences différentes de celles de la source (régime quasi-périodique, chaotique, etc.) ;
- L'existence de plusieurs régimes permanents stables pour des valeurs spécifiques de paramètres.

### **2.2 Classification des régimes ferrorésonants**

A partir des formes d'onde des tensions et des courants on arrive à classifier les régimes de la ferrorésonance. Cette classification correspond en régime permanent, c'est-à-dire, après extinction du régime transitoire. On peut reconnaître le type de la ferrorésonance soit par le contenu spectral des signaux de courant et de tension (FFT) soit par le type de ferrorésonance utilisant le diagramme du plan de phase ou encore la section de Poincaré.

Il est préférable de se baser sur le signal de tension qui est de forme sinusoïdale avant l'apparition de la ferrorésonance, donc son spectre ne présente que la fréquence fondamentale, alors que le signal du courant d'excitation contient des fréquences impaires multiple de la fréquence fondamentale ( $3f$ ,  $5f$ , ...). Nous présentons brièvement le diagramme de plan de phase et la section de Poincaré.

## 2.3 Diagramme du plan de phase

L'espace de phase est un espace mathématique abstrait dont le comportement dans le temps d'un système est représenté par le mouvement d'un point représentant les variables d'état du système avec le temps. L'étude du comportement d'un système est basée sur le comportement de sa trajectoire dans l'espace de phase. Si la trajectoire se referme sur elle-même après chaque période  $T$ , l'oscillation sera périodique, de période  $T$ . Si la solution donne le mode quasi-périodique, la trajectoire ne revient au point de départ qu'après deux ou trois périodes ( $2T$ ,  $3T$ ). Il en est de même pour la solution sous-harmonique, Si la solution donne un mode chaotique alors le comportement est non-répétitif, et la trajectoire ne se referme jamais sur elle-même.

## 2.4 Section de Poincaré

La section de Poincaré est une représentation du diagramme du plan de phase enregistré comme une séquence de points après chaque période  $T$ , Fig.1a. La section de Poincaré donne une information sur le rapport entre la fréquence de la source d'excitation et la fréquence du système. Pour une solution périodique, de période  $T$ , la section de Poincaré est un point. Le mode chaotique produit une section de Poincaré comme une surface des points aléatoires. On distingue différents types de régime ferrorésonant :

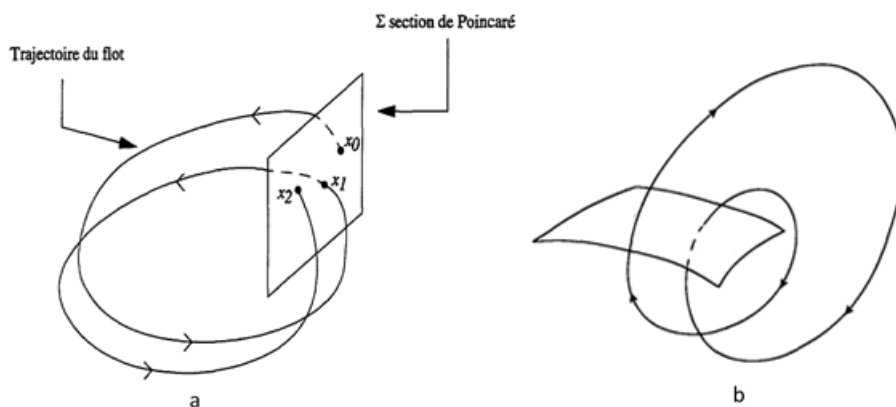


FIGURE 1 – a/ Interprétation géométrique de la section de Poincaré b/ Sous-harmonique de période  $2T$

1. la ferrorésonance périodique (mode fondamental et mode sous-harmonique)
2. la ferrorésonance quasi-périodique
3. la ferrorésonance chaotique.

La Figure.2 montre les trois modes, à savoir : le mode fondamental, le mode quasi-périodique et le mode chaotique.



## 2.5 Régime périodique

La ferrorésonance périodique est soit fondamentale soit sous-harmonique. Pour la ferrorésonance fondamentale, les signaux sont à la fréquence de la source d'alimentation 50 Hz, bien que plusieurs harmoniques peuvent exister et sont généralement des multiples entiers impairs de la fréquence fondamentale, à savoir : 150Hz, 250Hz, 350Hz, Fig.2

Pour la ferrorésonance sous-harmonique, les oscillations s'effectuent avec une période multiple de la période de la source  $nT$ . Sur le spectre du signal, il apparait des fréquences sous-multiples, impaires de la fréquence fondamentale (50Hz /3, 50Hz/5, 50Hz/7, etc.).

## 2.6 Régime quasi-périodique

Ce régime n'est pas périodique. Il se caractérise par des oscillations ayant au moins deux fréquences de base : une fréquence fondamentale est une autre différente. Le spectre de fréquence est composé de plusieurs raies distinctes dont les fréquences s'expriment sous la forme :  $nf_1 + mf_2$  (n et m sont des nombres entiers), Fig.2

## 2.7 Régime chaotique

Les régimes chaotiques se caractérisent par un comportement qui semble aléatoire, leur spectre de fréquence est continu, c'est-à-dire, qu'il ne s'annule pour aucune fréquence, Fig.2 La section de Poincaré est une surface de points, Fig.2

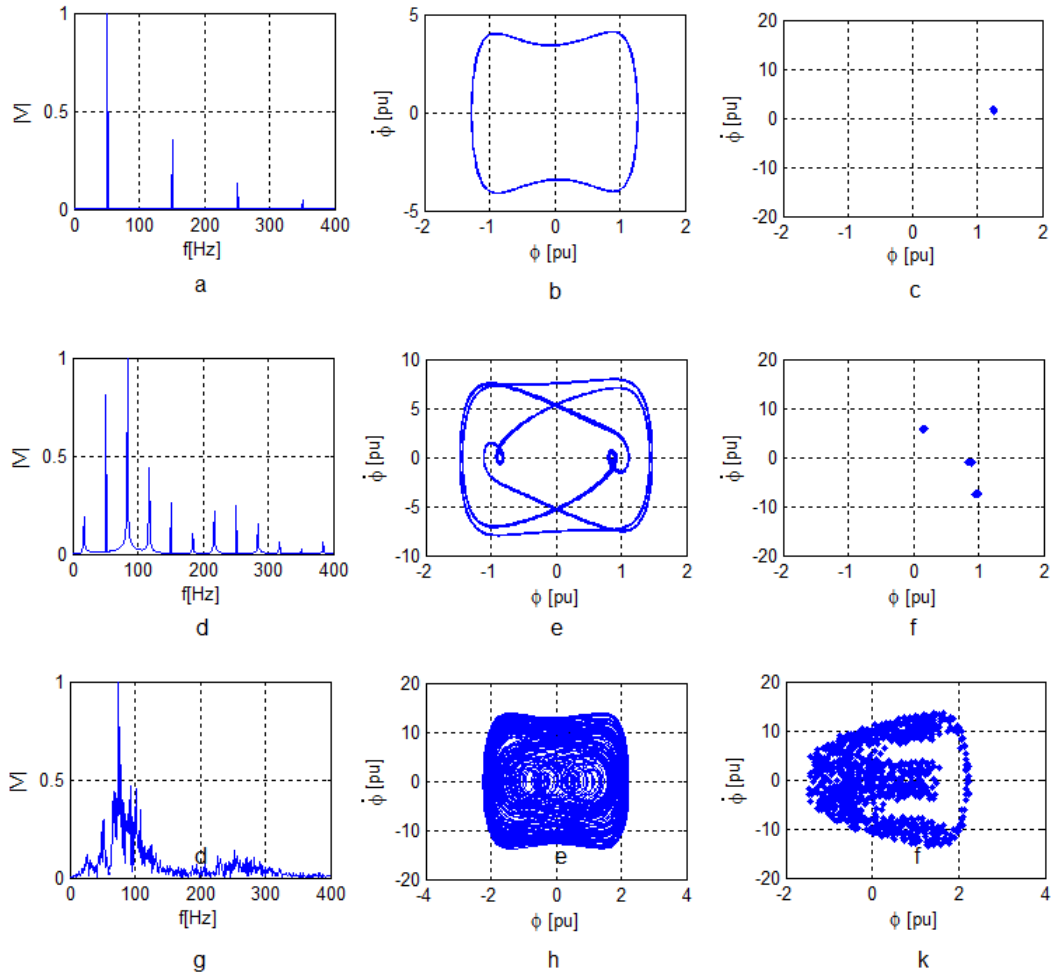


FIGURE 2 – a, d, g/ Spectre du signal b, e, h/ Diagramme du plan de phase c, f, k/ Section de Poincaré des trois régimes

### 3 Situation réelles pouvant donner lieu à la ferrorésonance

Supposons que dans un circuit monophasé ou triphasé on distingue les configurations "séries" où la capacité est en série entre l'élément non-linéaire et la source de tension et, les configurations "parallèles" où la capacité qui donne la ferrorésonance est en parallèle avec l'élément non-linéaire. Les cas de la ferrorésonance qui peuvent se présenter sur un réseau électrique sont, [2]

- Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts.
- Transformateur condensateur de tension (TCT).
- Reprise de service ou renvoi de la tension sur une ligne longue.
- Transformateur de tension raccordé à un réseau à neutre isolé.

### 3.1 Transformateur de tension alimenté par la capacité d'un ou de plusieurs disjoncteurs ouverts

On considère le cas d'un transformateur de tension raccordé à une barre par l'intermédiaire d'un disjoncteur ouvert. Ce disjoncteur contient des capacités de répartition de la tension entre les chambres du disjoncteur qui sont responsables du phénomène de la ferrorésonance. La Figure 3.a présente le schéma de base où la capacité  $C_t$  représente l'ensemble des capacités shunt mises à la terre (capacité du transformateur, capacité entre la ligne et la terre, etc.). Le circuit de Thévenin du schéma équivalent est présenté à la Fig.3.c.

avec :

$$V_{th} = V_n \frac{C_d}{C_d + C_t}$$

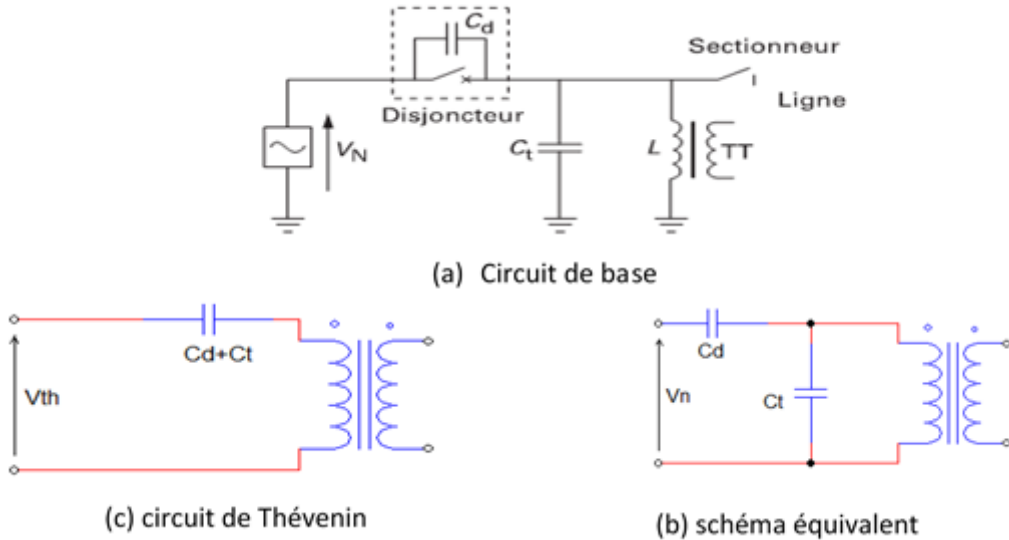


FIGURE 3 – Schéma d'un circuit ferrorésonant dans un transformateur de tension en série avec le Disjoncteur [2]

Le circuit de Thévenin montre que le circuit de base est en série avec la capacité  $(C_d + C_t)$  alimenté à tension réduite  $V_{th}$ . C'est donc une configuration de ferrorésonance série.

Dans ce schéma, la décharge de la capacité entraîne la saturation du transformateur et les différents régimes de ferrorésonance pouvant avoir lieu sont généralement périodiques de type fondamental ou sous-harmonique.

Durant le régime fondamental les surtensions sont importantes et entraînent une destruction rapide de transformateur. Dans le cas du régime sous-harmonique, la fréquence et la tension sont généralement faibles et le flux atteint le niveau de saturation conduisant à l'échauffement. Pour des capacités de valeur spécifique, le régime quasi-périodique

peut apparaître pour des fréquences plus importantes que celles du fondamental et les surtensions sont également plus élevées.

### Solution pratique proposée

Si le transformateur n'est pas construit de façon à supporter les régimes sévères (surtensions), c.-à-d., que les pertes ne sont pas importantes pour amortir la ferrorésonance, alors il est possible d'équiper les postes de transformateur par des dispositifs d'amortissement. Ces dispositifs sont constitués d'une résistance en série avec une inductance placés au secondaire du transformateur Fig.4

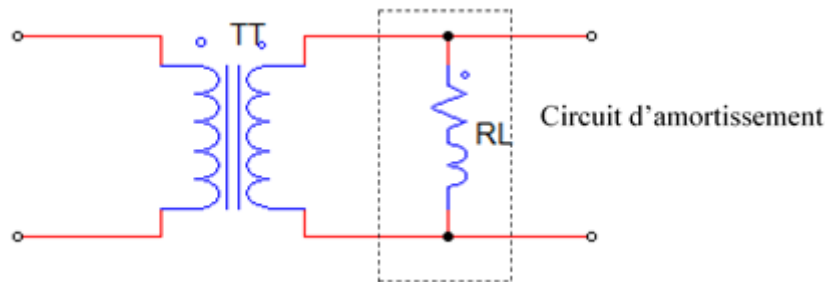


FIGURE 4 – Schéma du transformateur avec circuit d'amortissement,[2]

### 3.2 Transformateur condensateur de tension (TCT)

Les transformateurs magnétiques de tension sont des appareils performants dont le coût devient vite important en haute tension. Le transformateur condensateur de tension (TCT) est un dispositif économique utilisé pour passer de la haute tension vers la basse tension par l'emploi d'un diviseur de tension capacitif et d'un transformateur. Le TCT est constitué de la mise en cascade d'un quadripôle abaisseur de tension ( $C_1$ ,  $C_2$  et  $L$ ) et d'un transformateur magnétique de tension, Fig.5. L'inductance  $L$  est choisie de façon à respecter la relation :

$$L(C_1 + C_2)(2\pi.f)^2 = 1$$

avec : la fréquence du réseaux  $f = \frac{\omega_0}{2\pi}$

La tension intermédiaire à l'entrée du transformateur  $U_i$  tell que :

$$U_p = \frac{C_1 + C_2}{C_1} U_i = K.U_i$$

Quelque soit la valeur de l'impédance  $Z$  dans les limites d'un fonctionnement linéaire, on peut adapter le niveau de tension intermédiaire  $U_i$  à la valeur désirée par le choix de  $K$ . Ce type de transformateur possède deux condensateurs. En plus des éléments non-linéaires du transformateur, il contient les conditions nécessaires à l'apparition de la ferrorésonance. Il s'agit d'une configuration de ferrorésonance série monophasée. Les phénomènes de la ferrorésonance apparaissent généralement pendant les essais de tenue

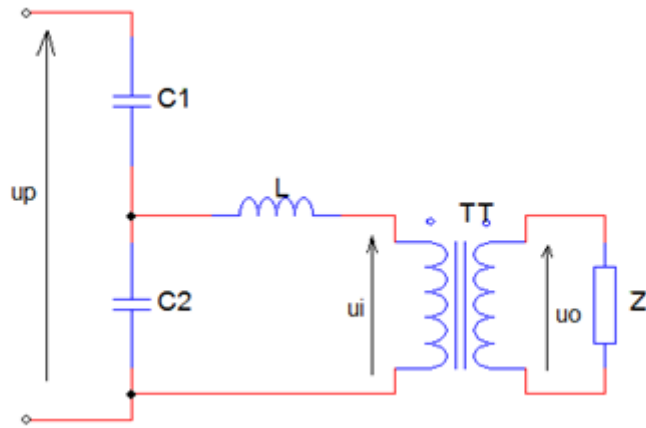


FIGURE 5 – Schéma électrique d'un transformateur condensateur de tension (TCT), [3]

de court-circuit du secondaire. Pendant le court-circuit, il y a accumulation considérable de l'énergie dans le condensateur  $C_2$  et dans l'inductance  $L$  qui se sature. Le circuit résonant série conduit à une élévation considérable de la tension aux bornes de  $C_2$  et du courant dans  $L$ . le transformateur n'est pas saturé. Pendant l'ouverture du court-circuit la F.m.m de l'enroulement primaire n'est pas compensée par celle du secondaire. Le circuit magnétique se sature et l'induction magnétique devient très élevée pendant que le circuit entre en ferrorésonance, [3].

### Solution pratique proposée

La technique la plus utilisée est de placer un circuit résonnant en parallèle au secondaire Fig.6. Au moment de l'ouverture du court-circuit, les grandes intensités du courant qui traverse le secondaire se referme par le circuit  $R_1 - C_3$  limitant ainsi le niveau de saturation du transformateur.

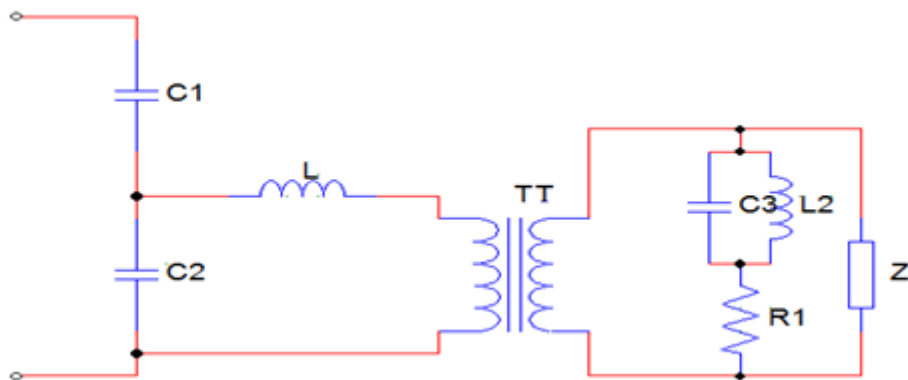


FIGURE 6 – Transformateur capacitif de tension avec circuit anti-ferrorésonant [3]

### 3.3 Reprise de service ou renvoi de tension sur une longue ligne

Il s'agit d'une situation pratique d'une ligne triphasée longue. La source de tension provient d'un alternateur et, en fin de ligne se trouve une inductance saturable d'un transformateur comme le montre le schéma équivalent monophasé donné à la Fig.7. Cette ligne est modélisée par une cellule en  $\Pi$  et les capacités responsables de la ferrorésonance sont placées en parallèle avec le transformateur. Il s'agit donc de la ferrorésonance parallèle. Une étude analytique de la ferrorésonance de ce circuit par les méthodes de stabilité des systèmes a été réalisée pour déterminer les valeurs critiques de  $C$  et  $L$  conduisant à la ferrorésonance [4], [5].

Les phénomènes de ferrorésonance apparaissent dans les procédures de renvoi de la

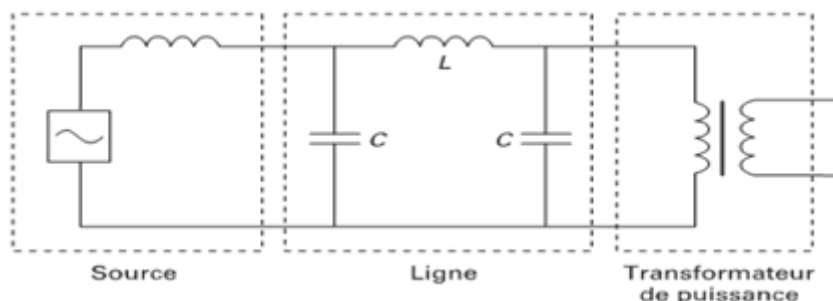


FIGURE 7 – Schéma équivalent d'un circuit ferrorésonant parallèle [2]

tension sur une longue ligne, ou lors de la reprise de service sur un réseau très capacitif. Il existe deux types de renvoi de tension : brusque et progressif. Pour un renvoi brusque de tension, la fermeture du disjoncteur, côté transformateur cible, se fait à 90 % de la tension nominale du groupe source afin de limiter les surtensions transitoires (surtension de manœuvre, ferrorésonance et surtensions harmoniques) et les surtensions permanentes

Pour le renvoi progressif de tension, le groupe source doit être équipé de la fonctionnalité renvoi de tension progressif, par action sur son excitation. Le disjoncteur côté source est fermé à tension nulle puis la tension est augmentée progressivement jusqu'à 90 % de la tension nominale (Fig.8). Avec ce type de renvoi de tension, les risques de surtensions sont très limités mais existent tout de même.

Les régimes de ferrorésonance (permanent ou transitoire) rencontrés dans cette situation sont généralement du type fondamental ou quasi-périodique. Les régimes de ferrorésonance permanents apparaissent pour des valeurs critiques des éléments de la ligne. Par contre les régimes transitoires peuvent être issus d'une manœuvre violente comme les enclenchements brusques de transformateur.

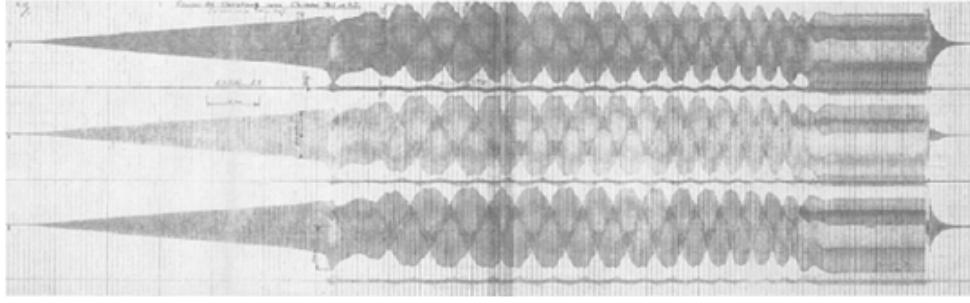


FIGURE 8 – Surtension enregistré lors d'un renvoi de tension [2]

### Solution pratique proposée

Les solutions pratiques de ces problèmes consistent à éviter de se trouver dans une situation à risque. Des critères pratiques permettent d'estimer la zone à risque en fonction des paramètres du réseau (fréquence de réseau, rapport de puissance nominale sur la puissance de court-circuit du réseau). On peut aussi connecter une charge résistive au réseau pour amortir le phénomène.

### 3.4 Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé

Cette situation résulte du couplage d'une source de secours à neutre isolé, ou d'une défaillance du système de mise à la terre. L'inductance saturable est représentée par les transformateurs de tension, la capacité  $C_0$  entre phase et terre est en parallèle avec l'inductance non-linéaire, Fig.9. Il s'agit donc de la ferrorésonance parallèle.

Les manœuvres en réseau (pertes de charge, élimination de défaut, etc.) peuvent conduire au phénomène de la ferrorésonance, selon certaines valeurs de la capacité. La ferrorésonance est du type fondamental, sous-harmonique ou quasi-périodique. Les surtensions apparaissent entre phase et terre et également entre phase et point neutre ( $V_N$ ).

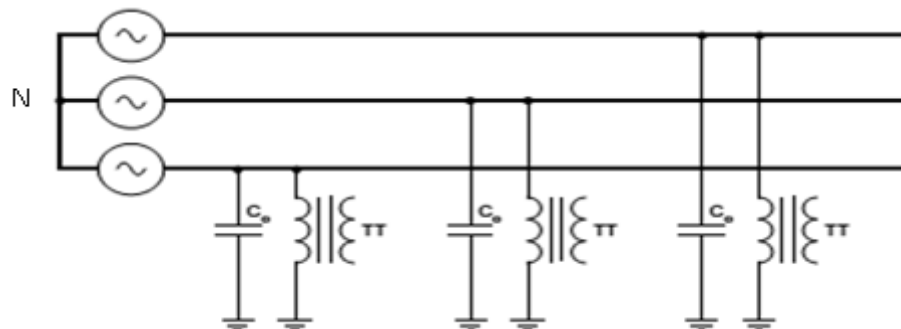


FIGURE 9 – Transformateurs de tension (TT) raccordés à un réseau à neutre isolé,[6]

### 3.5 Cas à étudier

Le cas à étudier c'est le cas d'un transformateur triphasé à trois colonnes à vide ou faiblement chargé à neutre isolé alimenter accidentellement sur deux phases.

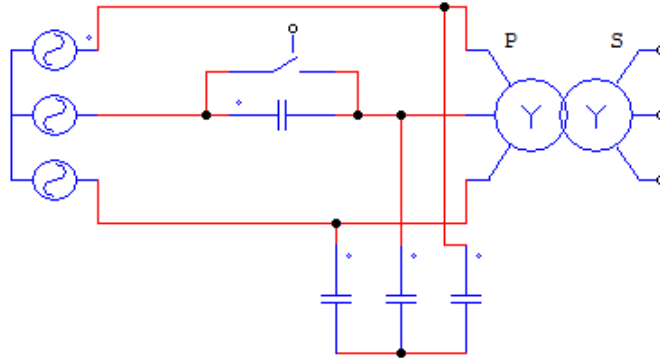


FIGURE 10 – Situation de ferrorésonance à étudier

## 4 Modèle dynamique du Transformateur triphasé asymétrique à trois colonnes

Avant de commenceront les essais expérimentaux sur la ferro résonance on doit passe par une simulation numérique pour ne pas tomber dans des cas dangereux, ce qui implique l'implémentation d'un modèle de transformateur propice pour la simulation de ces phénomènes.

La plupart des études de transformateurs triphasés sont basées sur des modèles de transformateur monophasé "représentation par phase". C'est une approche qui consiste à considérer l'hypothèse de noyaux magnétiques isolés pour chaque phase tout en négligeant l'interaction magnétique des flux entre eux. Pour les transformateurs triphasés, cette approximation n'est valable que pour un transformateur à "noyau triplex".

L'étude théorique de la ferrorésonance nécessite un modèle précis qui tient compte :

- du couplage électrique dû aux connexions des enroulements,
- du couplage magnétique ou interaction magnétique entre les flux des trois phases,
- de la représentation non-linéaire de la branche magnétisante,
- et enfin, de la représentation des pertes résistives, du cycle d'hystérésis et des pertes par courants de Foucault.

Un modèle dynamique récent de transformateur triphasé asymétrique pour des conditions de fonctionnement en régime permanent et transitoire est proposé dans la référence [7]. Ce modèle est basé sur l'utilisation de deux topologies, à savoir : électrique et magnétique (modèle hybride) pour introduire le comportement dynamique de l'hystérésis



par l'utilisation des modèles d'hystérésis connus tels que : le modèle de Preisach, le modèle de Jiles-Atherton où encore le modèle de Tellinen.

Dans ce mémoire de Master, nous avons implémenté sur Matlab/Simulink le modèle dynamique du transformateur triphasé asymétrique en considérant chaque branche du transformateur par une reluctance non-linéaire (modèle dynamique de Tellinen, [1]) et en représentant les flux des fuites par une reluctance homopolaire en parallèle avec les trois branches, Fig.11.

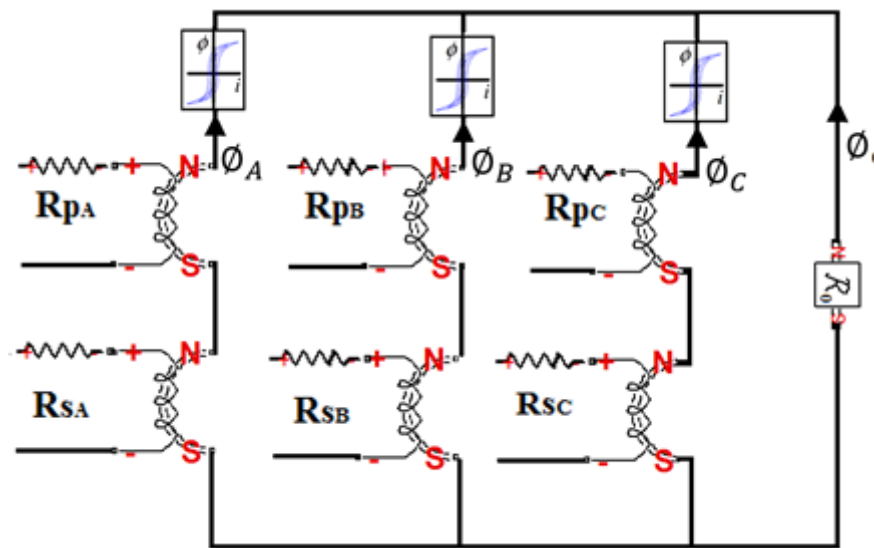


FIGURE 11 – Schéma du modèle du transformateur triphasé asymétrique

## 4.1 Identification du transformateur d'essai

Pour l'établissement d'un modèle de transformateur on doit d'abord identifier le transformateur, les tests d'identification du transformateur doivent être effectués avec précision tout en s'assurant que, lors de la mesure des caractéristiques  $(\phi - i)$ , le flux dans la troisième colonne est nul.

### 4.1.1 Mesure des caractéristiques non-linaires $(\phi - i)$

La réponse des transformateurs ayant des noyaux à trois colonnes est différente de celle des transformateurs à noyaux triplex, en raison des différentes longueurs des trois colonnes du noyau et des mutuelles existantes entre elles. Ce qui rend la détermination des caractéristiques magnétiques  $(\phi - i)$  du transformateur difficile. Une méthode de mesure est proposée dans la référence [8]. Cette méthode consiste à utiliser une source de tension monophasée et à alimenter deux bobines en parallèle et inversées, Fig.12.

Ce qui se traduit par un flux nul dans la troisième colonne.

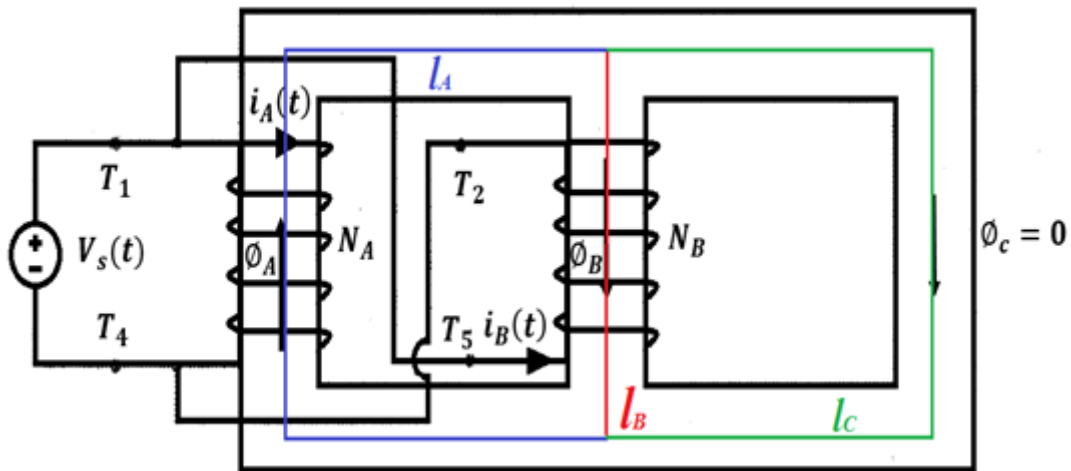


FIGURE 12 – Circuit de mesure de la caractéristique ( $\phi - i$ )

L'alimentation de la bobine B par une tension inverse à celle de la bobine A impose au flux créé par cette dernière de traverser la branche B, de telle sorte que le flux de la branche C soit nul, alors il vient :

$$\phi_A = \phi_B \text{ et } \phi_C = 0$$

D'où

$$H_A = H_B \text{ et } H_C = 0$$

En appliquant la loi d'Ampère, nous obtenons :

$$\oint H dl = Ni$$

$$H_A \cdot l_A + H_C \cdot l_C = N_A i_A$$

$$H_B \cdot l_B + H_C \cdot l_C = N_B i_B$$

Alors que,

$$H_C \cdot l_C = 0$$

Donc,

$$H_A \cdot l_A = N_A i_A$$

$$H_B \cdot l_B = N_B i_B$$

En réalité  $l_A = 2.l_B$  et comme  $H_A = H_B$  et  $N_A = N_B$ , alors le courant  $i_A$  doit être le double du courant  $i_B$ , ce qui est obtenu expérimentalement.

Les tests effectués sur un transformateur triphasé à trois colonnes, ayant les caractéristiques présentées au tableau 4.1, ont donné les résultats expérimentaux des cycles d'hystérésis ( $\phi_A - i_A$  et  $\phi_B - i_B$ ) qui caractérisent ce transformateur. Ces cycles sont présentés aux Figs.13.

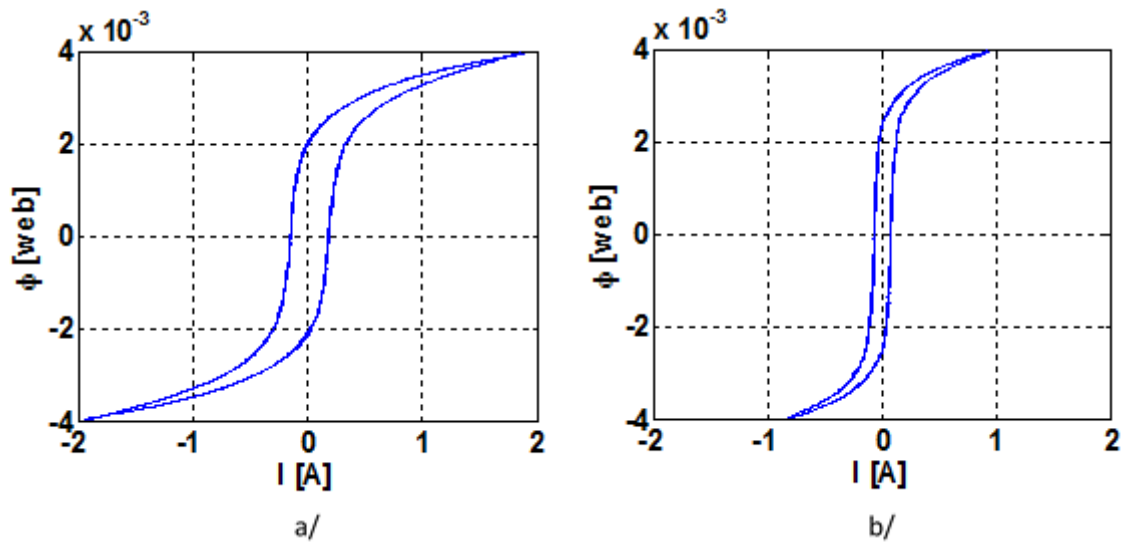


FIGURE 13 – Caractéristiques ( $\phi - i$ ). a/ colonne latérale b/ colonne centrale

#### 4.1.2 Mesure de la séquence zero ( $\phi_0 - i_0$ )

Pour la mesure de la réluctance de fuite, les bobines primaires et secondaires sont connectées en série, Fig.14. On alimente alors le primaire ou le secondaire par une source de tension  $V_0(t)$  puis on mesure  $e_0(t)$  et  $i_0(t)$ . On détermine ensuite la caractéristique magnétique ( $\phi_0 - i_0$ ).

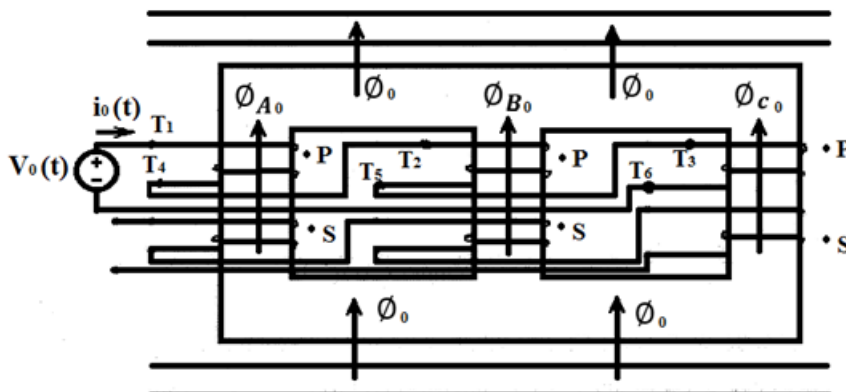


FIGURE 14 – Mesure de la caractéristique ( $\phi_0 - i_0$ ) du transformateur triphasé trois colonnes [8]

TABLE 1 – Caractéristiques du transformateur triphasé d'essais

$S_n$	3 kVA
$U_n$	380/220 V
$I_n$	4.5/7.8 A
$N_1, N_2$	250, 153
$R_{p1}, R_{p1}, R_{p1}$	0.65 $\Omega$
$R_{s1}, R_{s1}, R_{s1}$	0.45 $\Omega$

On suppose que la séquence  $(\phi_0 - i_0)$  est linéaire donc  $\mathfrak{R}$  est constante. On tire la réluctance de fuite  $\mathfrak{R}$ .

$$V_0 = 3N\omega\phi_0$$

D'où

$$\mathfrak{R}_0 = \frac{3NI_0}{\phi_0} = \frac{3N^2\omega I_0}{V_0}$$

## 4.2 Modèle d'hystérésis de Tellinen

Un modèle simple de l'hystérésis a été proposé par Tellinen [1]. Il présente une bonne précision pour estimer les cycles majeurs et mineurs à partir seulement d'un cycle majeur mesuré expérimentalement. Ce modèle peut être implémenté de façon simple dans les logiciels de simulation (PSPICE, par exemple) [7]. Dans le cas de notre travail, nous allons l'implémenter sous MATLAB. Pour estimer les cycles de chaque colonnes on doit d'abord évaluer les limites ascendantes et descendantes du cycle majeur en utilisant la fonction suivante :

$$B(h) = \text{sgn}(h) \cdot \alpha \cdot \log(\beta \cdot |h| + 1)$$

pour intégrer le modèle dans un circuit électromagnétique la fonction  $B(h)$  est modifier par  $\phi(f)$ , donc on calcul le flux est la FMM au lieu de  $B$  et  $H$ .

Les paramètres  $\alpha, \beta$  sont choisis pour contrôler la partie verticale et celle horizontale de la fonction  $\Phi(f)$ . Le paramètre  $\sigma$  permet de déplacer les limites ascendantes et descendantes. Donc  $\sigma$  donne la largeur du cycle majeur et les limites  $\Phi^-(f)$  et  $\Phi^+(f)$  deviennent.

$$\Phi_x^+(f_x) = \text{sgn}(f_x - \sigma) \cdot \alpha \cdot \log(\beta \cdot |f_x - \sigma| + 1)$$

$$\Phi_x^-(f_x) = \text{sgn}(f_x + \sigma) \cdot \alpha \cdot \log(\beta \cdot |f_x + \sigma| + 1)$$

(x=a,b,c).

Les équations utilisées pour estimer les caractéristique  $\Phi - i$  de chaque colonnes sont :

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{L_0 + \frac{\Phi^-(f) - \Phi}{\Phi^-(f) - \Phi^+(f) \left( \frac{d\Phi^+(f)}{dh} - L_0 \right)}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \text{ si } \frac{d\Phi}{dt} > 0$$

$$\frac{df}{dt} = \frac{1}{L_0 + \frac{\Phi^+(f) - \Phi}{\Phi^-(f) - \Phi^+(f) \left( \frac{d\Phi^-(f)}{dh} - L_0 \right)}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad ; \text{si } \frac{d\Phi}{dt} < 0$$

avec :  $L_0 = \frac{\mu_0 S}{L}$

Le signal de tension étant connu, et par suite la variation de  $b(t)$ . À partir des équations précédentes, on peut calculer le champ  $h(t)$ . Le terme  $\frac{d\Phi^\pm(f)}{df}$  représente la pente des fonctions ascendantes et descendantes.

$$\frac{d\Phi^\pm(f)}{df} = \frac{\alpha \cdot \beta}{\beta \cdot |f \pm \sigma| + 1}$$

Pour un comportement dynamique de l'hystérésis, les courants de Foucault doivent être pris en compte et le modèle dynamique devient alors :  $h_d = f(\Phi) + \sigma_e \cdot \frac{d\Phi}{dt}$   
avec  $h_d$  : Champ magnétique dynamique

$\sigma_e$  : Facteur du courant de Foucault dépendant des pertes par courant de Foucault ( $P_e$ ). Son expression [1], est :

$$\sigma_e = \frac{P_e N^2}{U^2}$$

$N$  : Nombre de spires,  $S$  : La surface de noyau,  $L$  : Longueur moyenne.  $\sigma_e$  Peut-être approximé à partir de deux cycles pris à des tensions différentes.

Les coefficients utilisés pour la simulation utilisant les fonctions  $\Phi_x^+(i_x)$  et  $\Phi_x^-(i_x)$  sont présenter au tableau suivant :

TABLE 2 – Données du modèle d'hystérésis

Fonction Ascendante $\Phi_x^+(i_x)$	Fonction Ascendante $\Phi_x^-(i_x)$
$\alpha_a = 0.00078, \beta_a = 0.3214, \sigma_a = 9.520$	$\alpha_a = 0.00078, \beta_a = 0.3214, \sigma_a = 9.5200$
$\alpha_b = 0.00078, \beta_b = 0.6429, \sigma_b = 7.7600$	$\alpha_b = 0.00078, \beta_b = 0.6429, \sigma_b = 7.7600$
$\alpha_c = 0.00078, \beta_c = 0.3214, \sigma_c = 9.520$	$\alpha_c = 0.00078, \beta_c = 0.3214, \sigma_c = 9.520$
$\sigma_{e(a,c)} = 26.2500; \sigma_{e(b)} = 13.1250$	

Une schéma simplifier du modèle du transformateur triphasé Core, implémenter sur Matlab/Simulink utilisant le modèle d'hystérésis de Tellinen est donné sur la figure Fig.15



teur, on détermine les paramètres du modèle de Tellinen en suivant la même procédure présentée au chapitre 2. Ces paramètres sont donnés au tableau.1

On reproduit les tests de mesure des caractéristiques  $(\Phi - i)$  par simulation, ensuite on compare les résultats obtenus par simulation avec ceux expérimentaux, Fig.16.a. Avant d'effectuer les tests de la ferrorésonance on effectue deux tests de confirmation du modèle par la détermination du courant à vide et du courant d'appel. Les résultats obtenus par simulation sont comparés à ceux expérimentaux, Fig.16.b.

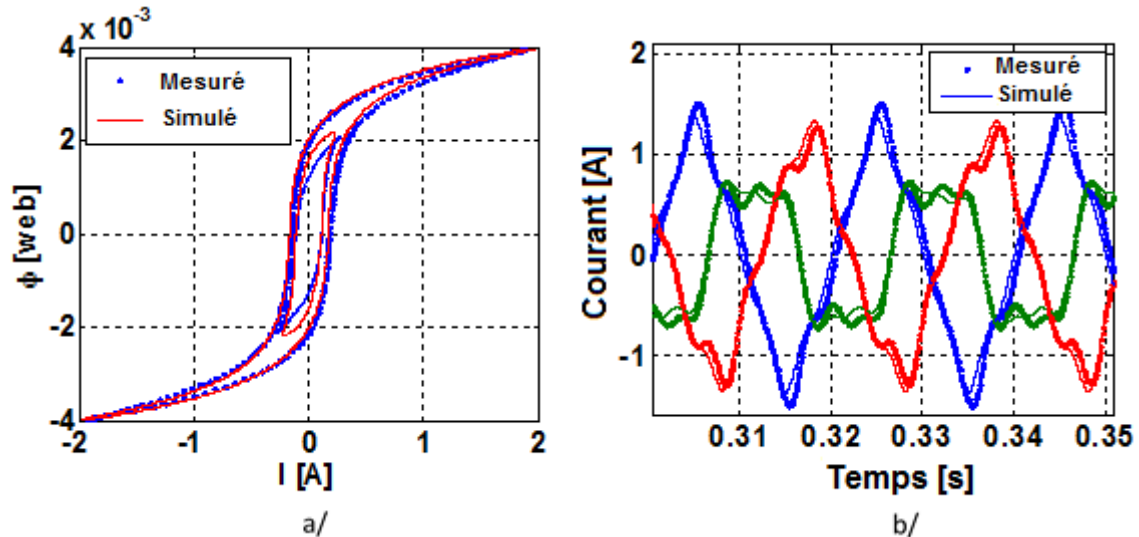


FIGURE 16 – Comparaison des résultats obtenus par simulation avec ceux expérimentaux a/ caractéristique  $(\Phi - i)$  de la colonne A b/ courants à vide

On alimente le transformateur par une source de tension triphasée brusque et on relève les courants  $i_A, i_B$  et  $i_C$  pendant le régime transitoire. Les résultats expérimentaux obtenus sont comparés à ceux simulés sont présentés, Fig.17.

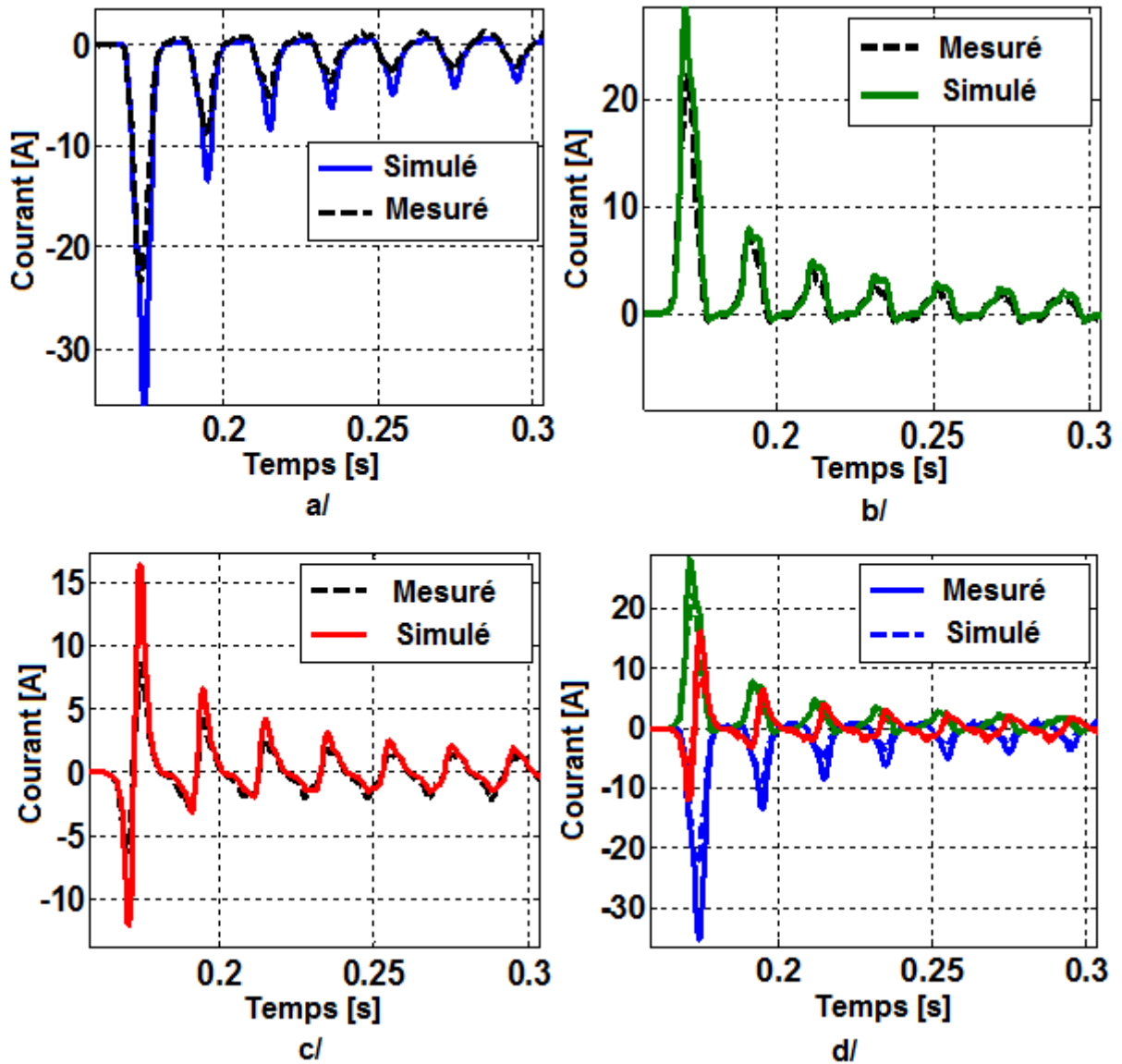


FIGURE 17 – Comparaison du courant de démarrage expérimental et simulé  
a/ phase A b/ phase B c/ phase C, d/ les trois phases (A, B et C)

Les amplitudes du courant de démarrage en régime transitoire sont proches bien qu'il existe une différence notamment pour la deuxième phase. Ce qui est logique car on ne connaît pas exactement les conditions sur lesquelles nous avons alimenté le transformateur. En régime permanent, les signaux expérimentaux et simulés deviennent plus proches. L'enclenchement du transformateur engendre un courant à vide très fort, il atteint 35 A pour la phase A.

## 5 Circuit de tests de la ferrorésonance

Les tests de la ferrorésonance sur un transformateur triphasé de 3 kV doivent être effectués avec précaution. Pour éviter de passer par des situations non désirés sur le



banc d'essais, une simulation doit être effectuée préalablement pour des raisons qu'on a déjà citées au chapitre 3, à savoir : Les grandeurs électriques (courant, Tension) dans un tel circuit peuvent atteindre des amplitudes extrêmement dangereuses dans certains modes ferrorésonants.

Le courant de démarrage, au moment de la fermeture de l'interrupteur pour court-circuiter la capacité, est le plus grand problème rencontré en expérimentation. Il atteint près de 100 A. Pour éviter ce problème nous avons placé un interrupteur tripolaire pour ouvrir le circuit au lieu de le refermer lors du court-circuit de la capacité. Le schéma du circuit réalisé est donné à la Fig.18.

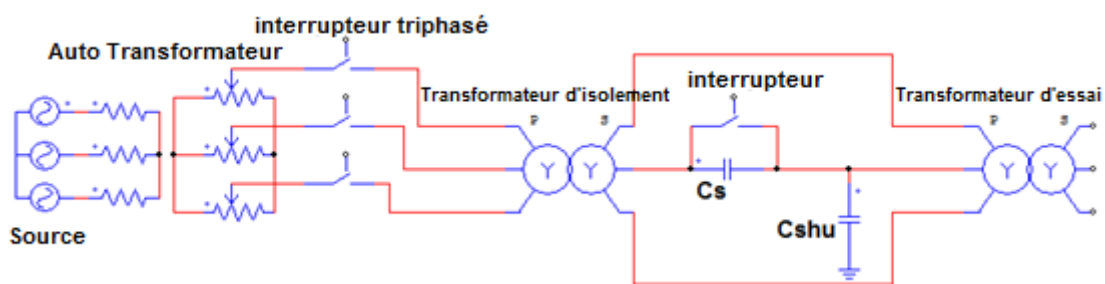


FIGURE 18 – Schéma du circuit expérimental

Les capacités série et parallèle peuvent provenir des disjoncteurs et des lignes de transmission. Cette situation peut être traduite par le circuit de la Fig.18. Elle apparaît sur les réseaux électriques en cas de défaut du disjoncteur, d'une phase ouverte et les autres fermées ou encore d'un transformateur à vide ou faiblement chargé.

Le placement de la capacité sur la phase du milieu (phase B) favorise l'apparition des modes ferrorésonants, puisque le courant de la phase B contient plus d'harmoniques que les courants des phases A et C.

La capacité parallèle est mise  $C_{sh} = 0\mu F$ , les essais sont effectués à tension nominale égale à 220 V entre phase et neutre.

## 6 Résultats expérimentaux et simulés

Après obtention des valeurs des paramètres théoriques conduisant aux différents modes ferrorésonants, on commence les tests pour obtenir ces modes expérimentalement. On refait l'essai plusieurs fois à cause de l'influence des conditions initiales jusqu'à l'obtention du mode qui est en même temps recueilli à travers une carte d'acquisition de données. Les formes d'onde des courants et des tensions dans le cas du transformateur triphasé sont différentes de celles du transformateur monophasé. On peut reconnaître le mode obtenu à partir de la forme du signal de tension visualisé sur un oscillogramme.

Pour les modes : fondamental, quasi-périodique et sous-harmonique, la surtension est faible. Mais on peut l'identifier également à travers le signal du courant.

## 6.1 Mode fondamental

Dans ce cas d'essai, le neutre du transformateur est isolé, cela arrive souvent dans les systèmes électriques en cas de défaut de mise à la terre. Pour une valeur de capacité  $C_s = 3\mu F$ , le mode ferrorésonant fondamental est obtenu, Fig.19.

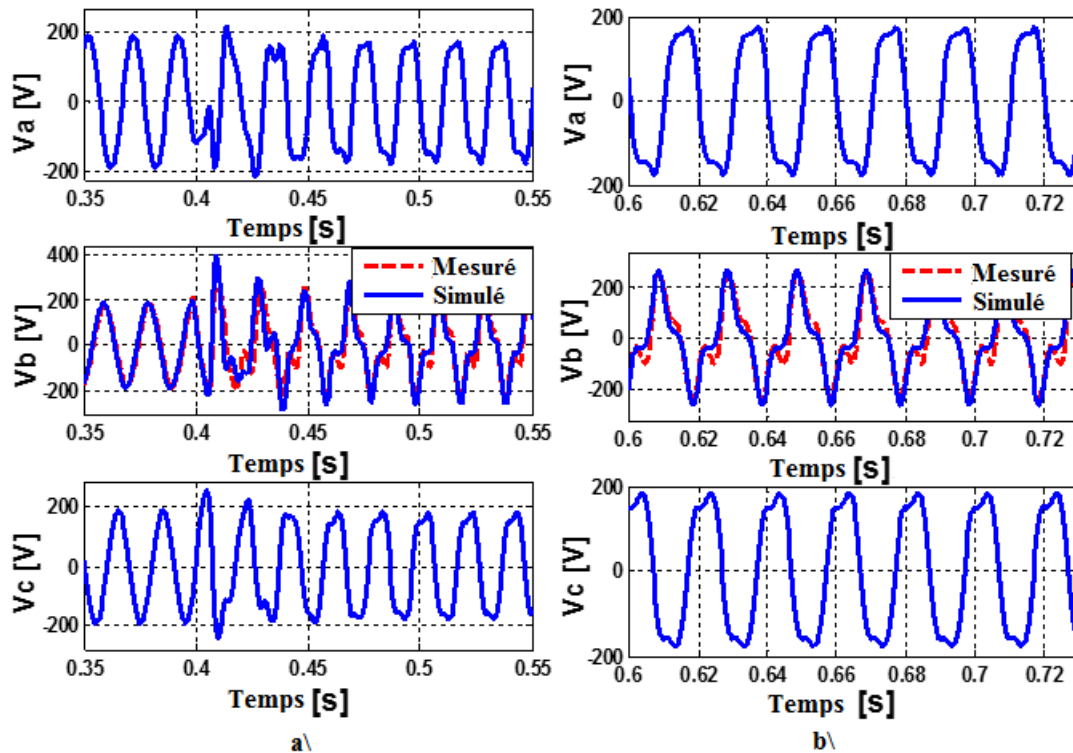


FIGURE 19 – figure  
Tension des trois phases durant le mode fondamental  
a/ régime transitoire b/ régime permanent

L'amplitude de la tension de la phase centrale est  $V_b = 300V$ . La phase B devient plus saturée que les phases A et C. Pour les phases A et C, il y a une surtension juste en régime transitoire mais le signal est déformé, donc il contient des harmoniques.

Les courants simulés et ceux expérimentaux des trois phases en mode fondamental sont présentés aux Figs.20.

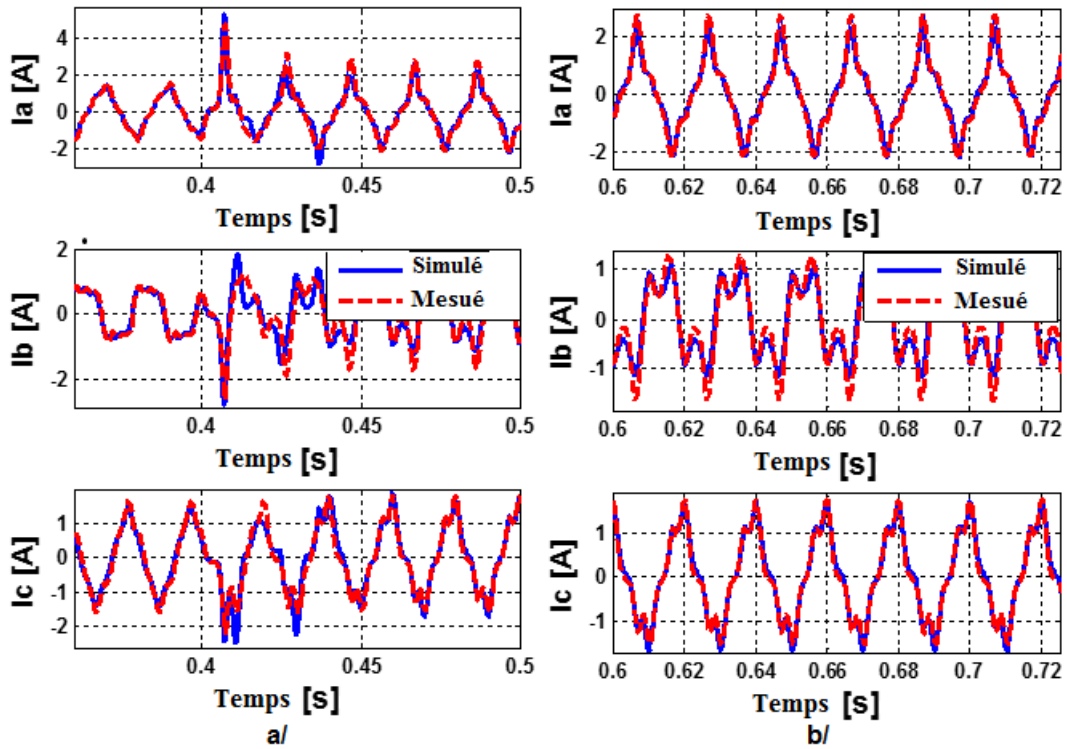


FIGURE 20 – Courants des trois phases durant le mode fondamental  
a/ régime transitoire b/ régime permanent

Lors du mode fondamental, les amplitudes des harmoniques en tension et en courant sont faibles par rapport au fondamental, Fig.4.21. L'amplitude des harmoniques ne caractérisent pas le mode fondamental.

Le spectre du signal de la tension en mode fondamental et la trajectoire du plan de phase sont présentés à la Fig.4.21.

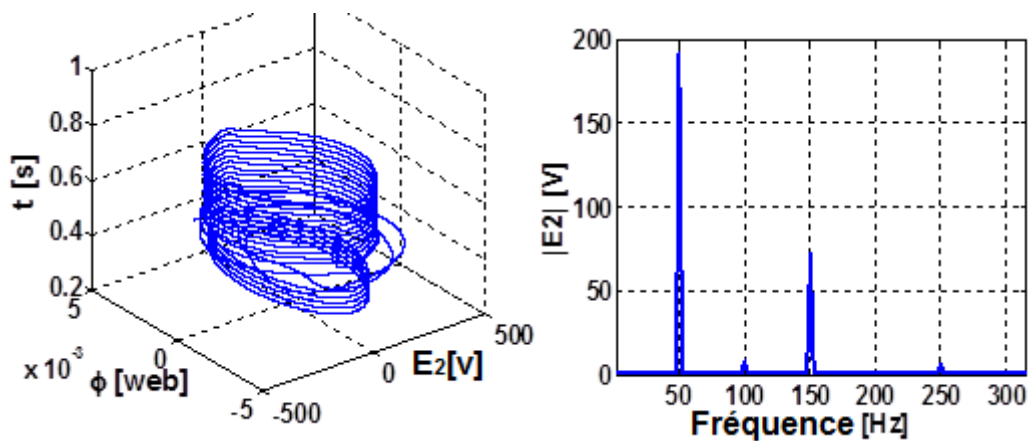


FIGURE 21 – Trajectoire du plan de phase et le spectre de la tension secondaire lors du mode fondamental

## 6.2 Mode sous-harmonique

Les essais expérimentaux conduisant au mode sous-harmonique sont effectués pour des valeurs de capacité allant de  $68 \mu F$  jusqu'à  $100 \mu F$ . Les résultats obtenus lors du mode sous-harmonique montrent que le mode apparaît seulement en régime transitoire puis disparaît en régime permanent. Les signaux expérimentaux sont comparés à ceux simulés, Fig.4.22.

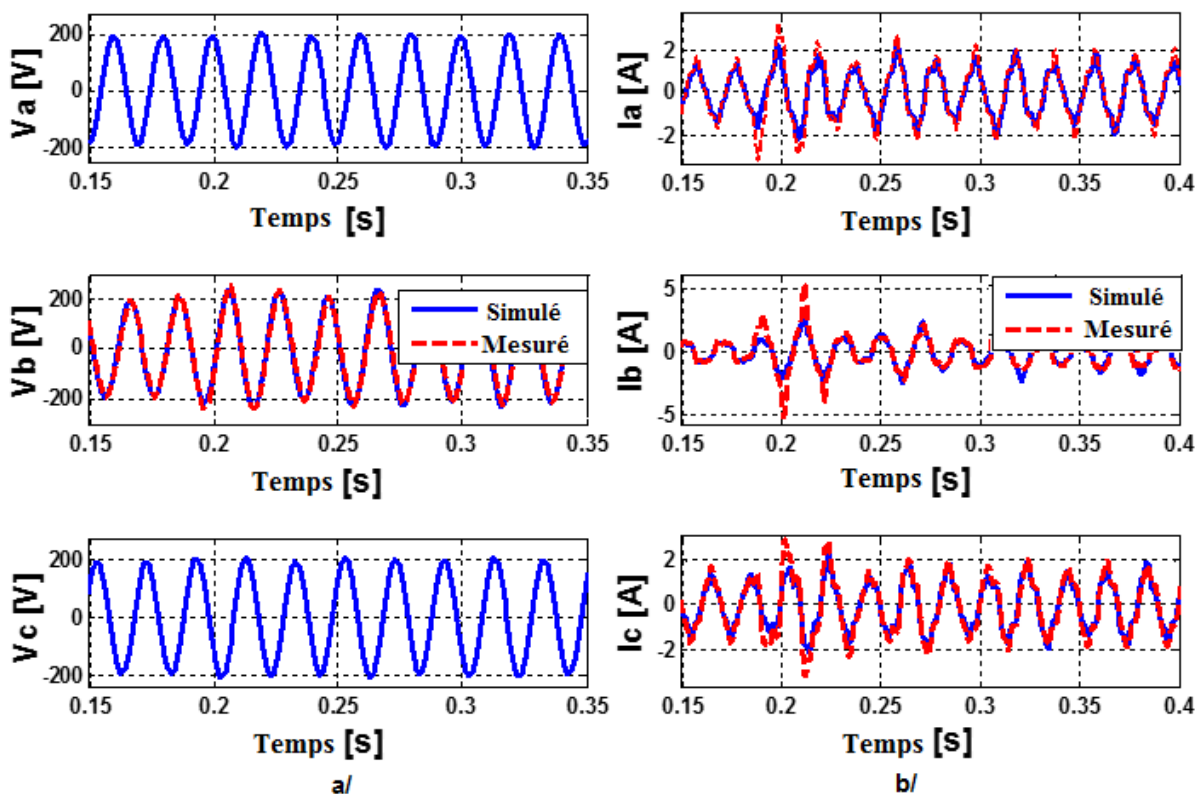


FIGURE 22 – Tensions et courants des trois phases durant le mode sous-harmonique

## 6.3 Mode quasi-périodique

Les valeurs des capacités  $C_s$  allant de  $10$  à  $30 \mu F$  ont donné le mode quasi-périodique. Nous avons effectué l'essai avec une capacité de  $20 \mu F$  pour obtenir ce mode. Il s'est manifesté par une surtension avec déformation du signal. La Figure 23 présente les tensions des trois phases A, B et C en régime transitoire et permanent. On peut observer que le mode quasi-périodique est obtenu sur la phase B où l'on a placé la capacité, alors que dans les phases A et C c'est le mode fondamental qui est apparu.

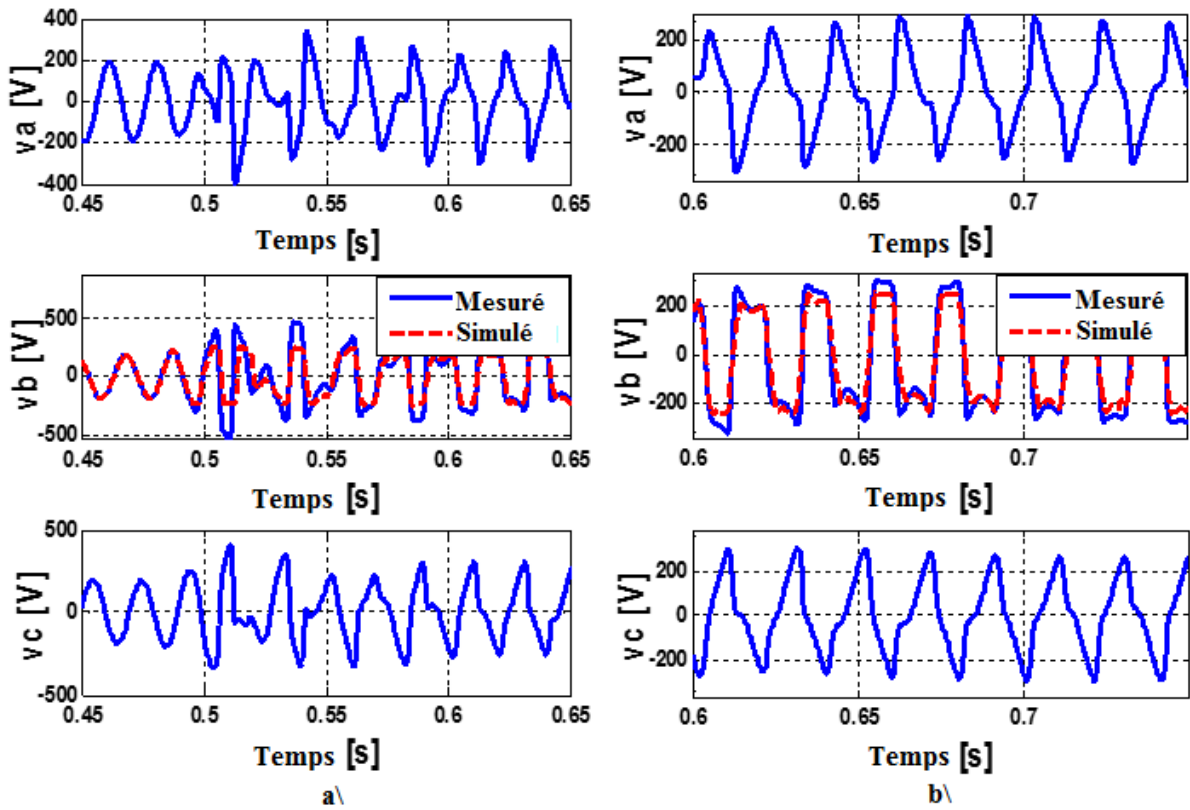


FIGURE 23 – Tension des trois phases durant le mode quasi-périodique  
a/ régime transitoire b/ régime permanent

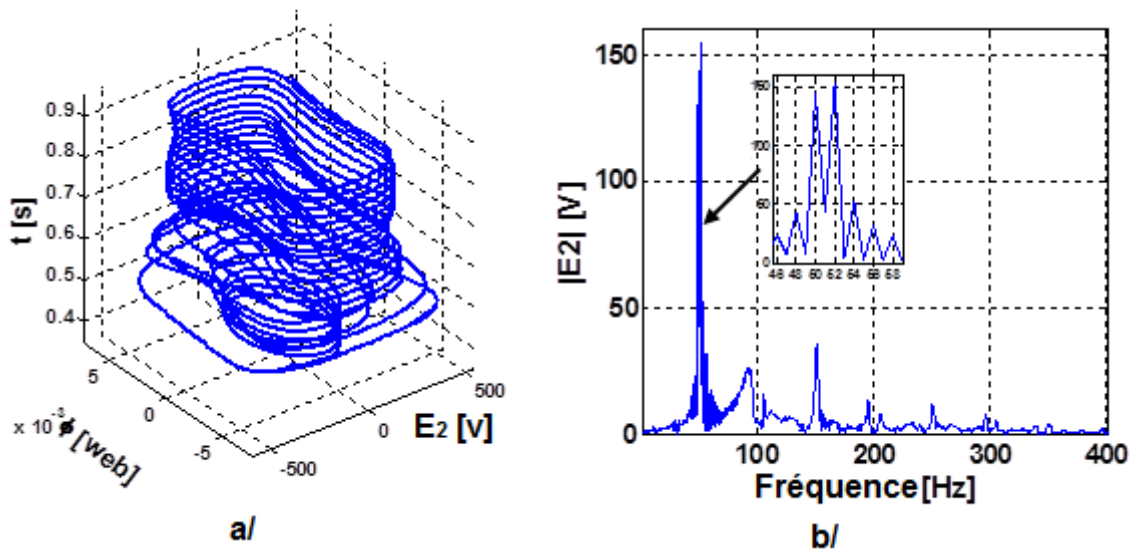


FIGURE 24 – Trajectoire du plan de phase et le spectre de la tension secondaire lors du mode quasi-périodique

Ce mode contient deux fréquences de base plus des harmoniques. Dans le cas du transformateur monophasé (chapitre 3) les fréquences de base sont à 50 Hz et 84Hz. Par contre, dans ce cas précis les deux fréquences de base sont très proches l'une à 50 Hz (fréquence de la source) et l'autre à 52 Hz. Le spectre du signal de la tension est

donné à la Fig.24b montre l'existence de deux fréquences proches.

Le diagramme de la Fig.24a montre l'évolution de la trajectoire lors du mode en fonction de temps après l'instant d'ouverture de l'interrupteur.

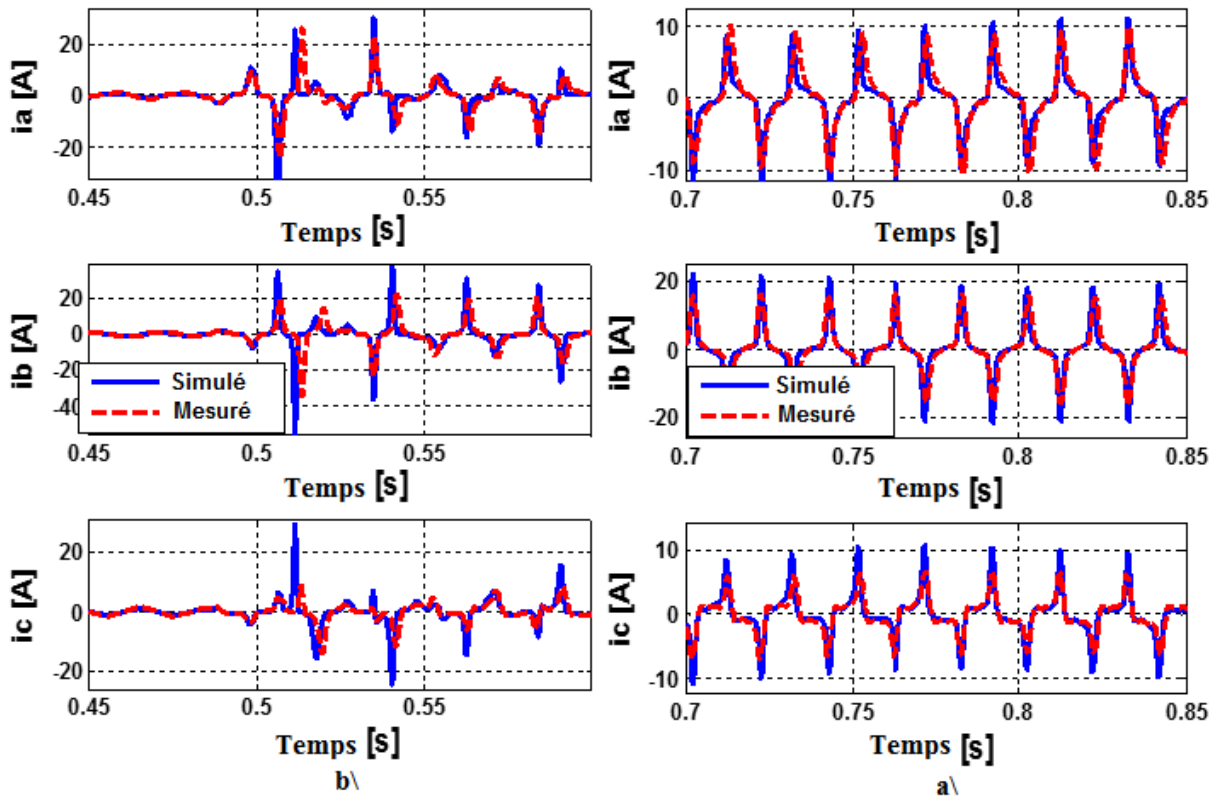


FIGURE 25 – Courants des trois phases durant le mode quasi-périodique  
a/ régime transitoire b/ régime permanent

Les courants des trois phases sont également présentés à la Fig.25. Leur amplitude est importante. Sur les phases A et C elles atteignent 10 A et pour la phase B le courant est de 20A. La phase sur laquelle nous avons placé la capacité est traversée par un courant plus important que celui des deux autres phases.

Les courants obtenus par simulation sont proches de ceux expérimentaux. Ce qui confirme la validité du modèle élaboré.

## 6.4 Mode chaotique

On effectue une simulation pour l'obtention du mode chaotique, on alimente avec une tension de 380V et pour une capacité de  $C_s = 3\mu F$ . Le mode chaotique est obtenu dans les trois phases et les résultats sont présentés à la Fig.26. Les courants obtenus lors de ce mode sont très importants.

Le diagramme de plans de phase Fig.27 montre que la trajectoire n'est pas répétitive.

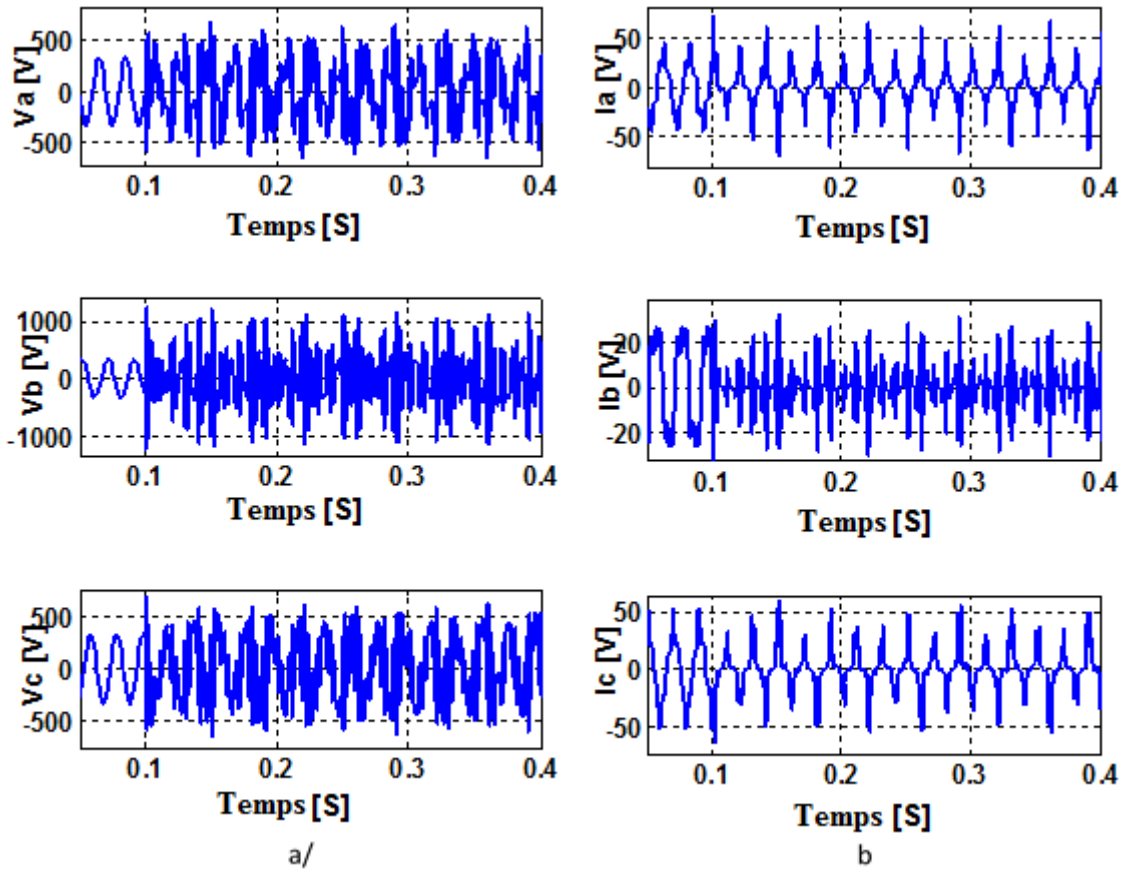


FIGURE 26 – Résultats de simulation du mode chaotique  
a/ Tension b/ courant

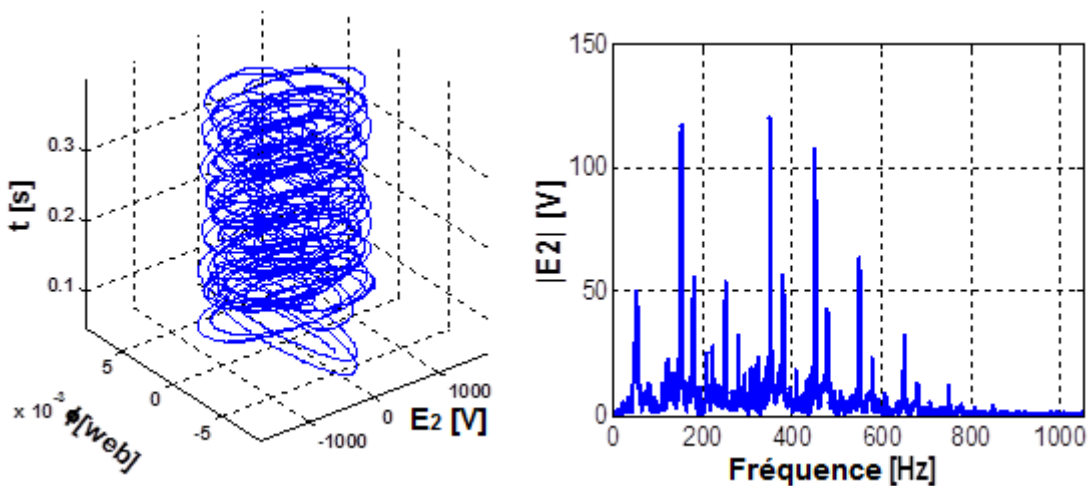


FIGURE 27 – Trajectoire du plan de phase et le spectre de la tension secondaire lors du mode chaotique

## 7 Cas où le neutre est relié

Les résultats de simulation obtenus dans le cas où le neutre est relié sont indiqués aux Figs.28. Les paramètres sont les mêmes pour lesquelles nous avons obtenu le mode

quasi-périodique  $V=220$  V,  $C_s = 20\mu F$ . Le courant de la phase B sur laquelle nous avons placé la capacité  $C_s$  est présenté en Fig.28.a, tandis que les tensions secondaires du transformateur ne changent pas.

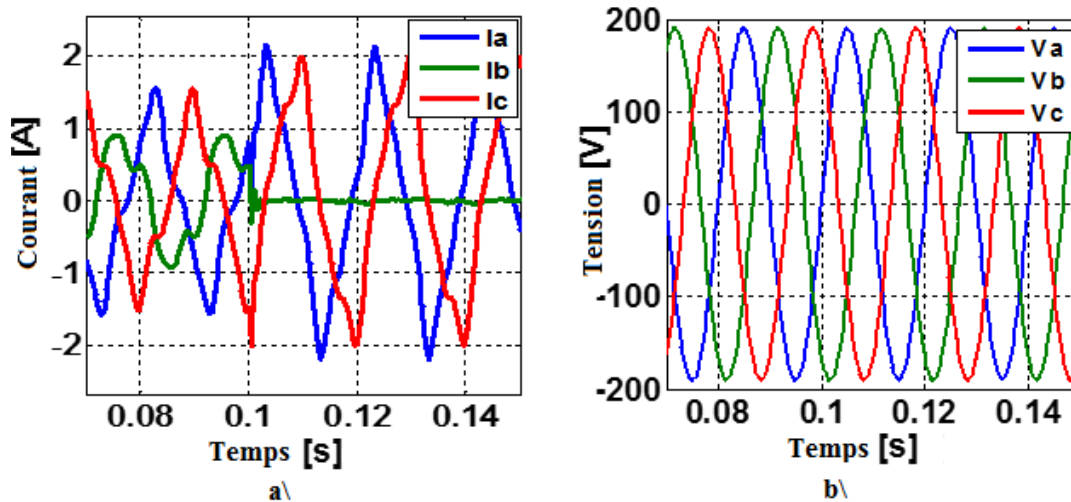


FIGURE 28 – a/ Courant primaire des trois phases b/ Tension secondaire avec cas du neutre relié

## 8 Conclusion

Une situation qui peut survenir dans les réseaux électriques est celle d'un transformateur triphasé asymétrique à vide ou à faible charge, à neutre isolé avec défaut de disjoncteur. Cette situation met le système électrique dans une disposition propice à l'apparition des différents modes de la ferrorésonance. La reproduction d'une telle situation a été effectuée sur un banc d'essai au laboratoire pour voir comment se comporte le réseau électrique pendant l'apparition de ce phénomène. Les résultats obtenus ont montré que le problème de la ferrorésonance doit être pris en considération à cause du danger qui peut engendrer des courants et des tensions d'amplitude très importante aussi bien sur le transformateur que sur le réseau.

Un modèle dynamique, de transformateurs monophasé et triphasé, qui tient compte de l'hystérésis et des courants de Foucault, a été élaboré. Ce modèle a été implémenté sur Matlab/Simulink pour la simulation du phénomène transitoire du transformateur. Il est basé sur la théorie des circuits électromagnétiques utilisant le modèle dynamique de Tellinen. Il a été également validé par la comparaison des résultats expérimentaux avec ceux simulés.

Enfin, nous n'omettons pas de signaler qu'il reste beaucoup à faire dans le domaine de la ferrorésonance notamment pour les transformateurs de grande puissance ainsi que pour les transformateurs spéciaux de haute fréquence utilisés principalement dans le



domaine de l'électronique de puissance.

## Références

- [1] J. Tellinen, "A simple scalar model for magnetic hysteresis," *IEEE Trans. On Magn.*, vol. 34, no. 4, pp. 2200–2206, Jul 1998.
- [2] M. RIOUAL, J.-C. KIENY, and J. MAHSERDJIAN, "Ferro-résonance dans les réseaux modélisation et application aux typologies de circuit," *Techniques de l'ingénieur*, vol. d92, p. 1–15, 2009.
- [3] J.-P. DUBRAZ, "Transformateur de mesure généralités. théorie. fonctionnement," *Techniques de l'ingénieur*, vol. d4720, p. 1–23, 1990.
- [4] G. W. Swift, "An analytical approach to ferroresonance," *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, vol. Pas-88, no. 1, pp. 42–46, January 1969.
- [5] S. Prusty and S. Sanyal, "New approach for study of ferroresonance," *Proc. IEE., Part. G*, vol. 123, no. 9, pp. 916–918, September 1976.
- [6] P. Ferracci, "ferro-résonance," *Group Schneider : Cahier technique*, no. 190, pp. 1–28, Mars 1998.
- [7] P. S. Moses, M. A. Masoum, and H. A. Toliyat, "Impacts of hysteresis and magnetic couplings on the stability domain of ferroresonance in asymmetric three-phase three-leg transformers," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp. 581–592, June 2011.
- [8] E. F. Fuchs and Y. You, "Measurement of  $\lambda-i$  characteristics of asymmetric three-phase transformers and their applications," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 983–990, october 2002.