POLYPUBLIE
Polytechnique Montréal

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE

Titre: Modélisation du four à arc dans le logiciel EMTP-RV
Title:

Auteur: Hassiba Lkoun
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lkoun, H. (2007). Modélisation du four à arc dans le logiciel EMTP-RV [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/7985/
Citation:

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: https://publications.polymtl.ca/7985/
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Jean Mahseredjian, & Louis Dessaint
Advisors:

Programme: Génie électrique
Program:

Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal

https://publications.polymtl.ca

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DU FOUR À ARC DANS LE LOGICIEL EMTP-RV

HASSIBA LKOUN
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE ÉLECTRIQUE)
DÉCEMBRE 2007

©Hassiba Lkoun, 2007

Library and Archives Canada

Published Heritage Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et Archives Canada

Direction du Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 978-0-494-36949-4
Our file Notre référence
ISBN: 978-0-494-36949-4

NOTICE:
The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:
L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DU FOUR À ARC DANS LE LOGICIEL EMTP-RV

présenté par : LKOUN Hassiba
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. OLIVIER Guy, Ph.D, président
M. MAHSEREDJIAN Jean, Ph.D, membre et directeur de recherche
M. DESSAINT Louis, Ph.D, membre et co-directeur
M. LAROSE Christian, M.Sc.A, membre

DÉDICACE

Je dédie ce travail à mes parents.

À ma mère, pour avoir toujours stressé à chacun de mes examens ce qui m'a permis de ne pas le faire.

À mon père, pour m'avoir toujours fait confiance dans les choix de mon cursus scolaire.

REMERCIEMENTS

Je remercie mon directeur de recherche, le professeur Jean MAHSEREDJIAN, pour sa rigueur, ses conseils, son soutien et sa confiance qui m'ont permis d'avancer dans mon projet de recherche.
Je remercie également mon co-directeur, le professeur Louis A.DESSAINT, pour l'aide qu'il m'a apporté, ainsi que son esprit positif et encourageant, Christian LAROSE pour sa franchise, utile pour cerner le cadre du projet.

Mes remerciements s'adressent également à Germain BEAULIEU, Danielle McNABB et à l'équipe d'Hydro Québec TransÉnergie pour leurs remarques et leur expérience des fours à arcs.
Je remercie également la secrétaire du génie électrique Nathalie LÉVESQUE pour m'avoir aidé dans toutes les démarches administratives.

Merci à Sandrine pour son aide lors de la rédaction de ce mémoire, son sourire et sa présence (Merci à Pah et son fameux Toutou Rien), à David pour son aide également, sa patience, son honnêteté, sa gentillesse, sa planche à neige et pour m'avoir fait découvrir la poutine. Un grand merci à ma famille, à Mathilde, à mes collègues sans qui les pauses café auraient eu moins de charme, ainsi qu'à tous ceux qui ont fait de ma vie à Montréal un excellent et très agréable souvenir.

RÉSUMÉ

Les fours à arc sont utilisés en métallurgie pour la fonte des métaux. Ces fours permettent la création d'un arc électrique entre les électrodes du four et les déchets métalliques.
Tous les modèles sont présentés dans l'environnement du logiciel EMTP-RV.
Le but de ce projet est de créer deux modèles de fours à arc (à courant continu et à courant alternatif), afin qu'ils puissent être utilisés lors d'essais en simulation. Dans ce projet, on modélise également un flickermètre, appareil de mesure de papillotement de la tension (ou « flicker »).

À partir du réseau électrique à courant alternatif, on alimente le four à arc en courant continu (cc) à l'aide d'un redresseur et d'un hacheur. Ce modèle est basé sur un article[1] qui compare plusieurs modèles de four à arc à courant continu. Nous nous sommes intéressés au plus récent modèle présenté. L'arc électrique du four cc est considéré comme un circuit RL série. La modélisation de cet arc est dans un premier temps purement mathématique; dans un second temps, il sera modélisé par un circuit RL plus pratique.
Les résultats obtenus sont comparés à ceux présentés dans l'article principal. Des simulations à différents niveaux de tension et de puissance ont été faites, ainsi qu'une simulation avec la modélisation moins mathématique de l'arc électrique.
Le four à courant continu peut aisément être amélioré, particulièrement le système de contrôle du hacheur. Ce modèle peut cependant servir de base à la création d'autres modèles de four cc.

Pour le four à courant alternatif (ca), seul un transformateur abaisseur de tension est utilisé pour alimenter le four. L'arc électrique est également considéré comme un

[1] P.Ladoux, G.P., H.Foch,J.Nuns, *A Comparative Study of AC/DC Converters for High DC Arc Furnace.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, June 2005. **52**(3): p. 747 - 757.

circuit RL série. Cependant, il existe quatre modèles de résistance d'arc, ces modèles vont du plus simple au plus complexe (modèle statique, sinusoïdal, gaussien et chaotique).
On effectue une évaluation du papillotement de la tension conformément aux normes en vigueur pour chaque modèle de résistance d'arc. Deux méthodes de validation ont été mises au point afin de valider les résultats obtenus pour chacun des quatre modèles de la résistance d'arc.

Le flickermètre est un appareil mesurant le papillotement de la tension (ou « flicker »). Ce modèle est expliqué en annexe du présent document. Il sert à l'évaluation du four à arc à courant alternatif et satisfait aux exigences de la CEI (Commission Électrotechnique Internationale) [2].
Les tests de validations effectués ont été recommandés par la norme en vigueur.

ABSTRACT

Arc furnaces are used for steel making. Thanks to these furnaces, an electrical arc is created between the electrodes' furnace and metal waste in order to create steel.
The aim of this project is to create two arc furnace models: direct current and alternative current furnace. These models are supposed to be complete and realistic, in order to be used for simulations tests. In this project, we also present a flickermeter model.
All models are presented in the EMTP-RV software environment.

The ac electrical network feeds the dc arc furnace thanks to a rectifier and a dc/dc converter. This model is based on an article[2] which compares several dc arc furnaces models. We are interested in the most recent model presented.
The results are then compared to the one obtained in the main article. We also simulate at different voltage and power level.
The dc furnace could easily be improved, especially the chopper control system. But this model could be used to create others dc furnace models.

To feed the ac furnace, it uses a transformer to reduce voltage. The electrical arc is modeled as an RL series circuit. However, there are four arc resistance models: static, sinusoidal, normal and chaotic.
An evaluation of voltage flicker is carried out in accordance with the standards for each arc resistance model. Two methods of validation were developed to validate the results of each arc resistance model.

[2] P.Ladoux, G.P., H.Foch,J.Nuns, *A Comparative Study of AC/DC Converters for High DC Arc Furnace.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, June 2005. **52**(3): p. 747 - 757.

The flickermeter is a device to measure voltage flicker. This model is explained in the first appendix of this document. It is used for the evaluation of the ac arc furnace. The validation tests carried out were advised by the standards.

This model satisfies to IEC requirements (International Electrotechnical Commission)[2]. It is completely usable and reliable for simulations.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE iv

REMERCIEMENTS v

RÉSUMÉ vi

ABSTRACT viii

TABLE DES MATIÈRES x

LISTE DES TABLEAUX xiv

LISTE DES FIGURES xv

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS xx

INTRODUCTION 1

CHAPITRE 1 FOUR À COURANT CONTINU 3

1.1. Qu'est-ce qu'un four à arc cc? [3] 3

1.2. Présentation du montage sous EMTP-RV 4

1.3. Les transformateurs 5

1.4. Convertisseur ca/cc 7

1.5. Convertisseur cc/cc 10

1.5.1. Fonctionnement général du convertisseur 10

1.5.2. Principe de fonctionnement du hacheur simple 11

1.5.3. Principe de contrôle des IGBT 14

1.6. Modèle de l'arc électrique du four cc 16

1.6.1. Premier modèle d'arc 18

1.6.2. Deuxième modèle d'arc 21

1.7. Résultats 23

1.7.1. Résultats pour le 1er modèle d'arc (P_{ref}=100 MW, V_{ref}=800 V) : 23
1.7.2. Résultats pour le 2nd modèle d'arc (P_{ref}=100 MW, V_{ref}=800 V): 26
1.7.3. Résultats combinés : 29

CHAPITRE 2 FOUR À COURANT ALTERNATIF 33

2.1. Modèle triphasé du four à arc ca 33
2.1.1. Modèle statique R_{arc} [9] 36
2.1.2. Modèle sinusoïdal de R_{arc} [10] 38
2.1.3. Modèle gaussien de R_{arc} [10] 39
2.1.4. Modèle chaotique de R_{arc} [12] 40

2.2. Formes d'ondes du four ca 41
2.2.1. Modèle de R_{static} 42
2.2.2. Modèle de R_{sinus} 43
2.2.3. Modèle de R_{gauss} 44
2.2.4. Modèle de R_{chaos} 45

2.3. Détermination de la sévérité du flicker et de la variation de tension au PCC (Point of Common Coupling) 46
2.3.1. Procédure d'évaluation 46
2.2.2. Modèle 1 : R_{arc} statique. 49
2.2.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}. 50
2.2.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}. 53
2.2.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}. 54

2.3. Utilisation des caractéristiques électriques du four à arc 57
2.3.1. Procédure d'évaluation 57
2.3.2. Modèle 1 : pas de variation de R_{arc}. 57
2.3.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}. 59
2.3.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}. 61
2.3.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}. 62

2.4. Étude des spectres et des harmoniques 64

2.4.1. Procédure d'évaluation 64

2.4.2. Modèle 1 : pas de variation de R_{arc}. 65

2.4.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}. 67

2.4.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}. 69

2.4.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}. 71

2.4.6. Récapitulatif 74

CONCLUSION 76

RÉFÉRENCE 77

ANNEXE A : Flickermètre [2] 79

A.1. Présentation du modèle 79

A.1.1. Bloc « Adaptation de la tension d'entrée» 80

A.1.2. Ensemble « Lampe-œil-cerveau » 80

A.1.3. Évaluation de la sévérité du flicker 82

A.1.4. Fonctionnement du module « Calcul de P_{st} » 84

A.2. Tests pour validation 86

A.2.1. Fluctuation sinusoïdale de la tension : 89

A.2.2. Fluctuation rectangulaire de la tension : 91

CONCLUSION 93

ANNEXE B : Documentation du four à arc à courant continu. 94

A. Les transformateurs 94

B. Convertisseur ca/cc 95

C. Convertisseur cc/cc 96

D. Modèle de l'arc électrique 99

ANNEXE C : Documentation du four à arc à courant alternatif. 105

A. Le transformateur ____ **105**

B. Le modèle de l'arc électrique ____ **106**

C. Le modèle de l'inductance d'arc L_{arc} ____ **110**

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1: Réponse normalisée d'un flickermètre 48

Tableau 2.2 : Niveau de compatibilité des réseaux pour les harmoniques de tension [3]64

Tableau 2.3: Représentation des courants harmoniques d'un four à arc [3] 64

Tableau 2.4 : Amplitude (en % de la fondamentale) des harmoniques de courant de tous les modèles de R_{arc} 74

Tableau 2.5 : Amplitude (en % de la fondamentale) des harmoniques de tension de tous les modèles de R_{arc} 75

Tableau A.1 : Réponse normalisée d'un flickermètre pour des fluctuations sinusoïdales de la tension [2] 87

Tableau A.2 : Réponse normalisée d'un flickermètre pour des fluctuations rectangulaires de la tension [2] 88

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Montage complet du four cc 4
Figure 1.2 : Modèle des tranformateurs 5
Figure 1.3 : Modèle du transformateur YgYg 200 kV/33 kV 6
Figure 1.4 : Modèle du transformateur DYgYg 33 kV/1.4 kV 6
Figure 1.5 : Pont à diodes 8
Figure 1.6: Diode non idéale 8
Figure 1.7 : Redresseur ca/cc et filtre LC de lissage 8
Figure 1.8: Tension à l'entrée du convertisseur ca/cc 9
Figure 1.9:Tension à la sortie du redresseur 9
Figure 1.10 : Courant à la sortie du redresseur 10
Figure 1.11: Mise en parallèle de 3 hacheurs 11
Figure 1.12 : Modèle de l'IGBT 11
Figure 1.13 : Modèle non linéaire de la diode 12
Figure 1.14 : Caractéristique VI de la diode du modèle de l'IGBT 12
Figure 1.15 : Modèle du hacheur simple 14
Figure 1.16 : Comparaison du courant d'arc filtré et non filtré 15
Figure 1.17: Contrôle en puissance du hacheur 16
Figure 1.18 : Modèle de R_{arc} 17
Figure 1.19 : Modélisation de la résistance d'arc R_{arc} 17
Figure 1.20: Modèle de l'arc électrique du four CC 18
Figure 1.21 : Composant utilisé pour représenter l'arc électrique 19
Figure 1.22 : Modélisation de l'arc électrique dans EMTP-RV 19
Figure 1.23 : Deuxième modèle de l'arc électrique 21
Figure 1.24 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc} 21
Figure 1.25:Tension à la sortie du convertisseur cc 23
Figure 1.26: Puissance à la sortie du convertisseur cc 24
Figure 1.27: Puissance en pu à la sortie du convertisseur cc 24

Figure 1.28 : Courant à la sortie du convertisseur cc 25
Figure 1.29 : Facteur de puissance du four à arc 25
Figure 1.30 : Tension du four à arc 26
Figure 1.31 : Puissance du four à arc 27
Figure 1.32 : Puissance en pu du four à arc 27
Figure 1.33 : Facteur de puissance du four à arc 28
Figure 1.34 : Courant du four à arc 28
Figure 1.35 : Tension du four à arc 29
Figure 1.36 : Puissance du four à arc 30
Figure 1.37 : Puissance du four à arc en pu 30
Figure 1.38 : Facteur de puissance du four à arc 31
Figure 1.39 : Courant du four à arc 31
Figure 2.1 : Montage d'alimentation du four ca 33
Figure 2.2 : Modèle de l'arc électrique pour la phase a 34
Figure 2.3 : Les 4 modèles de R_{arc} 34
Figure 2.4 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc} 35
Figure 2.5 : Caractéristique V-I du four à arc [9] 36
Figure 2.6 : Approximation linéaire de la caractéristique V-I de l'arc électrique 37
Figure 2.7 : Représentation temporelle de R_{static} 38
Figure 2.8 : Représentation temporelle de R_{sinus} 39
Figure 2.9 : Représentation temporelle de R_{gauss} 40
Figure 2.10 : Représentation chaotique de R_{arc} en fonction du temps 41
Figure 2.11 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc statique 42
Figure 2.12 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc statique 42
Figure 2.13 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc sinusoïdale 43
Figure 2.14 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc statique 43
Figure 2.15 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc gaussien 44
Figure 2.16 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc gaussien 44
Figure 2.17 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc chaotique 45

Figure 2.18 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc chaotique 45
Figure 2.19 : Variation de la tension en pourcent en fonction du nombre de variations par minute pour P_{st}=1[3]. 47
Figure 2.20 : Exemple de tension à variations rectangulaires 47
Figure 2.21 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle statique 49
Figure 2.22 : Tension au PCC 50
Figure 2.23 : Zoom de la Figure 2.21, tension au PCC 50
Figure 2.24 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle sinusoïdal 51
Figure 2.25 : Tension au PCC 52
Figure 2.26 : Zoom de la figure 2.24, tension au PCC 52
Figure 2.27 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle gaussien 53
Figure 2.28 : Tension au PCC 54
Figure 2.29 : Zoom de la figure 2.28, tension au PCC 54
Figure 2.30 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle chaotique 55
Figure 2.31 : Tension au PCC 56
Figure 2.32 : Zoom de la figure 2.31, tension au PCC 56
Figure 2.33 : Caractéristiques électriques du four [13] 57
Figure 2.34 : V_{arc} en pu en fonction de I_{arc} en pu 58
Figure 2.35 : Facteur de puissance du four en fonction de I_{arc} en pu 58
Figure 2.36 : Q_{arc} en fonction de I_{arc} en pu 59
Figure 2.37 : V_{arc} en pu en fonction de I_{arc} en pu 59
Figure 2.38 : Facteur de puissance du four en fonction de I_{arc} en pu 60
Figure 2.39 : Q_{arc} en fonction de I_{arc} en pu 60
Figure 2.40 : V_{arc} (en pu) fonction de I_{arc} (en pu) 61
Figure 2.41 : Facteur de puissance du four fonction de I_{arc} en pu 61
Figure 2.42 : Q_{arc} fonction de I_{arc} (en pu) 62
Figure 2.43 : V_{arc} (en pu) fonction de I_{arc} (en pu) 62
Figure 2.44 : Facteur de puissance du four fonction de I_{arc} (en pu) 63
Figure 2.45 : Q_{arc} fonction de I_{arc} (en pu) 63

Figure 2.46 : Spectre du courant au PCC 65
Figure 2.47 : Spectre de la tension au PCC 65
Figure 2.48 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7. 66
Figure 2.49 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7. 66
Figure 2.50 : Spectre de courant au PCC 67
Figure 2.51 : Spectre de tension au PCC 68
Figure 2.52 : Harmonique de courant du rang 2 à 7 68
Figure 2.53 : Harmonique de tension du rang 2 à 7 69
Figure 2.54 : Spectre du courant au PCC 69
Figure 2.55 : Spectre de la tension au PCC 70
Figure 2.56 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7. 70
Figure 2.57 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7. 71
Figure 2.58 : Spectre du courant au PCC 72
Figure 2.59 : Spectre de la tension au PCC 72
Figure 2.60 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7. 73
Figure 2.61 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7. 73
Figure A.1 : Modèle du flickermètre 79
Figure A.2 : Modèle du bloc « Adaptation de la tension d'entrée » 80
Figure A.3 : Modèle du bloc « Lampe » 81
Figure A.4 : Modèle du bloc « Filtre suppresseur » 81
Figure A.5 : Modèle du bloc « Œil-Cerveau » 82
Figure A.6 : Module « Calcul de P_{st} » utilisé sous EMTP-RV pour le calcul du P_{st} 83
Figure A.7 : Fichier Pst.m permettant le calcul de la sévérité 85
Figure A.8 : Fichier Script_PST.dwj 85
Figure A.9 : Fichier Test du flickermeter aux fluctuations sinusoïdales. 89
Figure A.10 : V_{sin} pour le test aux fluctuations sinusoïdales de la tension. 90
Figure A.11 : Sensation instantanée du flicker I_{FL} pour V_{sin} 90
Figure A.12 : Test du flickermètre aux fluctuations rectangulaires. 91
Figure A.13 : V_{square} pour le test aux fluctuations sinusoïdales de la tension. 92

Figure A.14 : Sensation instantanée du flicker I_{FL} pour V_{square} 92
Figure B.1 : Modèle général du four à arc à courant continu 94
Figure B.2 : Modèle des transformateurs 94
Figure B.3 : Pont à diodes 95
Figure B.4 : Modèle de la diode non idéale 96
Figure B.5 : Convertisseur ca/cc et filtre LC de lissage 96
Figure B.6 : Modèle du convertisseur cc/cc 97
Figure B.7 : Mise en parallèle de 3 hacheurs 97
Figure B.8 : Modèle de contrôle du hacheur 98
Figure B.9 : Modélisation de la résistance d'arc R_{arc} 99
Figure B.10: Modèle de l'arc électrique du four cc 100
Figure B.11 : Composant utilisé pour représenter l'arc électrique 100
Figure B.12 : Modélisation de l'arc électrique dans EMTP-RV 101
Figure B.13 : Deuxième modèle de l'arc électrique 103
Figure B.14 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc} 103
Figure C.1 : Modèle du four à arc à courant alternatif 105
Figure C.2 : Modèle de l'arc électrique pour la phase a 106
Figure C.3 : Les 4 modèles de R_{arc} 107
Figure C.4 : Caractéristique V-I du four à arc 107
Figure C.5 : Approximation linéaire de la caractéristique V-I de l'arc électrique 108
Figure C.6 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc} 110

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

C_1 : Coefficient du modèle chaotique

ca : Courant alternatif

cc : Courant continu

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

EMTP-RV: Electromagnetic Transients Program-Restructured Version

E_{PRI} : Tension au primaire d'un transformateur

E_{SEC} : Tension au secondaire d'un transformateur

f_{com} : Fréquence de commutation

f_{cut} : Fréquence de coupure d'un filtre

FFT : Fast Fourier Transform (Transformée de Fourier rapide)

Flicker : Papillottement de la tension

FP : Facteur de puissance

I_{arc} : Courant de l'arc électrique

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistor (Transistor bipolaire à grille isolée)

I_{FL} : Sensation instantanée du flicker

I_{pu} : Courant de l'arc électrique par unité

L_{arc} : Inductance de l'arc électrique

L_{ini} : Inductance d'initialisation

L_{PRI} : Inductance vue du primaire d'un transformateur

L_{SEC} : Inductance vue du secondaire d'un transformateur

MVA : Méga Volt Ampère

P_{arc} : Puissance active de l'arc électrique

PCC : Point de Couplage Commun (Point of Common Coupling)

P_{st} : Sévérité du flicker

pu : par unité

Q_{arc} : Puissance réactive de l'arc électrique

R_{arc} : Résistance de l'arc électrique

R_{arc_mean} : Résistance moyenne de l'arc électrique

Rand : Distribution uniforme entre 0 et 1

R_{chaos} : Modèle chaotique de la résistance d'arc

R_{gaus} : Modèle gaussien de la résistance d'arc

R_{sinus} : Modèle sinusoïdale de la résistance d'arc

R_{static} : Modèle statique de la résistance d'arc

RMS : Valeur efficace (Root Mean Square)

ScopeView : Programme de visualisation de forme d'ondes dans EMTP-RV

STATCOM : Compensateur Statique (Static Compensator)

SVC : Compensateur statique d'énergie réactive (Static Var Compensator)

X_{arc} : Réactance d'arc

$\frac{\Delta V}{V}$: Variation de la tension au PCC

V_{arc} : Tension de l'arc électrique

V_{pu} : Tension de l'arc électrique par unité

V_{sin} : Tension aux fluctuations sinusoïdales

V_{square} : Tension aux fluctuations rectangulaires

INTRODUCTION

Cette étude porte sur les fours à arc. Elle se situe dans le cadre d'un projet de la Chaire de simulations des réseaux d'Hydro Québec TransÉnergie et l'École de Technologie Supérieure.

Le but de ce projet de recherche est de développer des modèles complets et réalistes. Ces modèles permettront d'effectuer des essais en simulation.

Les trois modèles présentés dans le présent mémoire sont : un four à arc à courant continu, un four à courant alternatif et un flickermètre.

Les fours à arc sont utilisés dans la métallurgie pour la fabrication de l'acier.

Le modèle du four à courant continu (cc) est basé sur une étude faite en France [1]. Cette étude tend à comparer les différents modèles de four cc existants et elle s'attarde sur le modèle le plus récent, celui qui est modélisé.

Le four à courant alternatif (ca) utilise les informations d'un modèle existant sous EMTP-RV. Ce four est le plus largement répandu et il est beaucoup moins coûteux que le four cc. Toutes les études menées sur le four à arc ca utilisent des modèles plus ou moins complexes de l'arc électrique, ces modèles sont basés sur la caractéristique tension-courant de l'arc électrique. Dans cette étude, quatre modèles différents, et de complexité croissante, ont été considérés.

Le flickermètre est, quant à lui, un appareil de mesure permettant l'évaluation du papillotement de la tension (ou « flicker »), la modélisation est présentée dans la norme CEI [2]. Cet appareil de mesure nous permettra d'évaluer le modèle du four ca, conformément aux normes en vigueur.

Les résultats obtenus dans chaque modèle développé font l'objet de comparaison, de validations et/ou d'évaluations.

Le premier chapitre décrit en détail le modèle du four à arc à courant continu, ainsi que les différents résultats obtenus.
Le second chapitre traite du modèle du four à courant alternatif. Dans ce chapitre, quatre modèles de résistance d'arc sont décrits. Une évaluation et deux méthodes de validation sont expliquées, et utilisées pour chaque modèle de résistance d'arc.
En conclusion, l'intérêt des modèles et les améliorations futurs possibles sont présentés.

Ce présent mémoire comprend également trois annexes. L'annexe A décrit le modèle du flickermètre conformément à la norme CEI [2]. Cette annexe contient également des tests de validation proposés dans la norme CEI [2]. Les annexes B et C sont des documents pour les utilisateurs des modèles des fours cc et ca.

CHAPITRE 1 FOUR À COURANT CONTINU

1.1. Qu'est-ce qu'un four à arc cc? [3]

Les fours à arc sont utilisés dans des aciéries pour la fonte des métaux. Un four à arc se compose principalement d'une cuve, destinée à recevoir la ferraille, et d'électrodes de graphite. L'énergie nécessaire pour fondre la ferraille est fournie par des arcs électriques jaillissant entre les électrodes et la charge.

L'élaboration de l'acier dans un four à arc se déroule en 3 étapes :

- l'amorçage : les électrodes creusent leurs puits à travers la ferraille froide. Généralement la puissance et la tension ne sont pas maximales (≈ 40 MW, 400 V).
- la fusion : la charge est fondue. Pour cela, on agit à puissance et tension maximales (≈ 100 MW, 800 V).
- l'affinage : on augmente la température de l'acier jusqu'à la température de coulée. Cette étape est généralement faite par un four poche, qui est un four à courant alternatif de puissance plus réduite (de l'ordre de 18 MVA) [4] que celui utilisé lors des 2 étapes précédentes.

Dans le cas d'un four à courant continu, le fonctionnement de l'arc est plus stable que celui d'un four à courant alternatif, car le four est alimenté en courant continu. Il n'est donc plus perturbé par les passages à zéro de l'alternance de courant. Cependant, la charge métallique perturbe (comme pour le four ca) le fonctionnement de l'arc, ce qui se traduit par des variations du courant d'arc pouvant aller jusqu'à des courts-circuits ou des interruptions de service.

Dans ce type de four, la puissance est régulée par des convertisseurs commandés. Cette régulation est rapide et permet de compenser les variations de courant dues à l'instabilité des arcs.

En comparaison au four ca, le circuit électrique du four cc ne se ferme pas dans le métal, mais un retour de courant vers les redresseurs est assuré par des électrodes placées dans la sole[3] du four.

Toujours en comparant au four ca, les avantages du four cc sont les suivants :

- les électrodes de graphite s'usent moins (la dissipation d'énergie le long de l'arc est supérieure du côté de la ferraille).
- le redresseur permet le maintien du courant continu constant, ce qui permet une réduction des fluctuations d'énergie réactive et donc du papillotement.

1.2. Présentation du montage sous EMTP-RV

Le four à arc cc triphasé est composé [1]:

- de transformateurs,
- d'un convertisseur ca/cc,
- d'un convertisseur cc/cc et
- d'un modèle d'arc du four cc

Le schéma correspondant à un tel agencement est présenté à la figure 1.1. Cette configuration est basée sur un article IEEE paru en juin 2005 [1] et permet de ne pas utiliser des compensateurs tels que STATCOM et SVC.

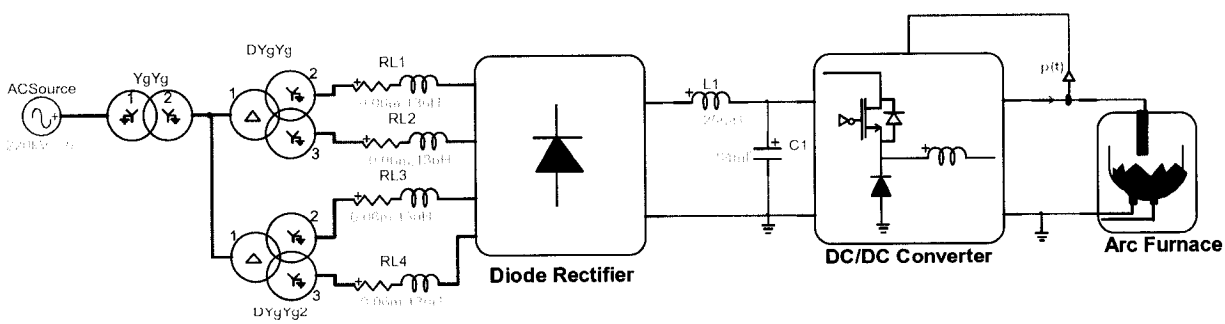

Figure 1.1: Montage complet du four cc

[3] Sole : partie inférieure du four sur laquelle se fait le chargement des matières à fondre, et où se rassemble le métal fondu.

Le four à courant continu est alimenté par une source triphasée équilibrée de 220 kV. La tension aux bornes du four à arc est de l'ordre de 800 V en continu. Il faut alors passer de 220 kV alternatif à 800 V continu en sortie. Le montage en amont du four cc nous permet d'obtenir cette tension.

Chaque simulation effectuée dure 3 secondes avec un pas de calcul $\Delta t=130$ µs.

Dans les sections suivantes, le fonctionnement du montage sera expliqué de manière plus détaillée.

1.3. Les transformateurs

Dans ce modèle, il existe deux types de transformations (Fig.1.2). Les transformateurs ont été créés à partir d'unités idéales de transformation, présentes dans la librairie de EMPT-RV.

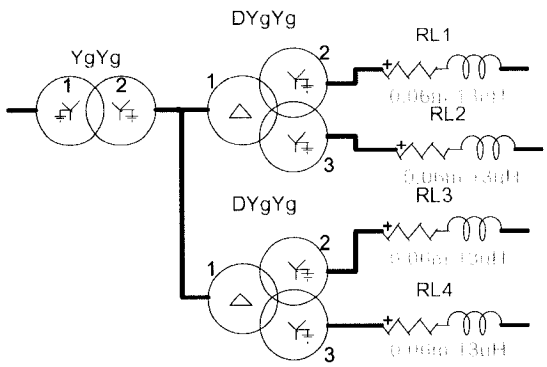

Figure 1.2 : Modèle des tranformateurs

À partir du réseau, on effectue une première transformation YgYg 220 kV/33 kV, les enroulements primaire et secondaire sont du type étoile et le neutre est raccordé à la terre (Fig. 1.3).

Puis une seconde transformation est faite à l'aide de deux transformateurs à double enroulements DYgYg 33 kV/1,4 kV, l'enroulement primaire est un triangle alors que les deux enroulements secondaires sont du type étoile dont le neutre est raccordé à la terre (Fig. 1.4).

Avec cette configuration, 4 convertisseurs à 6 impulsions sont mis en parallèle. Le montage utilisé est celui présentée dans la référence [5].

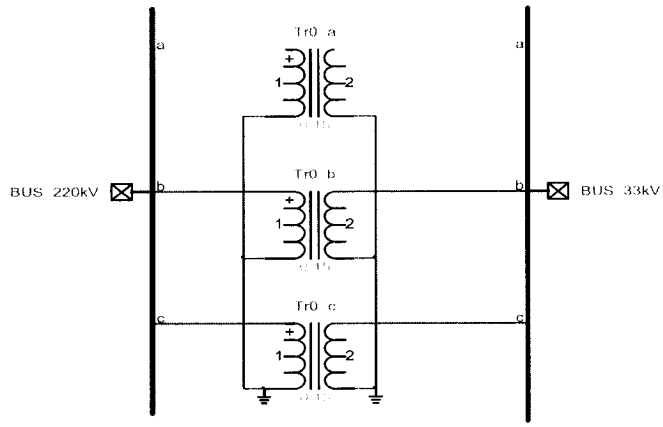

Figure 1.3 : Modèle du transformateur YgYg 200 kV/33 kV

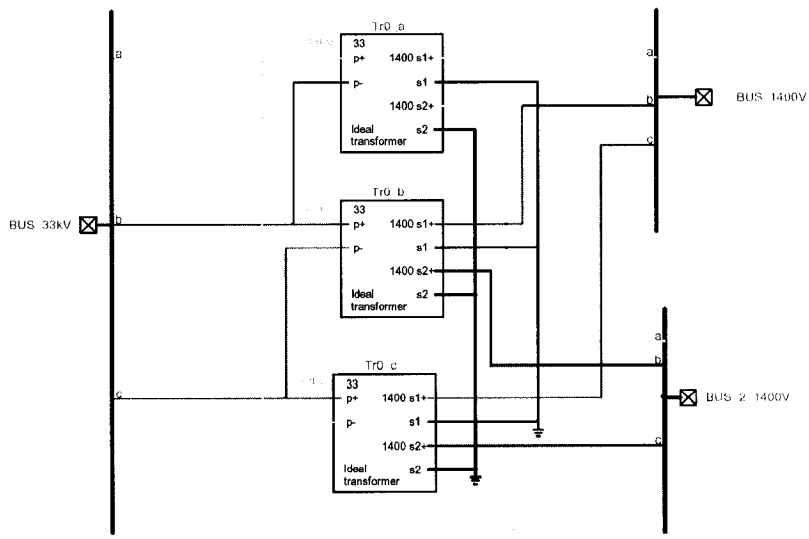

Figure 1.4 : Modèle du transformateur DYgYg 33 kV/1,4 kV

Tous ces transformateurs sont considérés comme idéaux à ce stade de l'étude. Cependant, une résistance et une inductance équivalentes ont été ajoutées à l'externe pour tenir compte des imperfections des transformateurs. Ces impédances ont été

ajoutées au secondaire du second transformateur (côté 1,4 kV). Les valeurs des composants RL sont issues du modèle présenté dans la référence [1].

La validité de ces composants va être déterminé à partir de leur valeurs en pu (par unité). Les données des impédances sont :

$R = 60\ \mu\Omega$

$L = 13\ \mu\text{H}$

Les grandeurs de base sont :

$P_{base} = 200\ \text{MVA} =$ *puissance nécessaire pour alimenter le montage* (P_{PCC}).

$V_{base} = 1.4\ \text{kV}$ = *tension nominale*

$Z_{base} = \dfrac{3V_{base}^2}{P_{base}} = 0.0294\ \Omega =$ *impédance de base*

Les valeurs précédentes de R et L correspondent en pu à :

$$R_{pu} = \frac{R}{Z_{base}} = \frac{60\ \mu\Omega}{0.0294} = 0.00204\ \text{pu}$$

$$X_{pu} = \frac{\omega L}{Z_{base}} = \frac{2\pi f * 13\ \mu\text{H}}{0.0294} = 0.139\ \text{pu}$$

Les valeurs des impédances en pu sont réalistes.

1.4. Convertisseur ca/cc

Le convertisseur ca/cc (« Diode Rectifier » sur la Fig.1.1) est constitué de 4 ponts à diodes non idéales (Fig.1.5). Le modèle de la diode non idéale est montré à la Figure 1.6. Il comprend une diode D1 de type idéal, une tension continue Vf de 0,7 V, une résistance de polarisation inverse Rd et une inductance Lt en série avec D1.

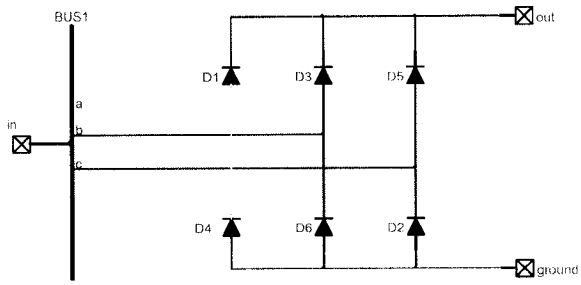

Figure 1.5 : Pont à diodes

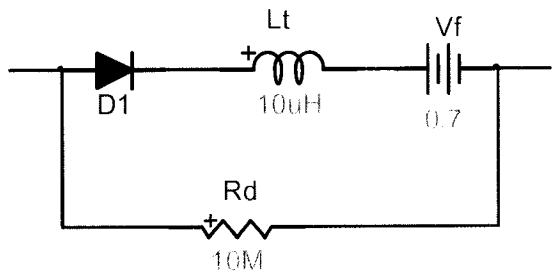

Figure 1.6: Diode non idéale

Ce redresseur permet d'obtenir en sortie une tension continue. Cette tension continue est en fait obtenue à l'aide d'un filtre LC qui lisse la tension et le courant de sortie du redresseur (Fig.1.7). Le fait de lisser le courant de sortie du redresseur permet d'éviter des sauts de courant qui se répercuteraient sur le four à arc cc par la suite.

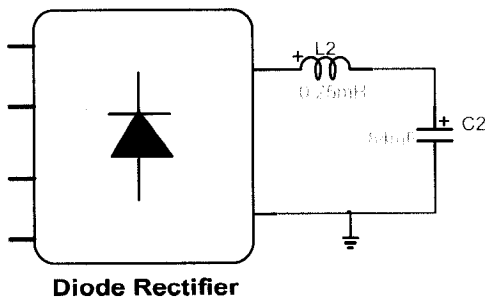

Figure 1.7 : Redresseur ca/cc et filtre LC de lissage

À la sortie du redresseur, on obtient alors une tension et un courant continus. Il faut quelques millisecondes à ces grandeurs pour se maintenir quasi constantes. C'est le temps nécessaire à l'initialisation.

La tension est limitée par les deux transformateurs en amont du convertisseur qui permet d'obtenir une tension sinusoïdale de l'ordre de 1000 V (Fig. 1.8).

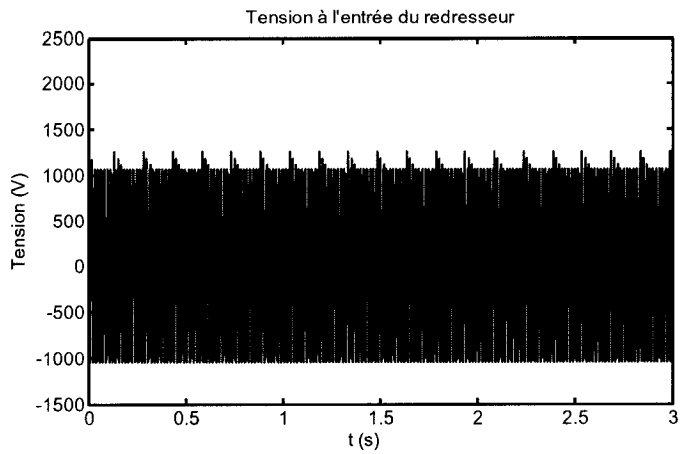

Figure 1.8: Tension à l'entrée du convertisseur ca/cc

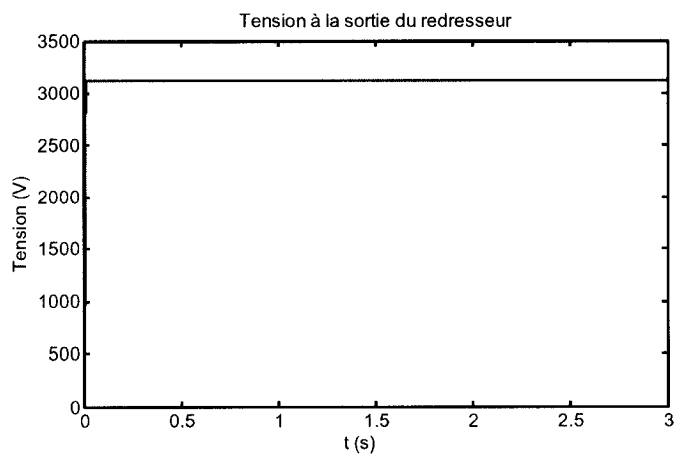

Figure 1.9:Tension à la sortie du redresseur

Cette tension continue (Fig.1.9) est obtenue avant la mise en place du reste du montage (soit le convertisseur cc/cc et le four à arc), ce qui explique une valeur relativement élevée. En effet d'après l'article [1], il est convenu d'obtenir une tension de l'ordre de 1200 V continue à la sortie du redresseur. Cependant, après diverses simulations, des

filtres (Fig.1.7 et 1.11) ont été ajoutés à notre modèle afin d'atteindre les objectifs (Ces filtres n'étaient pas présents dans l'article sur lequel ce modèle est basé). Les composants de ces filtres créent des chutes de tension, il a donc été nécessaire d'augmenter la tension fournie par le montage en amont du redresseur.

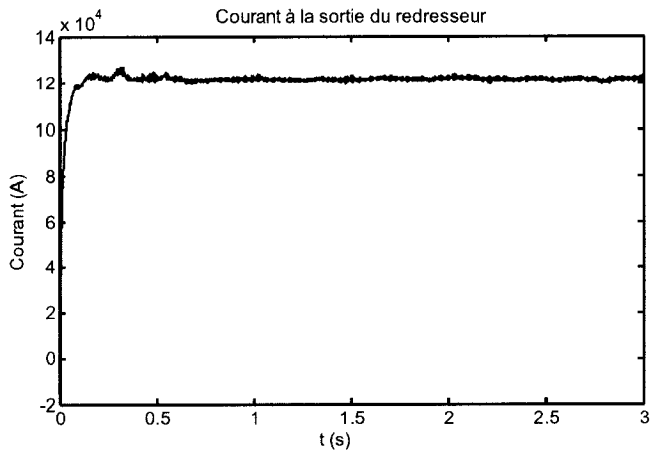

Figure 1.10 : Courant à la sortie du redresseur

La valeur de l'inductance de lissage à la sortie du redresseur a été fixée dans le but de minimiser les variations du courant à ce niveau, car des sauts de courants ne sont pas souhaitables en pratique. À la Figure 1.10, on constate qu'il n'y a pas de sauts de courant notables sur le courant de sortie du redresseur.

1.5. Convertisseur cc/cc

1.5.1. Fonctionnement général du convertisseur

Le convertisseur cc/cc est constitué de plusieurs blocs (64) contenant chacun 3 hacheurs simples mis en parallèle.

À la suite de simulations, un condensateur a été ajouté à chaque branche afin de constituer un filtre passe-bas avec l'inductance de lissage (Fig.1.11) améliorant ainsi les résultats.

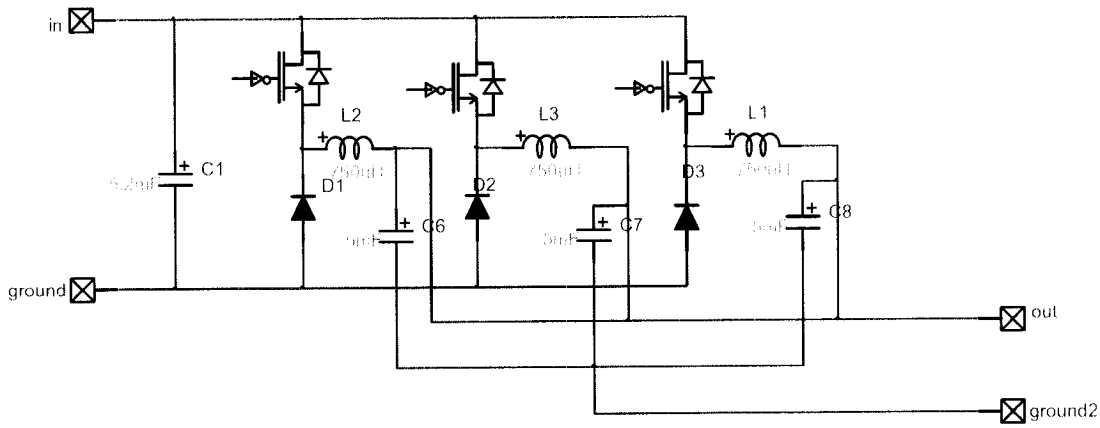

Figure 1.11: Mise en parallèle de 3 hacheurs

Le nombre de hacheurs simples (64 au total) mis en parallèle permet d'obtenir la puissance nécessaire pour alimenter le four cc. Ce nombre dépend également des pertes dans les IGBTs et de la température de ces semi-conducteurs [1].

1.5.2. Principe de fonctionnement du hacheur simple

Dans cette partie, le modèle de l'IGBT utilisé sera détaillé, le fonctionnement d'un hacheur simple sera ensuite expliqué.

Un IGBT est un transistor dont la conduction est amorcée et désamorcée en appliquant une tension appropriée sur la grille G. Sous EMTP-RV, l'IGBT a été modélisé comme sur la Figure 1.12.

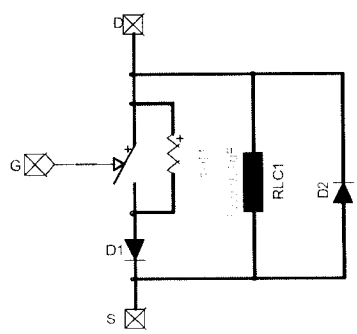

Figure 1.12 : Modèle de l'IGBT

L'IGBT est un transistor et de manière simple, il agit comme une diode. Le circuit RL est un amortisseur, dont le rôle est de réduire les oscillations, et de supprimer l'augmentation rapide de la tension dans la diode D1 afin d'éviter un blocage rapide de celle-ci. La diode D2 est une diode de roue libre, afin d'éviter des pics de courant lors des commutations. La diode D1 est non idéale, elle est représentée à l'aide d'une résistance non linéaire (Fig.1.13). Cette résistance non linéaire est représentée par la caractéristique VI d'une diode (Fig.1.14).

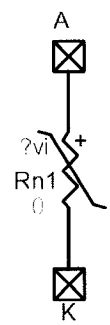

Figure 1.13 : Modèle non linéaire de la diode

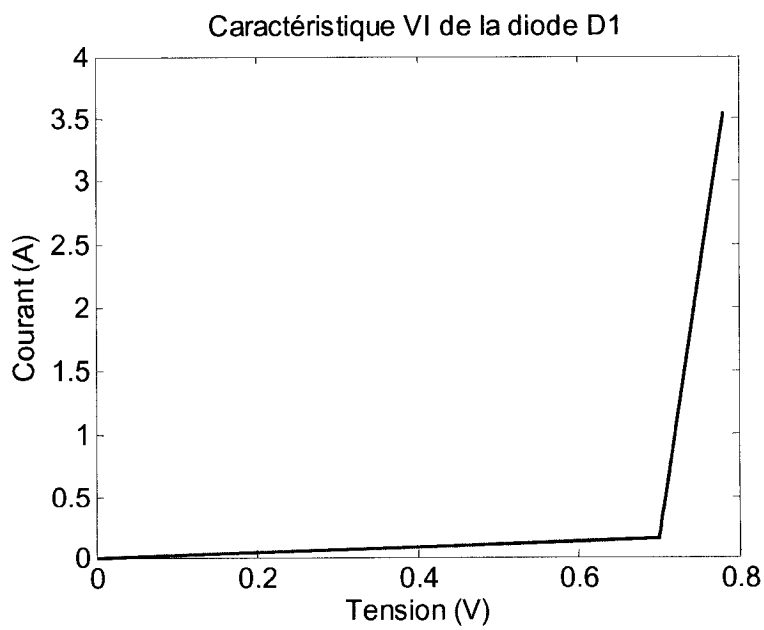

Figure 1.14 : Caractéristique VI de la diode du modèle de l'IGBT

La caractéristique tension-courant de la diode a la forme présentée à la Figure 1.14. Elle est basée sur le modèle dynamique de la diode, définie par l'équation suivante :

$$I_D = I_s(\exp(V_D/V_T)-1) \quad (1)$$

Où I_D et V_D sont respectivement le courant et la tension aux bornes de la diode

$I_s = 10^{-13}$ A

V_T = 25 mV = le potentiel thermique correspondant à une température de 20°C environ.

Un hacheur simple est constitué d'un IGBT, d'une diode non idéale et d'une inductance de lissage (Fig.1.15). Les valeurs de ces composants sont celles utilisées dans un modèle simulé sous Matlab/Simulink [1].

Lorsqu'un signal strictement positif est appliqué sur la grille, l'interrupteur devient fermé. La diode D1 devient passante, $V_B = V_A$.

Lorsqu'un signal négatif ou nul est appliqué sur la grille, l'interrupteur devient ouvert. La diode D1 se bloque, $V_B \neq V_A$.

Ce fonctionnement simple permet alors de hacher la tension de sortie. En appliquant un contrôle sur la grille, on peut obtenir la tension souhaitée en sortie.

Lorsque la diode D1 est passante, la tension aux bornes de $D_{hacheur}$ est négative ($V_{D_hacheur} = -V_B$), $D_{hacheur}$ est alors bloquée, aucun courant ne la traverse.

Lorsque la diode D1 est bloquée, $D_{hacheur}$ devient passante afin d'assurer la continuité du courant dans l'inductance.

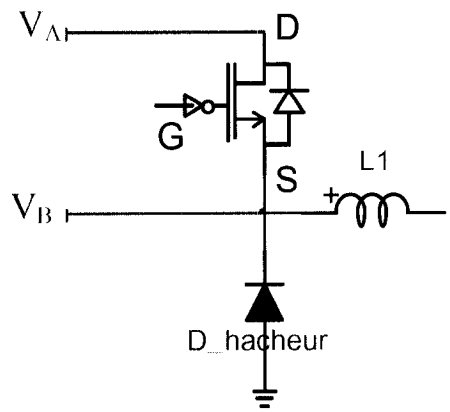

Figure 1.15 : Modèle du hacheur simple

1.5.3. Principe de contrôle des IGBT

Le contrôle des IGBT est un contrôle en puissance qui se fait en boucle fermée (Fig.1.17). Le modèle est très simple et permet d'obtenir la tension et la puissance voulues.

La puissance de référence P_{ref} est obtenue à partir de la mesure du courant sur la fiche « out » (Fig.1.10) :

$$P_{ref} = I_{mes_filtré} * V_{ref} \qquad (2)$$

Où V_{ref} = tension de référence (=800 V)

Et I_{mes} est le courant obtenu à la sortie du hacheur. Ce courant est ensuite filtré par un filtre passe bas de fréquence de coupure de 50 Hz (f_{cut}=50 Hz), il devient alors $I_{mes_filtré}$. La fréquence de coupure f_{cut} a été déterminée après quelques simulations afin d'atténuer les variations du courant. La Figure 1.15 présente le courant I_{mes} et le courant filtré $I_{mes_filtré}$.

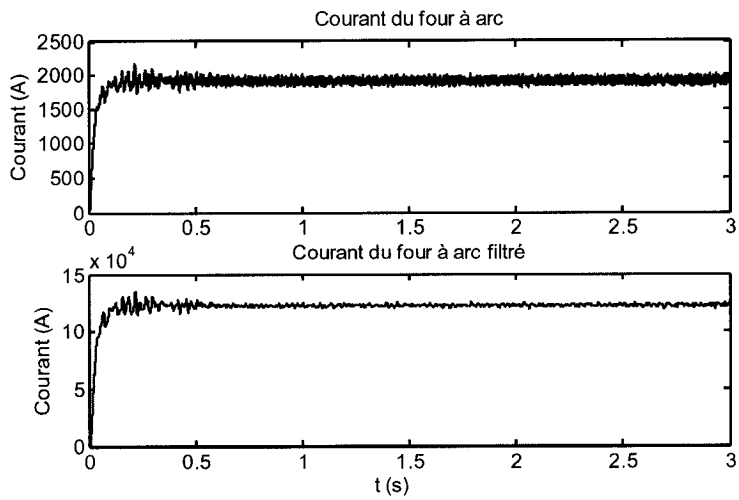

Figure 1.16 : Comparaison du courant d'arc filtré et non filtré

P_{ref} est alors comparée à la puissance réelle délivrée par le four. L'erreur obtenue entre la puissance réelle et celle de référence est injectée dans un contrôleur proportionnel intégral. L'équation régissant ce contrôleur est :

$$S = K_p E + K_i \int E dt \qquad (3)$$

Où K_p = gain proportionnel = 0.1

K_i = gain intégrateur = 4

Ces valeurs de gain K_p et K_i ont été fixées à la suite de diverses simulations afin d'obtenir le contrôle le plus efficace.

Le signal obtenu à la sortie du contrôleur PI est comparé à un signal en rampe. Cette comparaison est alors envoyée aux grilles des IGBT.

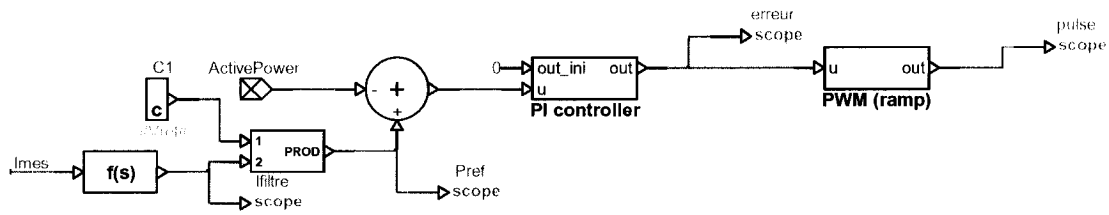

Figure 1.17: Contrôle en puissance du hacheur

Selon le modèle proposé dans [1], il est souhaitable de faire un contrôle de la puissance active, ce qui permettra de réduire l'effet du papillotement de la tension (communément appelé « Flicker »). En effet, grâce à une fréquence de commutation élevée des IGBT (f_{com}=1 kHz), il est possible de suivre les variations de la tension d'arc. Le but d'un tel contrôleur est d'obtenir une puissance active au niveau du four à arc constante et une tension proche de la tension de référence. Une puissance et une tension quasi constantes ont été ainsi obtenues. Elles sont présentées à la section 1.7.

1.6. Modèle de l'arc électrique du four cc

L'arc électrique est modélisé comme un circuit RL série [6]. Deux modèles de l'arc électrique vont être présentés dans cette section. Le premier est une représentation mathématique, le second utilise les propriétés des transformateurs. Tous deux donnent les mêmes résultats. Dans ces deux modèles, la résistance d'arc est la même. Ainsi, dans les paragraphes qui suivent, les modèles de l'inductance électrique seront plus détaillés.

La résistance d'arc pour le four cc est représentée sur les Figures 1.18 et 1.19. Elle est modélisée comme une forme gaussienne donnée par l'équation:

$$R_{arc} = R_{arc(nom)} + \Delta R_{arc}(Rand - 0{,}5) \qquad (4)$$

Où $R_{arc(nom)}$ = *valeur moyenne de* R_{arc}

$\Delta R_{arc} = 0{,}5 \cdot R_{arc(nom)}$

Rand = distribution uniforme entre 0 *et* 1

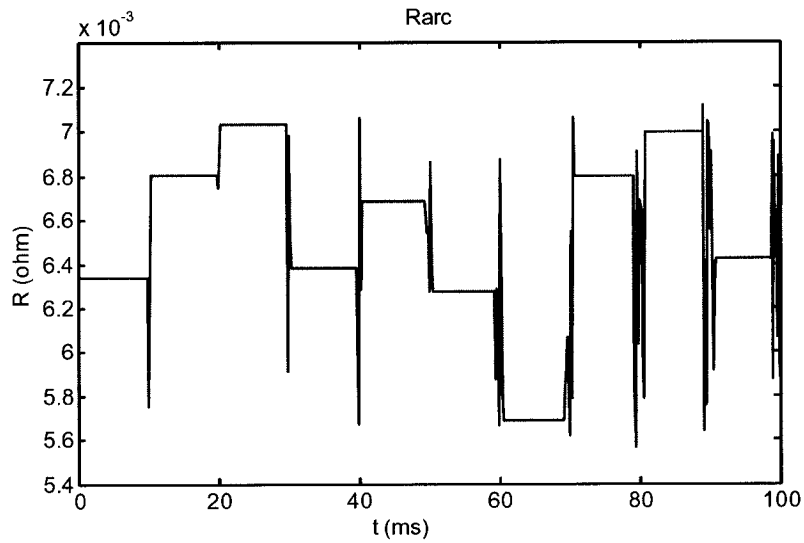

Figure 1.18 : Modèle de R_{arc}

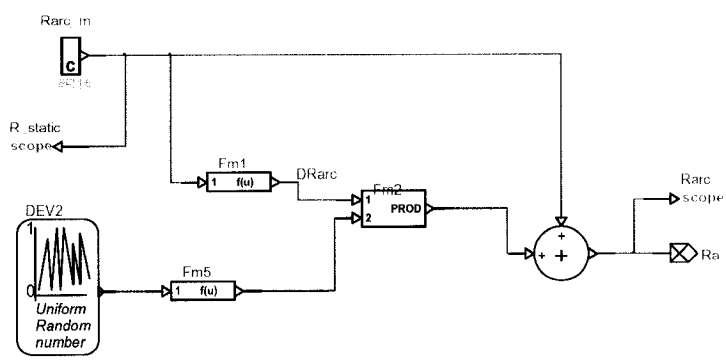

Figure 1.19 : Modélisation de la résistance d'arc R_{arc}

Dans cette représentation de la résistance d'arc, un générateur de nombres aléatoires ou pseudo aléatoires, appelé le Standard Minimal [7], est utilisé pour générer la distribution uniforme. Ce générateur a été conçu par Park et Miller [7]. Il est défini comme ceci :

$$x_{n+1} = 16807 x_n \bmod(2^{31} - 1) \tag{5}$$

L'inductance de l'arc électrique est, quant à elle, considérée comme étant proportionnelle à la résistance d'arc :

$$X_{arc} = 2.\pi.f.L_{arc} \tag{6}$$

Où $L_{arc} = 2K_x.R_{arc}$

Sous EMTP, le circuit RL est en fait une résistance commandée en parallèle avec une source de courant. On injecte alors la valeur de cette résistance et celle du courant (Fig. 1.20).

On effectue une discrétisation avec un pas de calcul Δt.

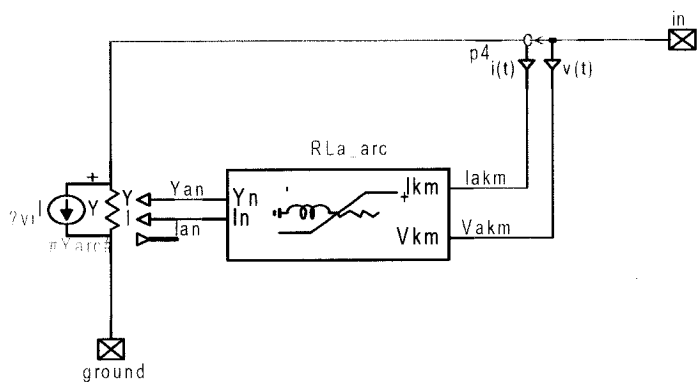

Figure 1.20: Modèle de l'arc électrique du four CC

1.6.1. Premier modèle d'arc

Le premier modèle de l'arc électrique est une représentation mathématique.

Les équations, qui sont directement utilisées dans notre modèle (Fig.1.20 et 1.22), sont présentées dans cette section.

D'après la Figure 1.20, le modèle de l'arc électrique est présenté à l'aide d'un composant de la librairie EMTP-RV (Fig. 1.21). L'arc électrique est représenté par le modèle de Norton. Ce composant est une admittance Y en parallèle avec une source de courant I (respectivement Y_n et I_n sur la Figure 1.22).

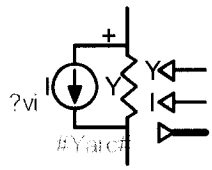

Figure 1.21 : Composant utilisé pour représenter l'arc électrique

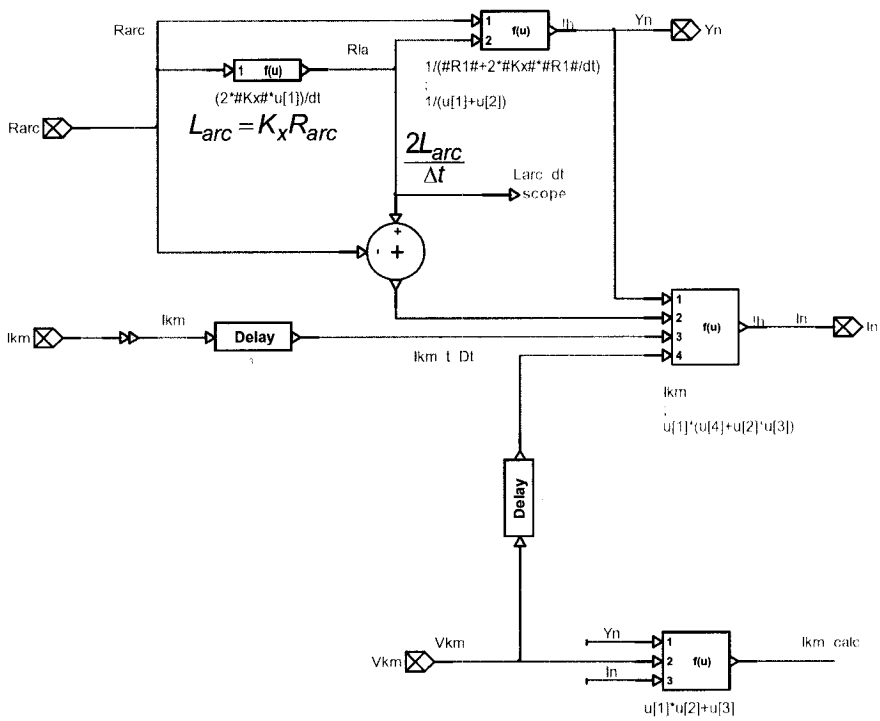

Figure 1.22 : Modélisation de l'arc électrique dans EMTP-RV

La Figure 1.22, ci-dessus, présente en détails les définitions de l'admittance Y_n et le courant I_n. L'arc électrique est modélisé par un circuit RL en série. L'admittance Y_n contient ces deux éléments, l'équation le représentant est :

$$Yn = \frac{1}{R_{arc} + \frac{2L_{arc}}{\Delta t}} \tag{7}$$

Dans l'équation (7), $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t}$ est en ohms. Dans ce modèle, l'inductance est discrétisée par un pas de calcul Δt. L'inductance L_{arc} est proportionnelle à la résistance d'arc R_{arc}. Elle est définie par :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{8}$$

Où $K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2}.\frac{1}{2\pi f}$

$FP = facteur\ \ de\ \ puissance$

$f = 50\ \text{Hz} = 50\ \text{s}^{-1}$

Ainsi $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t} = \frac{\tan(\arccos(FP))}{\pi \cdot f \cdot \Delta t} R_{arc}$ et $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t}$ est bien en ohms.

Pour déterminer le courant injecté, il faut tenir compte de la méthode d'intégration utilisée. Ce modèle est discrétisé en suivant la méthode trapézoïdale.

Le courant I_n représente l'historique de ce courant, il contient toutes les informations à l'instant précédent t, soit t-Δt (où Δt est le pas de calcul).

Le courant à l'instant t de notre composant (Fig. 1.21) est :

$$I_{km_t} = Y_n V_{km_t} + I_n \tag{9}$$

Où I_n = l'historique du courant (celui qui est injecté dans le composant de la Figure 1.21)

L'historique du courant est défini par :

$$I_n = Y_n(V_{kmt-\Delta t} + \frac{2L_{arc}}{\Delta t} I_{kmt-\Delta t}) \tag{10}$$

Ainsi le courant à l'instant t de ce composant (Fig. 1.22) est :

$$I_{km_t} = Y_n V_{km_t} + Y_n(V_{kmt-\Delta t} + \frac{2L_{arc}}{\Delta t} I_{kmt-\Delta t}) \tag{11}$$

1.6.2. Deuxième modèle d'arc

Ce modèle utilise les propriétés des transformateurs (Fig.1.23 et 1.24). Le composant représentant l'arc électrique est celui de la Figure 1.21, comme pour le premier modèle d'arc. Cependant, la source de courant est désactivée (I_n=0), et l'admittance est maintenant définie par (Fig.1.23):

$$Yn = \frac{1}{R_{arc}} \tag{12}$$

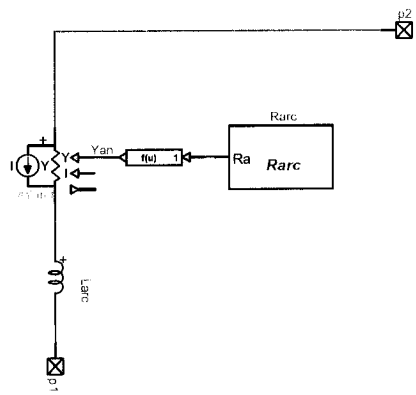

Figure 1.23 : Deuxième modèle de l'arc électrique

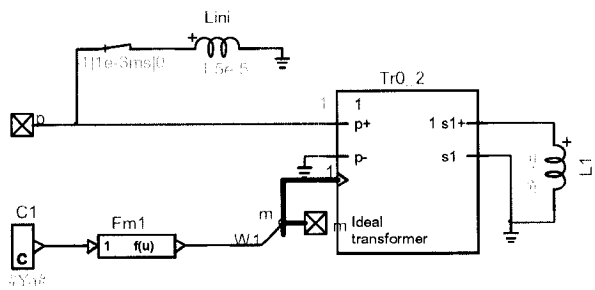

Figure 1.24 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc}

Le modèle présenté à la Figure 1.24 a été réalisé en s'inspirant du premier modèle de l'inductance d'arc [8]. Dans le premier modèle, L_{arc} est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{13}$$

Où $K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f}$

FP=facteur de puissance

$f = 50$ Hz

On considère le coefficient K_x comme étant constant car le facteur de puissance du four est quasi constant et la fréquence est également constante. La seule variable dans notre équation est la résistance d'arc R_{arc} dont la valeur moyenne et les variations dépendent du modèle choisi. On décide alors de considérer, sur la Figure 1.24, l'inductance au secondaire comme étant K_x.

Le transformateur de la Figure 1.24 est un transformateur unitaire dont le ratio est contrôlé. Ce ratio est représenté par la lettre m. Il est défini comme ceci :

$$m = \frac{1}{\sqrt{2 * 1/Y_{arc}}} \tag{14}$$

Ainsi, l'inductance au secondaire[4] vaut alors :

$$L_{PRI} = \frac{L_{SEC}}{m^2} = \frac{2}{Y_{arc}} K_x = 2K_x R_{arc} \tag{15}$$

L'inductance d'arc est alors définie comme pour le modèle mathématique. Cependant, dans ce cas-ci, L_{arc} est obtenue en utilisant les propriétés des transformateurs.

---

[4] Le composant « Ideal Transformer » sous EMTP fonctionne comme suit : le ratio $\frac{E_{PRI}}{E_{SEC}} = \frac{1}{m}$, voilà pourquoi nous avons cette équation.

Une autre inductance, nécessaire pour l'initialisation du modèle de four L_{ini}, a été ajoutée en parallèle avec L_{arc} pendant une microseconde (Fig.1.24).

1.7. Résultats

1.7.1. Résultats pour le 1er modèle d'arc (P_{ref}=100 MW, V_{ref}=800 V) : Cas Fichier DCFurnace\DCFurnace_800V.ecf

La validation des résultats se fait par comparaison avec les courbes et les quelques données fournies par l'article [1]. Les simulations sont d'une durée de 3 secondes avec un pas de calcul Δt=130 µs.

Les résultats présentés dans ce paragraphe concernent le 1er modèle de l'inductance d'arc (cf. §1.6.1).

Voici les résultats obtenus pour une référence en puissance d'environ 100 MW et en tension de 800 V :

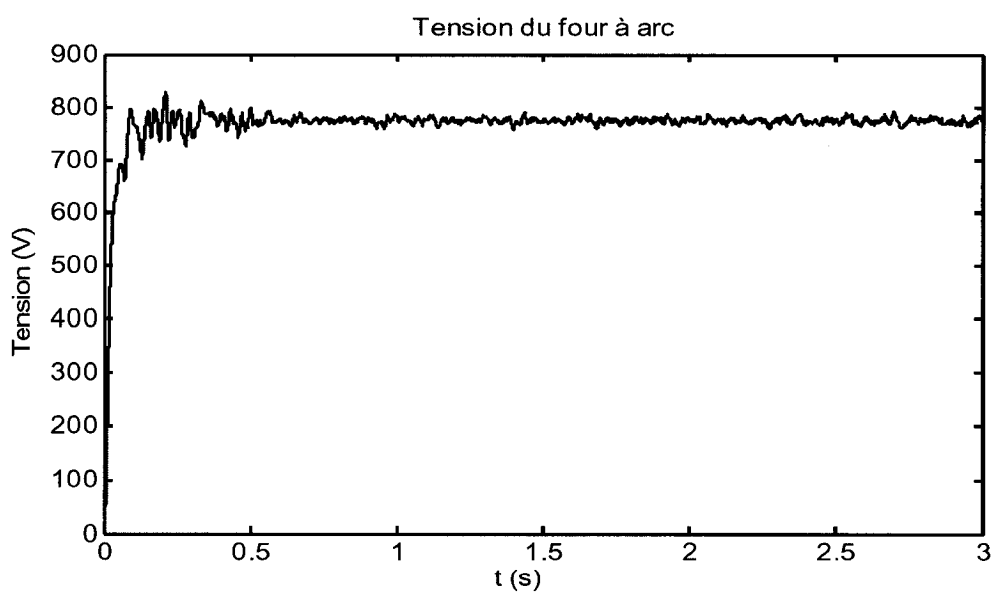

Figure 1.25:Tension à la sortie du convertisseur cc

Les variations en puissance sont de 6% au maximum, ce qui est assez faible (Fig.1.26 et 1.27).

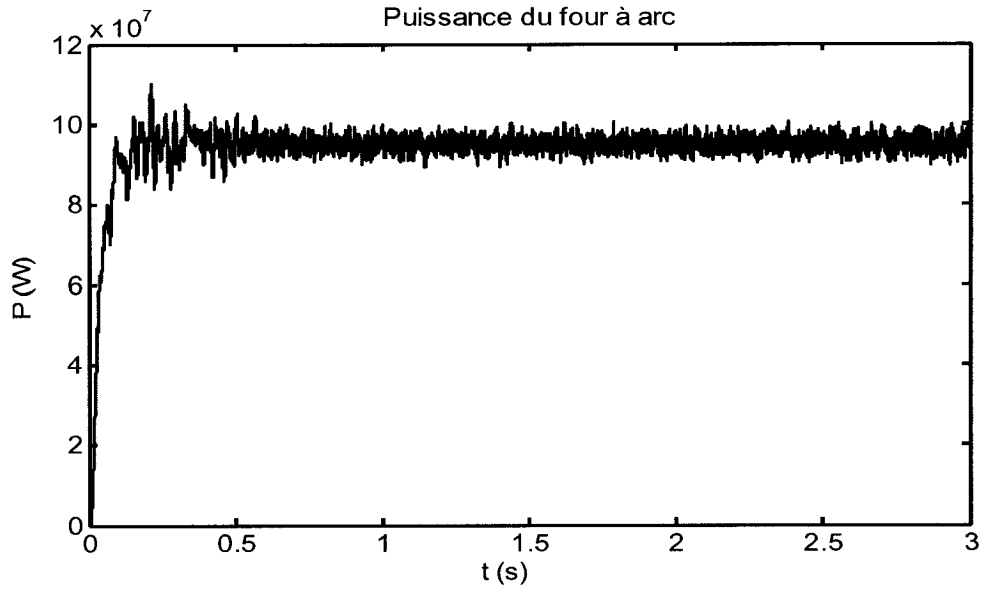

Figure 1.26: Puissance à la sortie du convertisseur cc

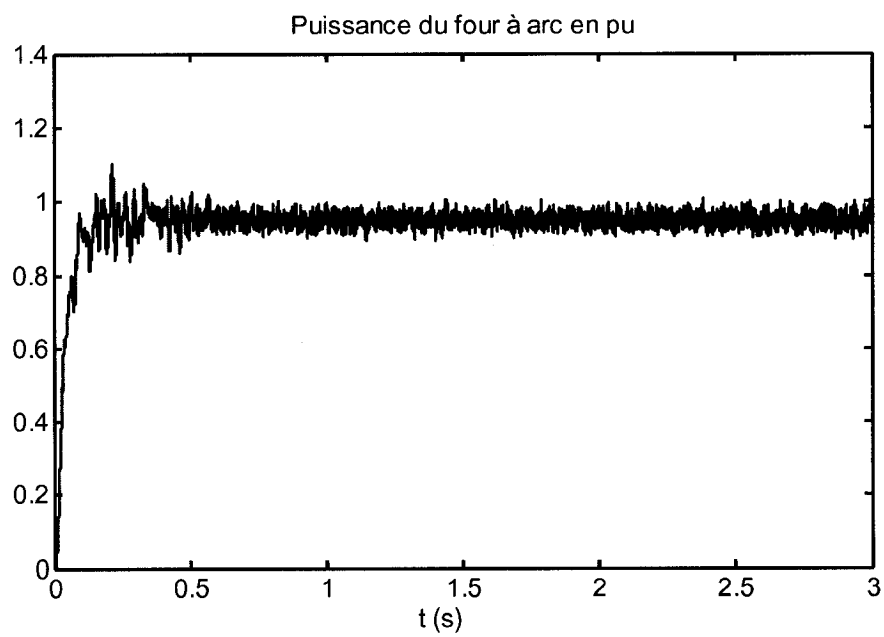

Figure 1.27: Puissance en pu à la sortie du convertisseur cc

D'après l'article [1], le courant d'arc est de l'ordre de 120 kA pour une puissance de 100 MW, c'est ce qui est obtenu (Fig.1.28).

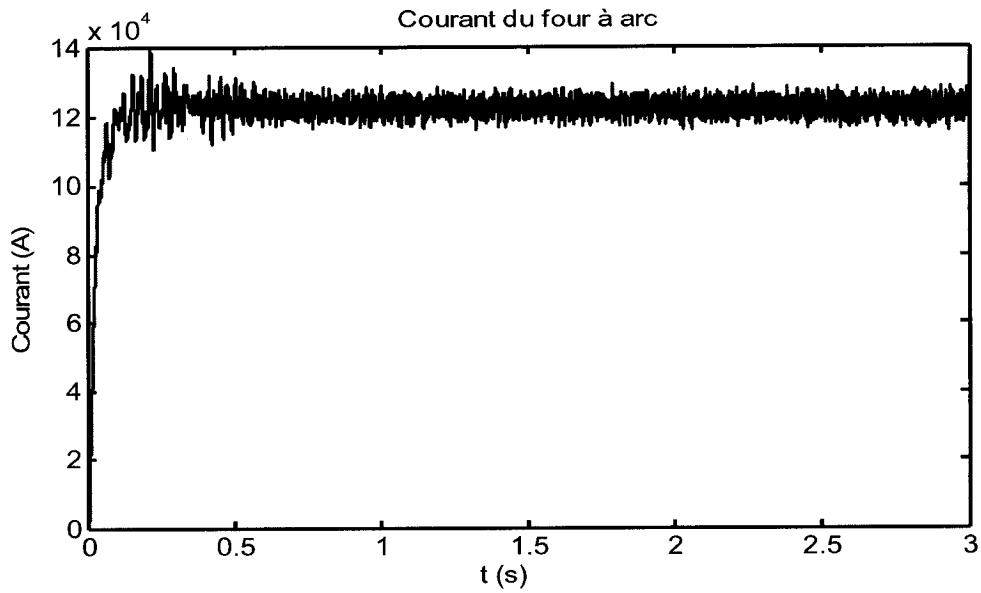

Figure 1.28 : Courant à la sortie du convertisseur cc

D'après la littérature, le facteur de puissance d'un four à arc est d'environ 0,7. Par un calcul simple, on obtient le facteur de puissance à chaque instant de la simulation, elle est bien de l'ordre de 0,7.

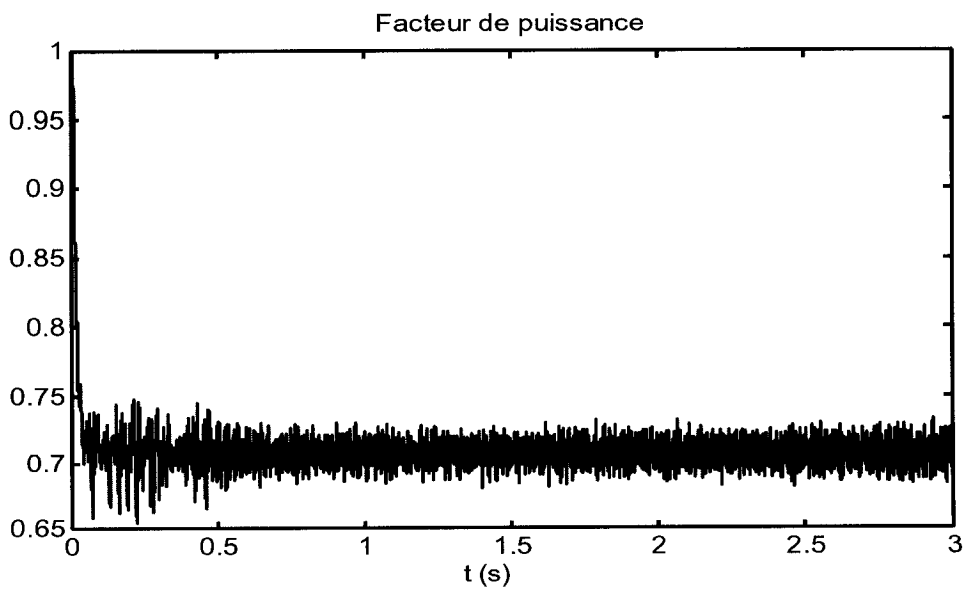

Figure 1.29 : Facteur de puissance du four à arc

1.7.2. Résultats pour le 2nd modèle d'arc (P_{ref}=100 MW, V_{ref}=800 V):

Cas Fichier DCFurnace\DCFurnace_case2.ecf

Dans cette simulation, on utilise une autre approche du modèle d'inductance d'arc L_{arc} (cf. §1.6.2). Les résultats sont sensiblement les mêmes que ceux pour le modèle d'arc électrique mathématique.

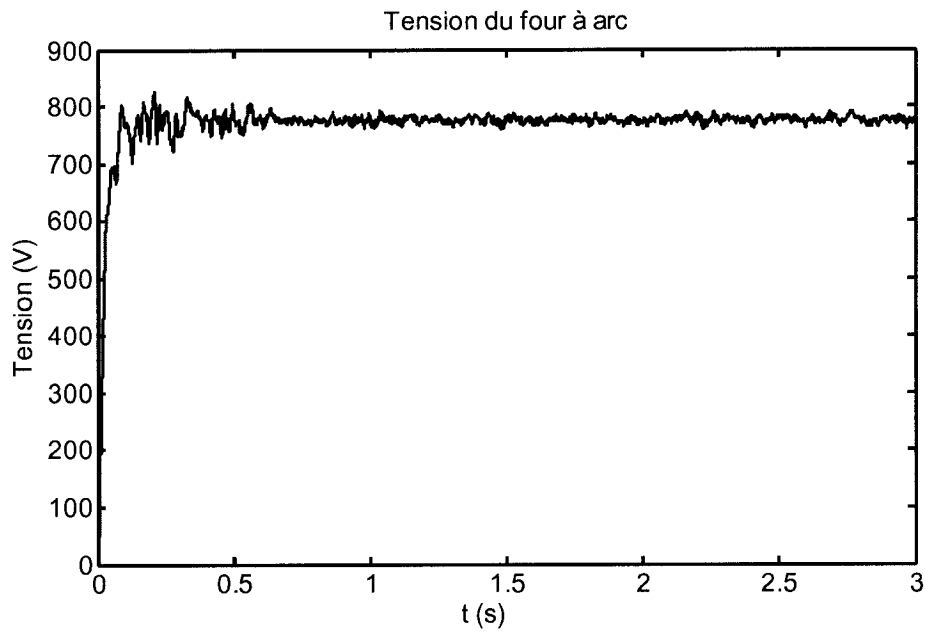

Figure 1.30 : Tension du four à arc

Les variations de la puissance du four à arc sont similaires au modèle d'inductance d'arc L_{arc}.

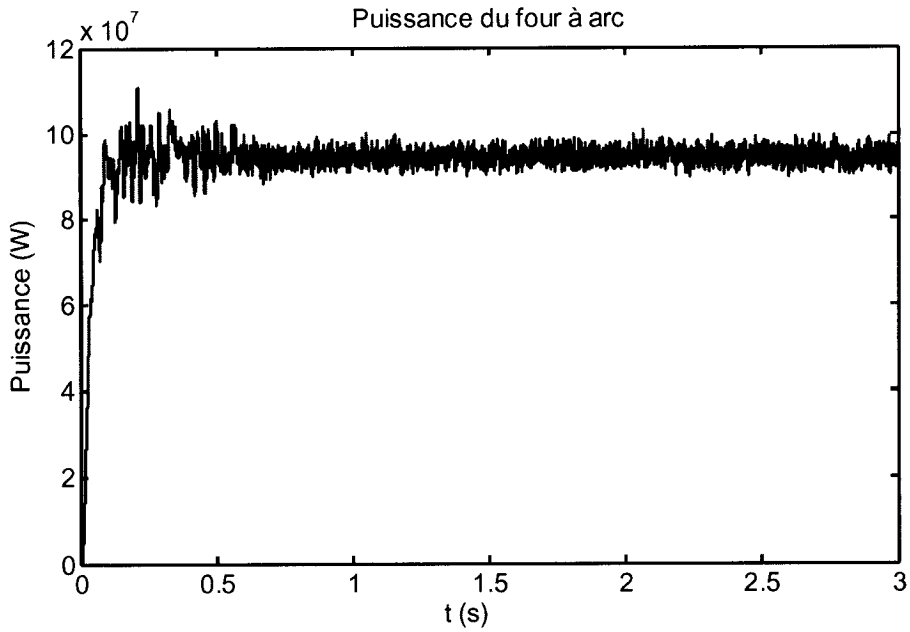

Figure 1.31 : Puissance du four à arc

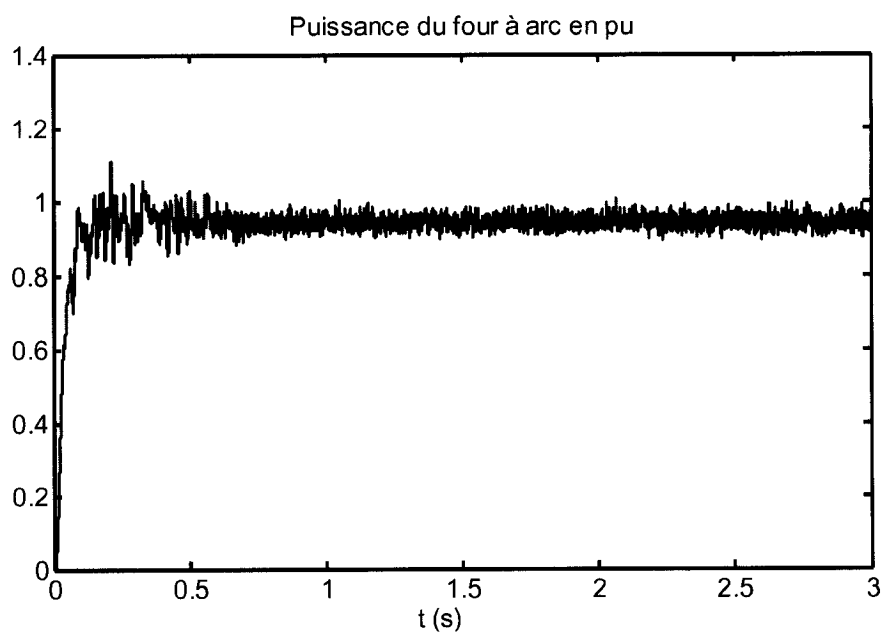

Figure 1.32 : Puissance en pu du four à arc

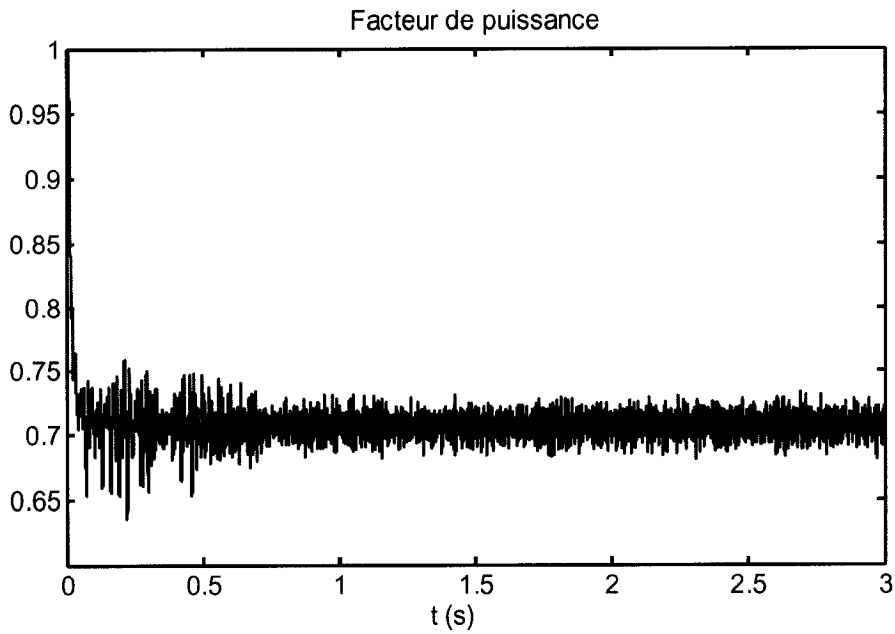

Figure 1.33 : Facteur de puissance du four à arc

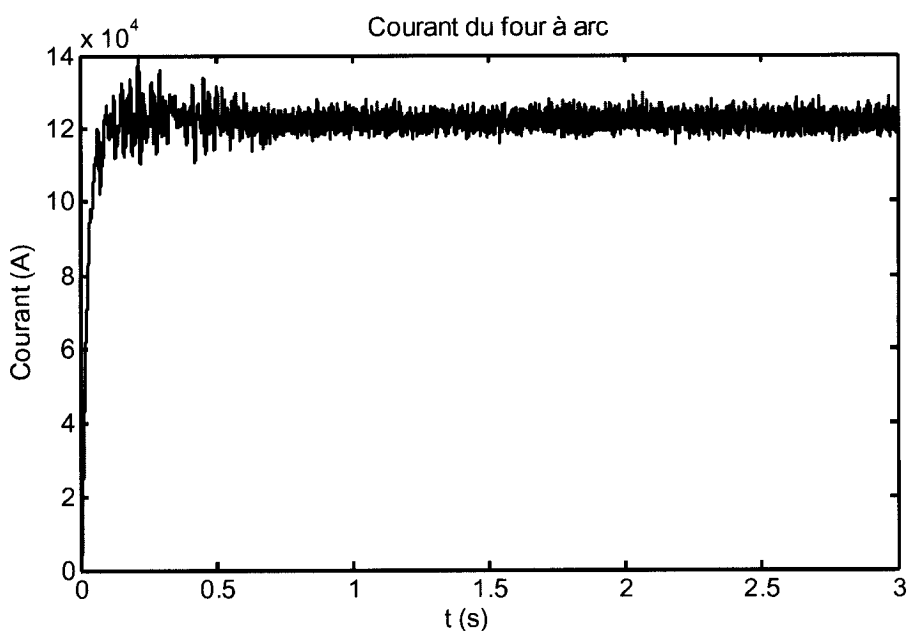

Figure 1.34 : Courant du four à arc

1.7.3. Résultats combinés :

Cas Fichier DCFurnace\DCFurnace_800-400V.ecf

Dans cette partie, les options de simulation sont les mêmes que précédemment. Cependant, dans cette simulation il y a deux niveaux de puissance. En effet, comme il a été expliqué au paragraphe 1.1, le fonctionnement du four à arc comprend plusieurs étapes, principalement l'amorçage et la fusion. Ces deux étapes s'effectuent respectivement à 40 MW et à 100 MW.

La simulation débute à une puissance de référence de 40 MW, et à t=1 s la puissance de référence passe de 40 à 100 MW et ce jusqu'à la fin de la simulation.

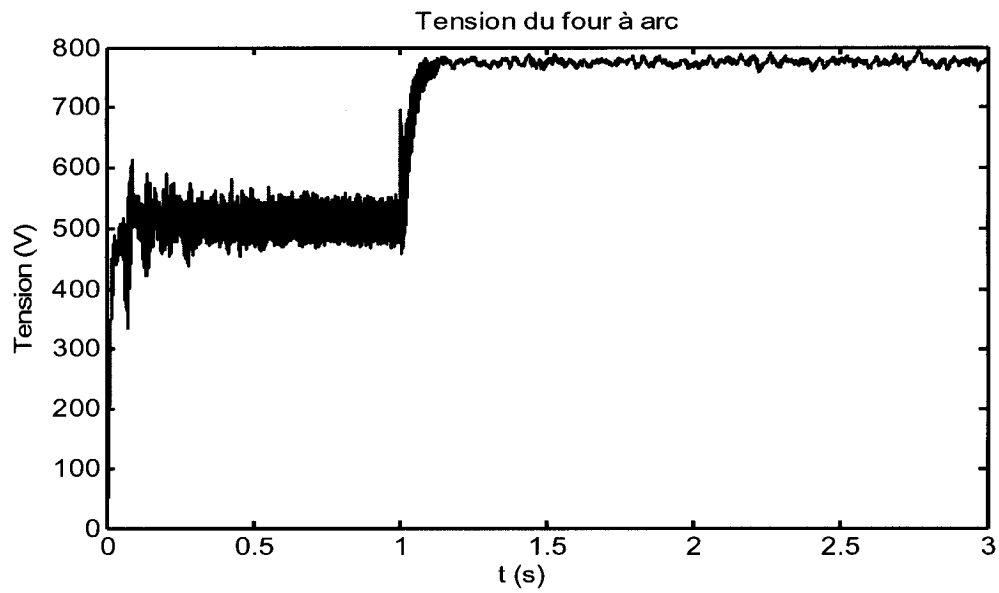

Figure 1.35 : Tension du four à arc

À la Figure 1.35, on peut observer la tension du four à arc pendant 3 secondes. En la comparant aux résultats de l'article [1], on remarque une tension d'environ 500 V lors de l'amorçage et de 800 V pour la fusion.

Une constatation similaire peut être faite pour la puissance du four à arc présentée sur les Figures 1.36 et 1.37.

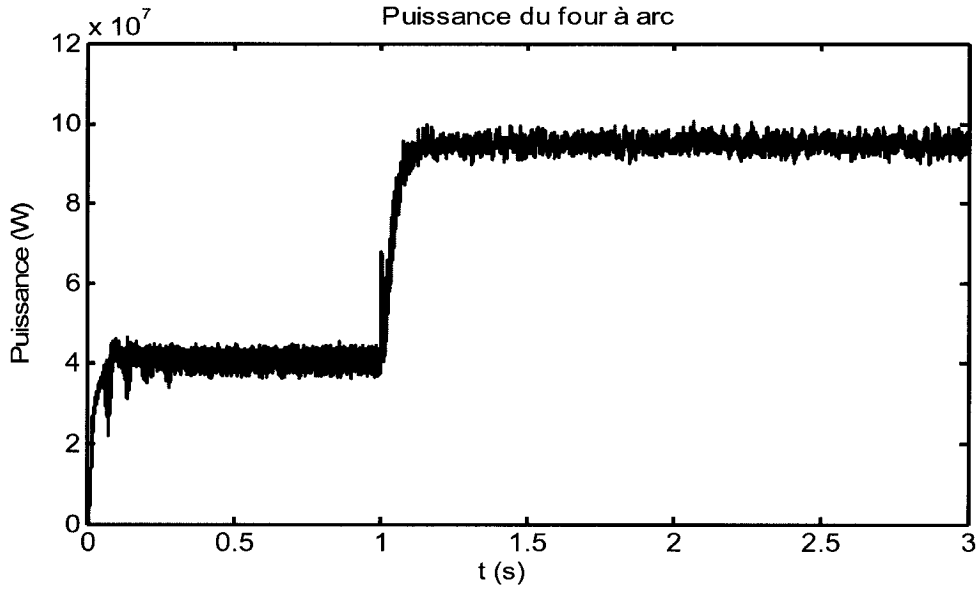

Figure 1.36 : Puissance du four à arc

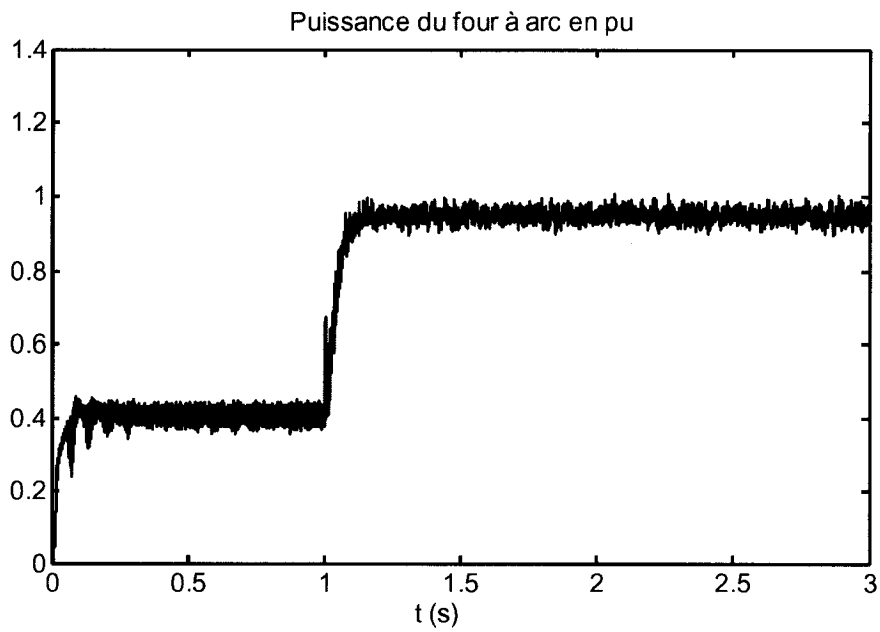

Figure 1.37 : Puissance du four à arc en pu

La Figure 1.38 présente le facteur de puissance. Durant toute la simulation, il est de l'ordre de 0,7, ce qui représente le facteur de puissance d'un four à arc réel. On observe

une perturbation à t=1s, qui correspond au changement de référence du contrôle de puissance. Cependant, elle est de courte durée.

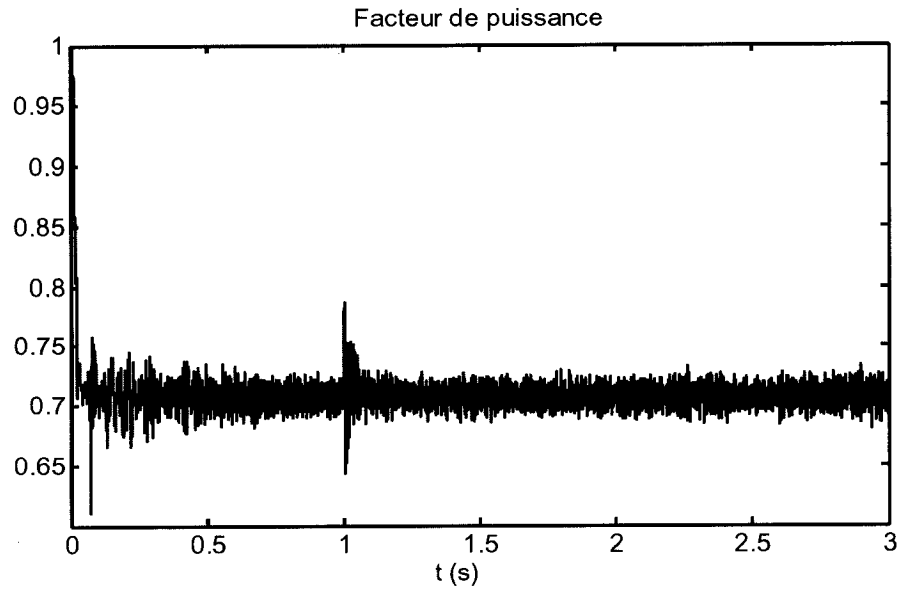

Figure 1.38 : Facteur de puissance du four à arc

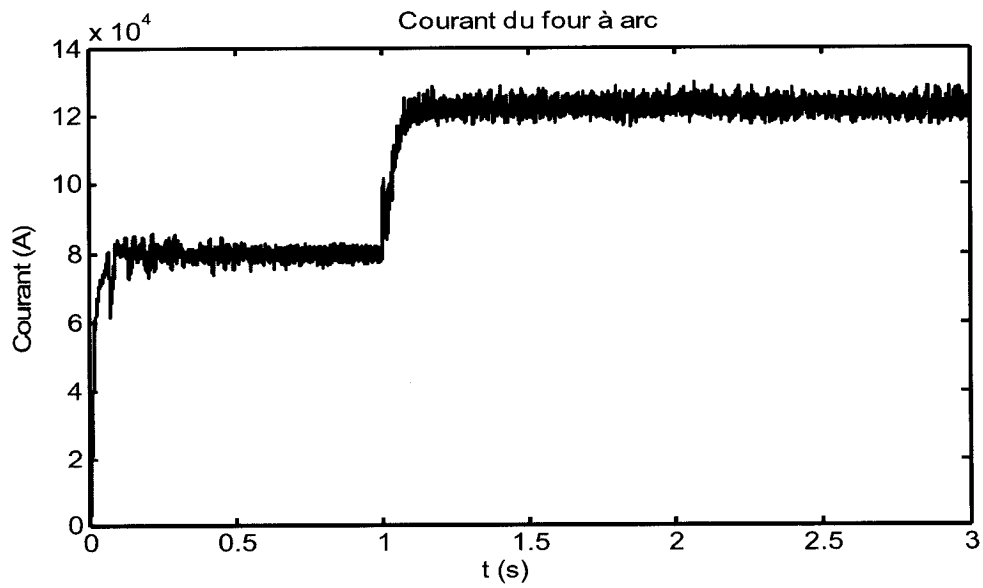

Figure 1.39 : Courant du four à arc

Conclusion

Le modèle du four à courant continu donne de bons résultats. Les résultats sont similaires à ceux présentés dans l'article de référence [1]. Cependant, le contrôleur peut être amélioré en se basant sur des données réelles.

CHAPITRE 2 FOUR À COURANT ALTERNATIF

2.1. Modèle triphasé du four à arc ca

Le four à arc à courant alternatif est alimenté par une source triphasée équilibrée à l'aide d'un transformateur abaisseur. Ce modèle utilise les informations d'un modèle de four à arc ca existant sous EMTP-RV. Ce modèle a été développé par Luis Daniel Bellomo [8].

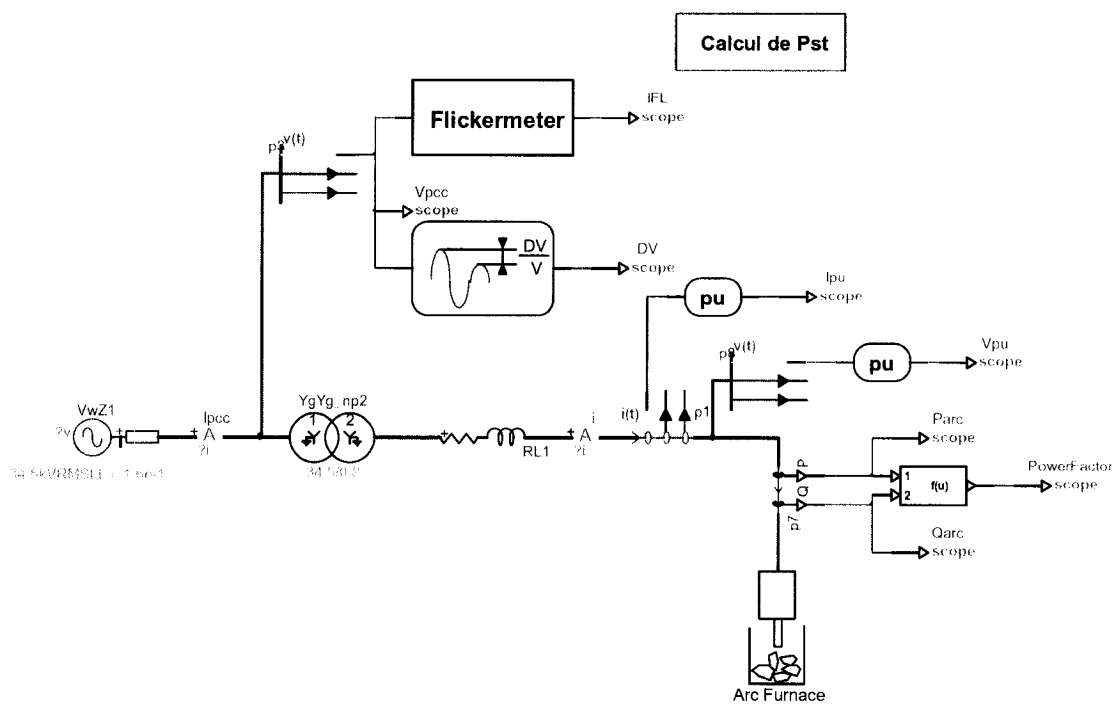

Figure 2.1 : Montage d'alimentation du four ca

Le modèle du four à courant alternatif triphasé est sensiblement le même que celui du four à courant continu. Pour chaque phase, le modèle de l'arc électrique est le même, le modèle de la phase *a* est présenté à la Figure 2.2.

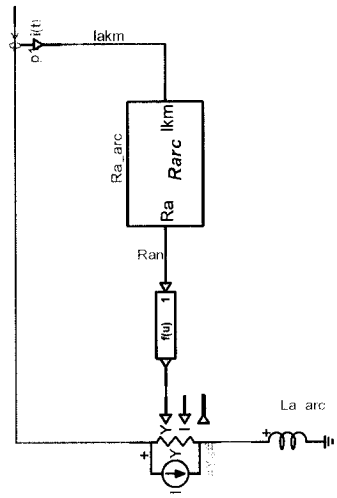

Figure 2.2 : Modèle de l'arc électrique pour la phase *a*

L'arc électrique est modélisé comme un circuit RL série. Il existe 4 modèles de résistance d'arc R_{arc} : le modèle statique, sinusoïdal, gaussien et chaotique (cf. Fig.2.3). Ces modèles sont détaillés dans les paragraphes suivants.

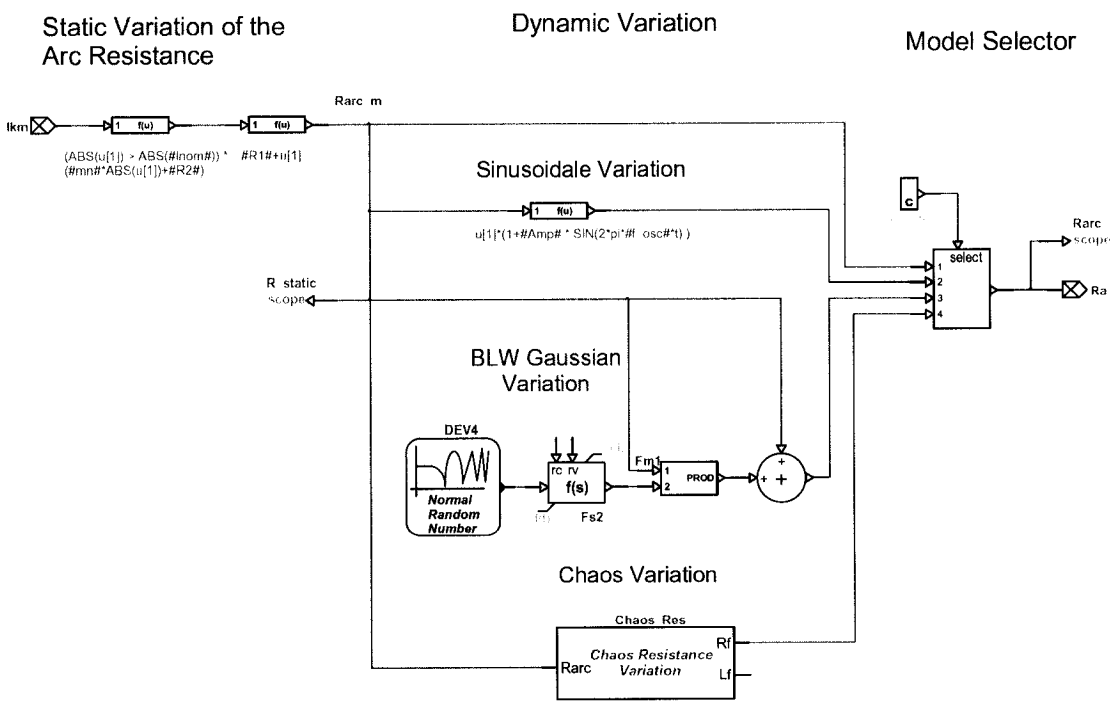

Figure 2.3 : Les 4 modèles de R_{arc}

L'inductance d'arc est représentée par le composant L_{a_arc} sur la Figure 2.2.

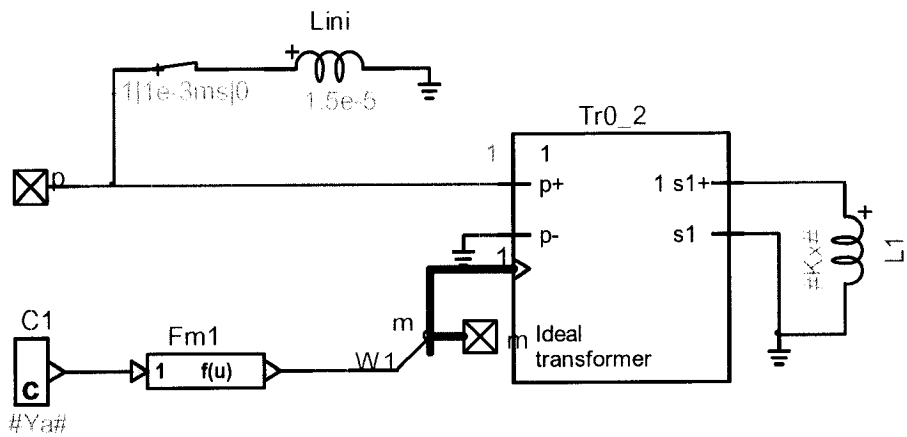

Figure 2.4 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc}

Le modèle présenté à la Figure 2.4 a été réalisé en s'inspirant du modèle mathématique de l'inductance d'arc [8]. C'est le même modèle que celui présenté au paragraphe 1.6.2. Dans le modèle mathématique, L_{arc} est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{16}$$

$$\text{Où } K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2}.\frac{1}{2\pi f}$$

FP=facteur de puissance=0,85

$f = 60$ Hz

On considère le coefficient K_x comme étant constant car le facteur de puissance du four est quasi constant et la fréquence est également constante. La seule variable dans notre équation est la résistance d'arc R_{arc} dont la valeur moyenne et les variations dépendent du modèle choisi. On décide alors de considérer, sur la Figure 2.4, l'inductance au secondaire comme étant K_x. Le transformateur de la Figure 2.4 est un transformateur unitaire dont le ratio est contrôlé. Ce ratio est représenté par la lettre m. Il est défini par :

$$m = \frac{1}{\sqrt{2 * 1/Y_{arc}}} \tag{17}$$

Ainsi, l'inductance au secondaire[5] vaut alors :

$$L_{PRI} = \frac{L_{SEC}}{m^2} = \frac{2}{Y_{arc}} K_x = 2K_x R_{arc} \tag{18}$$

L'inductance d'arc est alors définie comme pour le modèle mathématique. Dans ce cas-ci, les propriétés du transformateur sont exploitées afin d'obtenir un autre modèle d'inductance d'arc.

Une autre inductance, nécessaire pour l'initialisation du modèle de four L_{ini}, a été ajoutée en parallèle avec L_{arc} pendant une microseconde (Fig.2.4).

2.1.1. Modèle statique R_{arc} [9]

Ce modèle est basé sur une approximation linéaire de la caractéristique tension-courant de l'arc électrique (Fig.2.5).

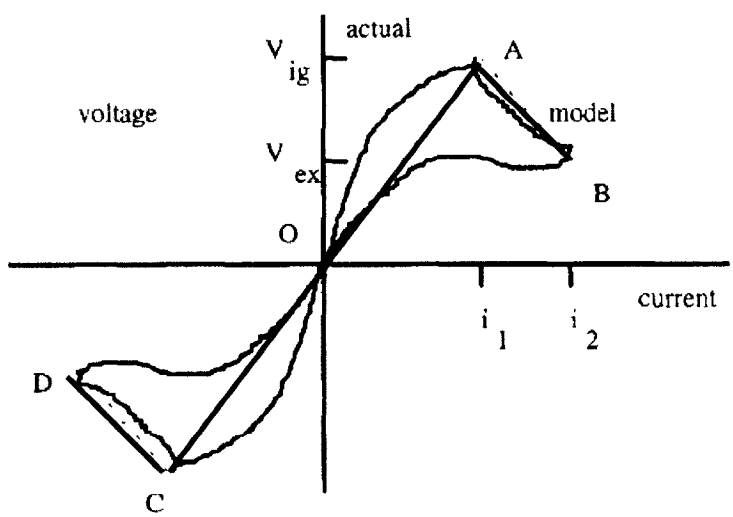

Figure 2.5 : Caractéristique V-I du four à arc [9]

[5] Le composant « Ideal Transformer » sous EMTP fonctionne comme suit : le ratio $\frac{E_{PRI}}{E_{SEC}} = \frac{1}{m}$, voilà pourquoi nous avons cette équation.

L'approximation linéaire utilisée dans notre modèle de four est représentée sur la Figure 2.6. Sur un plan mathématique, la résistance d'arc pour se traduit comme ceci :

$$\begin{cases} R_{static} = R_{arc_mean}\left(1 - a\dfrac{|I_{km}| - I_{nom}}{I_{nom}}\right) & pour\ |I_{akm}| > I_{nom} \\ R_{static} = R_{arc_mean} & pour\ |I_{akm}| < I_{nom} \end{cases} \tag{19}$$

Où a = pente de la droite AB

R_{arc_mean} = *pente de la droite OB*

et I_{nom} = *courant nominal* = 65 kA

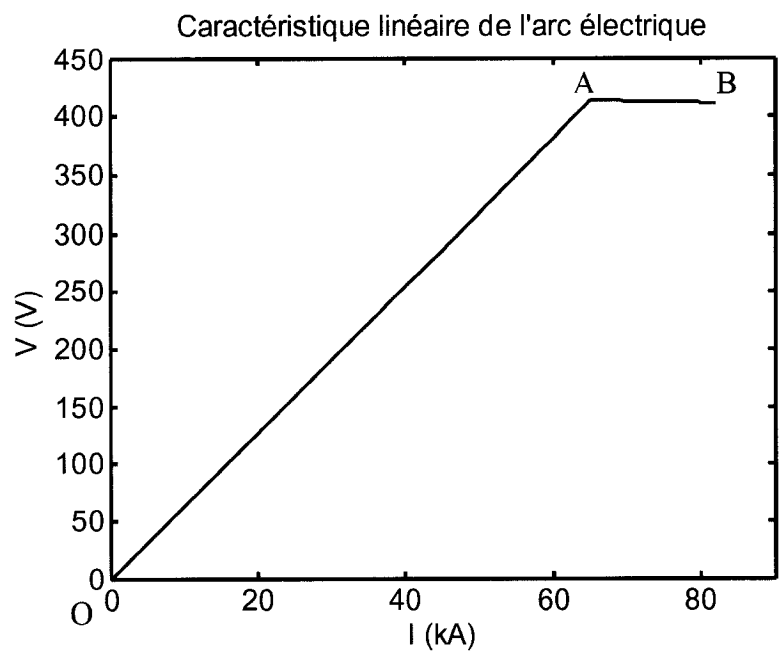

Figure 2.6 : Approximation linéaire de la caractéristique V-I de l'arc électrique

Sur la Figure 2.7, on peut observer la variation du modèle statique de R_{arc}. Les variations sont de l'ordre de 10^{-4}, ce qui est une variation très faible d'où l'appellation modèle statique.

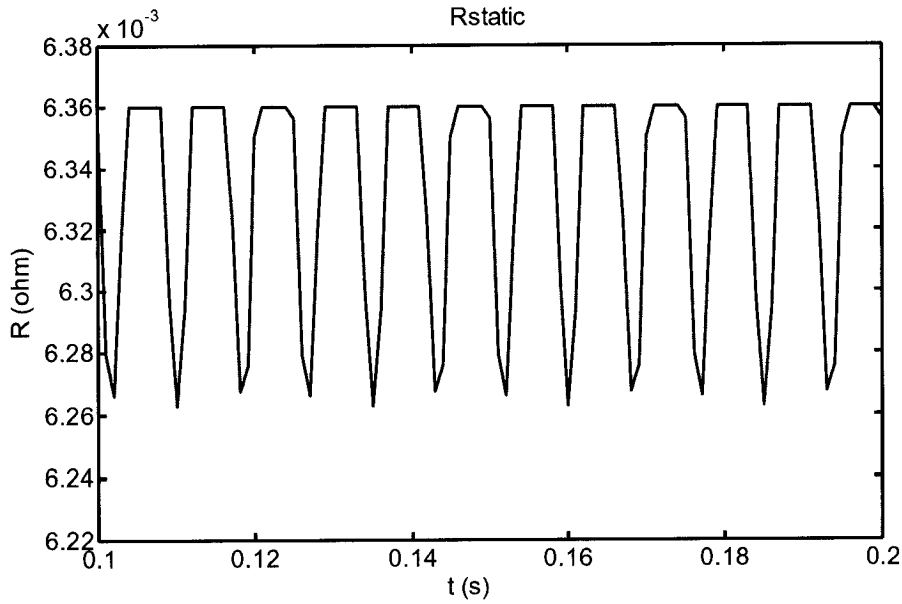

Figure 2.7 : Représentation temporelle de R_{static}

2.1.2. Modèle sinusoïdal de R_{arc} [10]

Dans ce modèle, on considère une variation sinusoïdale de R_{arc} dont le modèle mathématique est :

$$R_{sinus} = R_{static}\left(1 + \sin\left(\omega_f t\right)\right) \tag{20}$$

$$où \;\; \omega_f = pulsation \;\; d'oscillation = 2\pi f_{osc}$$

$$f_{osc} \in [5,14] \text{ Hz}$$

et R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe 2.1.1.

Dans le modèle du four à arc ca, le modèle sinusoïdal de R_{arc} varie comme ceci (Fig.2.8) :

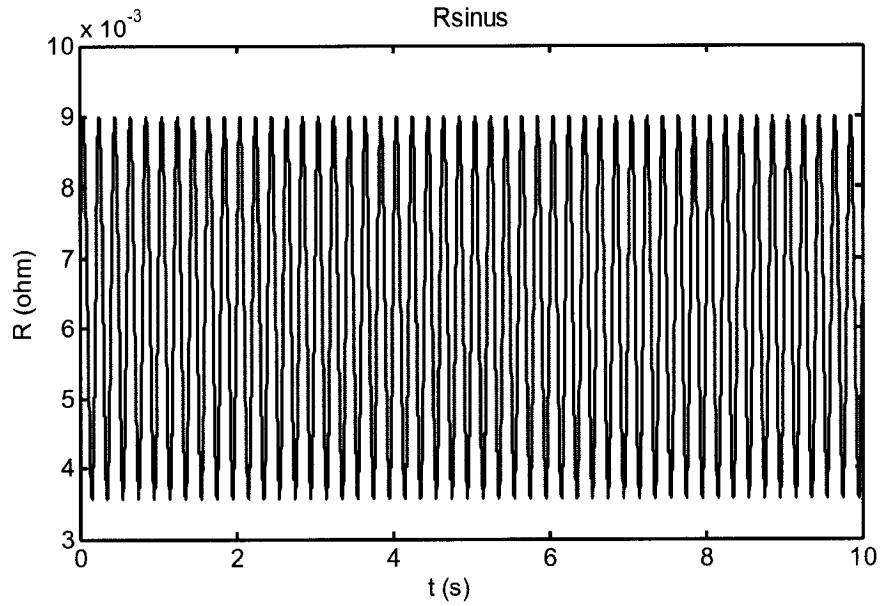

Figure 2.8 : Représentation temporelle de R_{sinus}

2.1.3. Modèle gaussien de R_{arc} [10]

La représentation mathématique de ce modèle est une variation dynamique en fonction d'un bruit blanc à bande limitée :

$$R_{gaus} = R_{static} \cdot (1 + BLW) \tag{21}$$

R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe 2.1.1.

BLW=Bruit Blanc à Bande Limitée, il représente le signal R filtré (Équ.22).

Le filtre employé est un filtre passe bas de fréquence de coupure de 16 Hz (f_{cut}=16 Hz). Ce type de filtre nous permet de laisser passer les fréquences comprises entre [4 14 Hz], comme le recommande la littérature [11]:

$$\begin{aligned} BLW &= (R)_{filtré} \\ R &= \sigma\left(\sqrt{-2\ln(rand1)}\right)\cos(2\pi \cdot rand2) \end{aligned} \tag{22}$$

Où $rand1$ *et* $rand2$ = *distribution uniforme entre* 0 *et* 1

et σ = *variance*

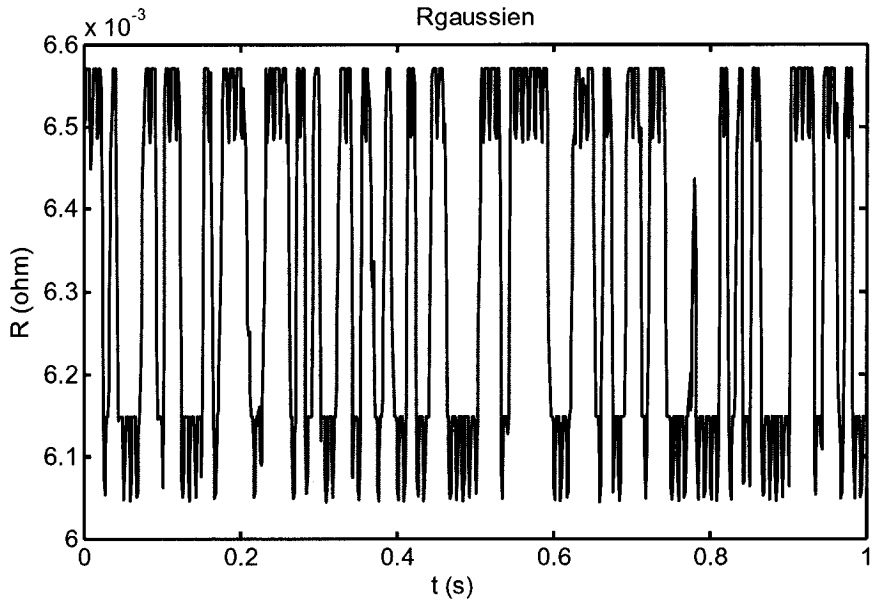

Figure 2.9 : Représentation temporelle de R_{gauss}

2.1.4. Modèle chaotique de R_{arc} [12]

Ce modèle est basé sur la théorie du chaos. Les équations non linéaires de Lorenz nous permettent de représenter ce phénomène. On utilise donc le modèle de Lorenz pour la résistance d'arc. La représentation mathématique de ce modèle est :

$$R_{chaos} = R_{static} + C_1 x \tag{23}$$

$$où\ \frac{dx}{dt} = 30\sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = 30(rx - y - xz)$$

$$\frac{dz}{dt} = 30(xy - bz)$$

$$avec\ \sigma = 10$$

$$r = \frac{8}{3}$$

$$b = 28$$

et $C_1 = coefficient\ du\ modèle\ chaotique$

et R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe 2.1.1

Voici les variations utilisées dans notre modèle du four ca :

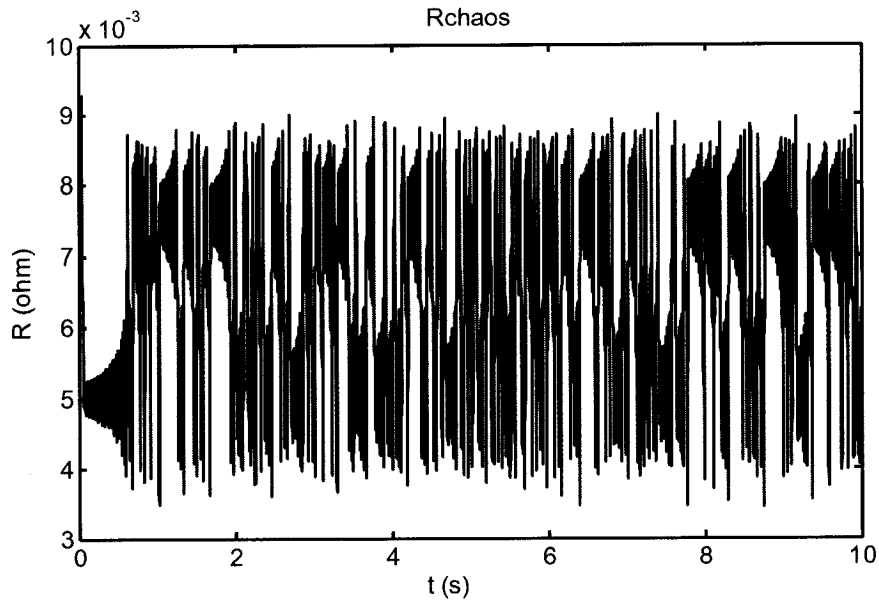

Figure 2.10 : Représentation chaotique de R_{arc} en fonction du temps

2.2. Formes d'ondes du four ca

Dans ce paragraphe, les formes d'ondes de tension et de courant du four à arc sont présentées. Les validations du four à arc sont présentées dans les paragraphes suivants.

2.2.1. Modèle de R_{static}

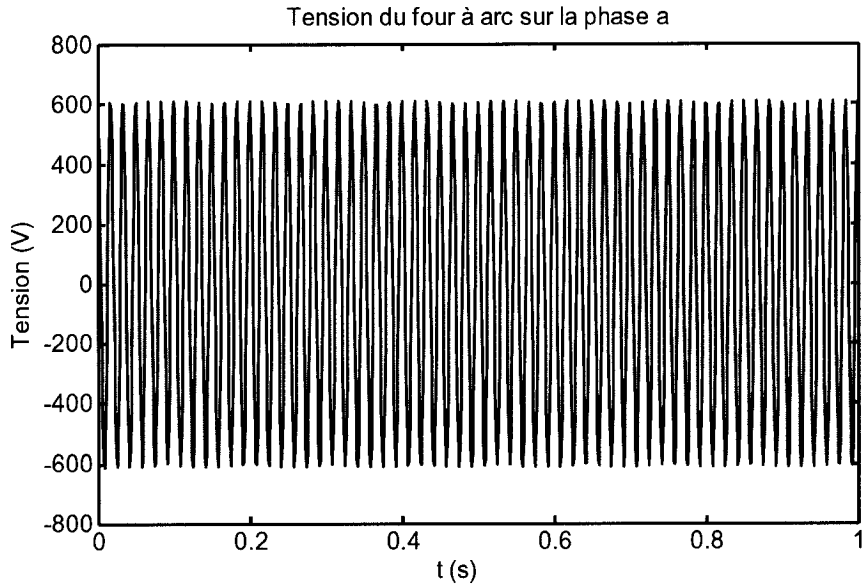

Figure 2.11 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc statique

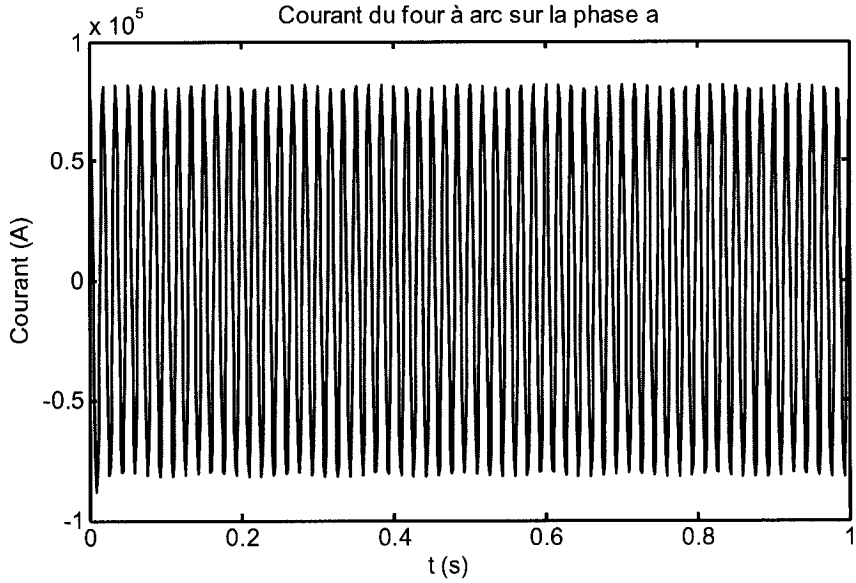

Figure 2.12 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc statique

2.2.2. Modèle de R_{sinus}

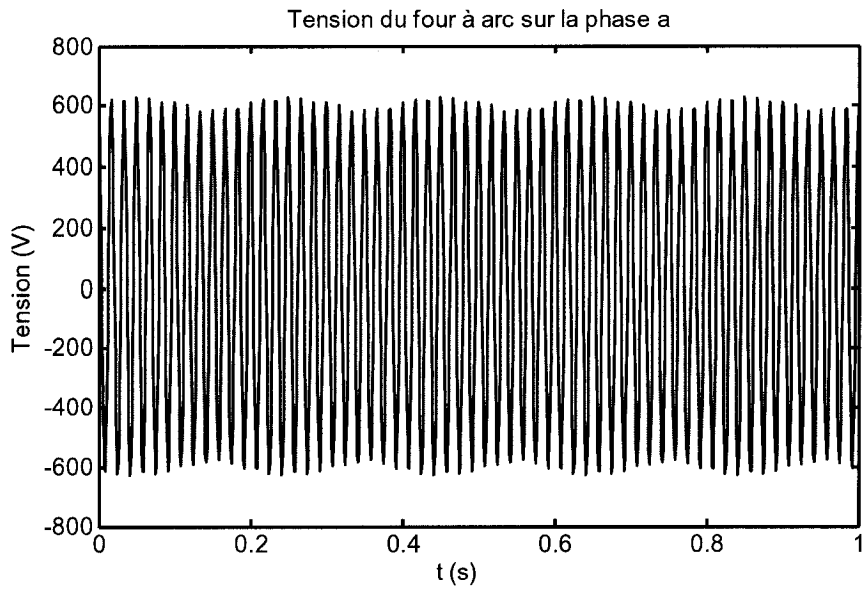

Figure 2.13 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc sinusoïdale

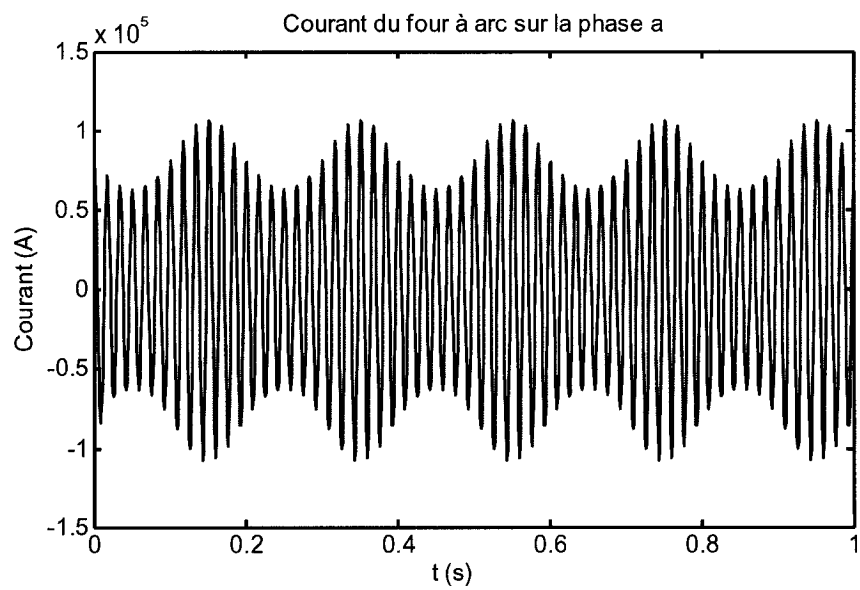

Figure 2.14 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc statique

2.2.3. Modèle de R_{gauss}

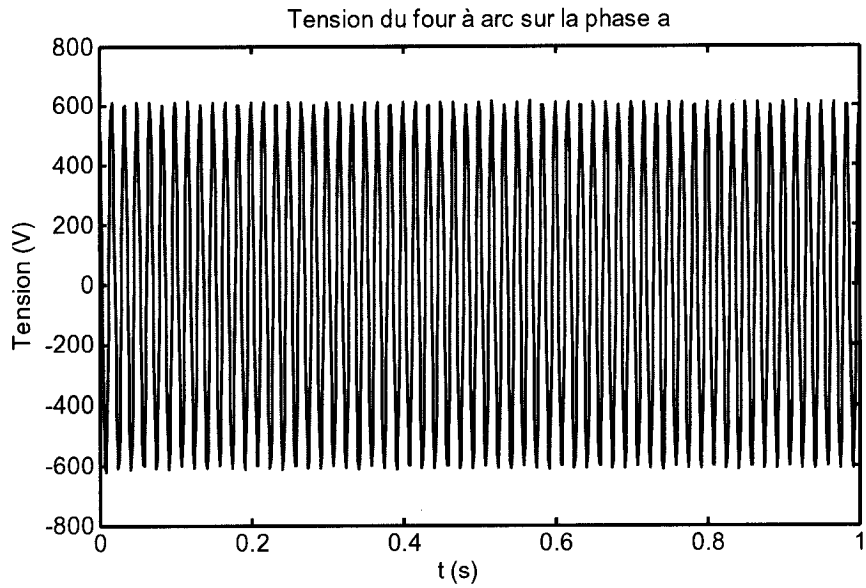

Figure 2.15 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc gaussien

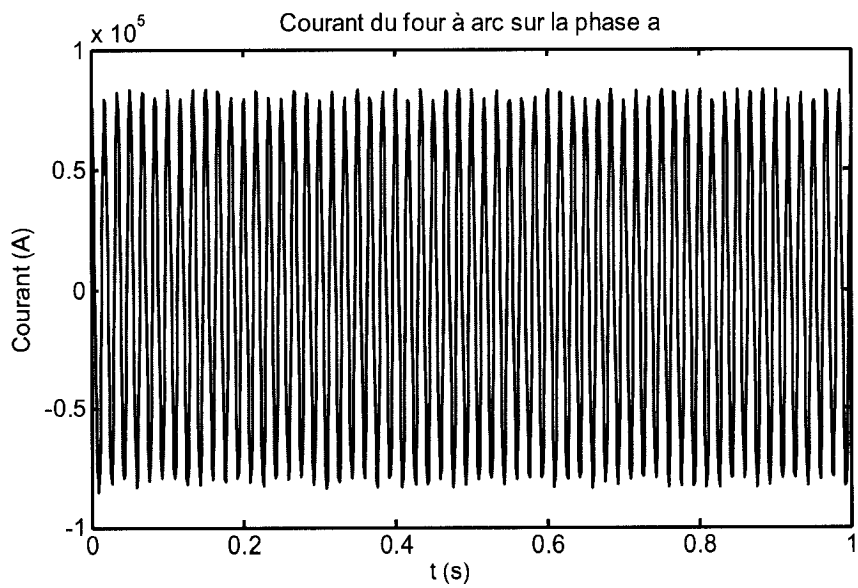

Figure 2.16 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc gaussien

2.2.4. Modèle de R_{chaos}

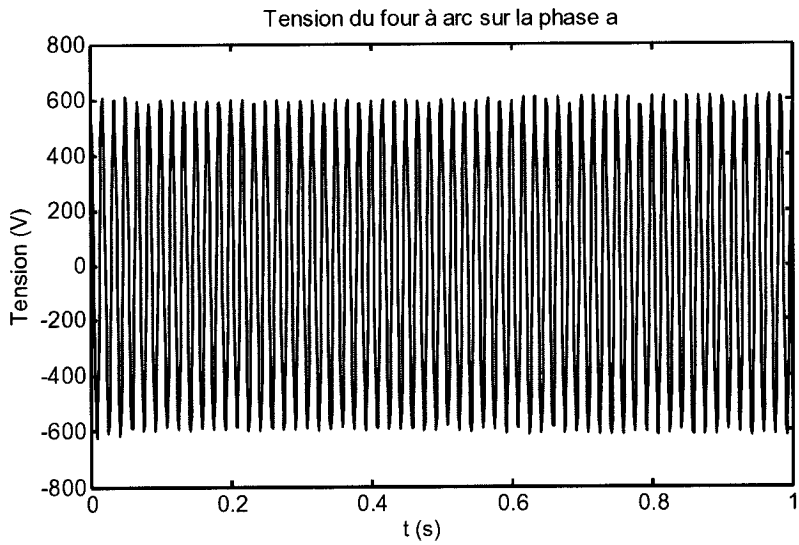

Figure 2.17 : Tension d'arc du modèle de résistance d'arc chaotique

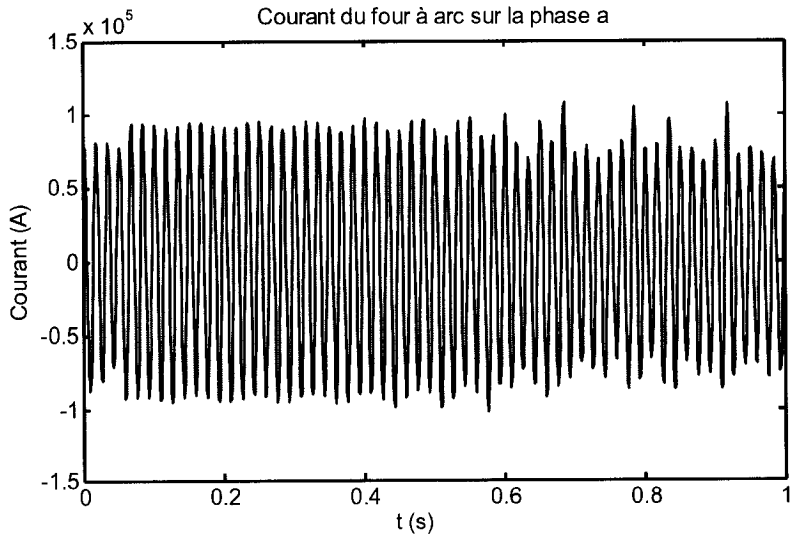

Figure 2.18 : Courant d'arc du modèle de résistance d'arc chaotique

Conclusion :

Les variations de courant et de tension d'arc sont sensibles au modèle d'arc électrique utilisé. Cependant, la tension d'arc est de l'ordre de 600 V alternatif, et le courant d'arc est de l'ordre de 75 kA alternatif.

2.3. Détermination de la sévérité du flicker et de la variation de tension au PCC (Point of Common Coupling)

2.3.1. Procédure d'évaluation

Le flickermètre est un appareil de mesure permettant d'évaluer le papillotement de la tension (ou « Flicker »), ce dernier engendre une variation du flux lumineux. Il a été conçu afin de déterminer le niveau acceptable de perception du papillotement du flux lumineux. L'intérêt d'un tel appareil est de déterminer si les charges installées sur le réseau ne vont pas engendrer de fortes variations lumineuses qui sensibiliseraient l'œil humain.

À partir du niveau de sensation instantanée du flicker (I_{FL}), on détermine la sévérité du flicker P_{st}. La sévérité P_{st} est obtenue à l'aide de la méthode statistique d'analyse de la durée pendant laquelle un niveau donné est atteint[6]. Une unité de perceptibilité (P_{st}=1) correspond au seuil de perceptibilité humain, c'est le seuil de référence du flicker.

Pour déterminer la sévérité P_{st}, on effectue une simulation sur une période d'observation courte T_{st}=10 min. Le flickermètre a été conçu de telle sorte que lorsque les variations de tension augmentent d'un facteur F, la sévérité P_{st} augmente d'un facteur F également.

Afin de vérifier nos résultats, nous allons normaliser la valeur du P_{st}, déterminer la variation de tension $\frac{\Delta V}{V}$ correspondant au PCC. Nous tiendrons compte aussi de la fréquence à laquelle la tension varie.

---

[6] Une description détaillée de la composition du flickermètre et une définition de la sévérité du flicker P_{st} sont données en annexe.

L'évaluation des fluctuations de la tension au PCC se fait à l'aide d'un échantillonnage de la tension. Nous souhaitons simplement avoir une idée de la variation de tension maximale, il n'est donc pas nécessaire de détecter l'enveloppe du signal de manière précise. Ces résultats nous permettront de les comparer avec les tableaux présentés dans la norme CEI [2] (Tableau 2.1) et avec la Figure 2.19 ci-dessous.

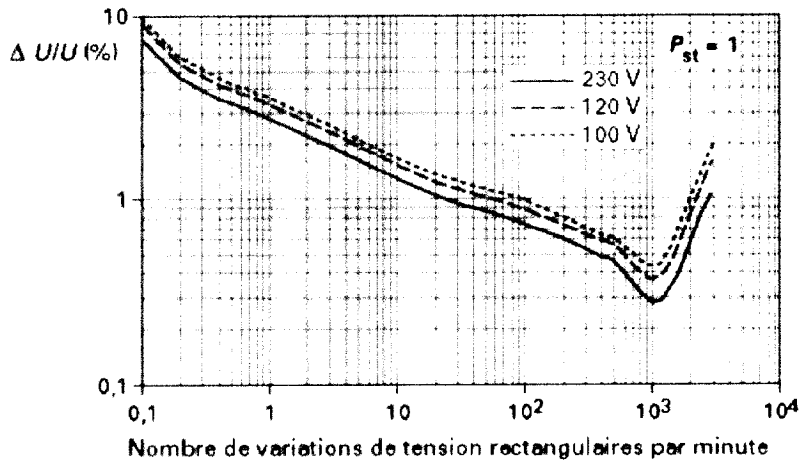

Figure 2.19 : Variation de la tension en pourcent en fonction du nombre de variations par minute pour P_{st}=1[3].

Sur la Figure 2.19, ce qui est appelé « variations rectangulaires » correspond à des fluctuations carrées de tension; la Figure 2.20 ci-dessous représente une tension à fluctuations rectangulaires.

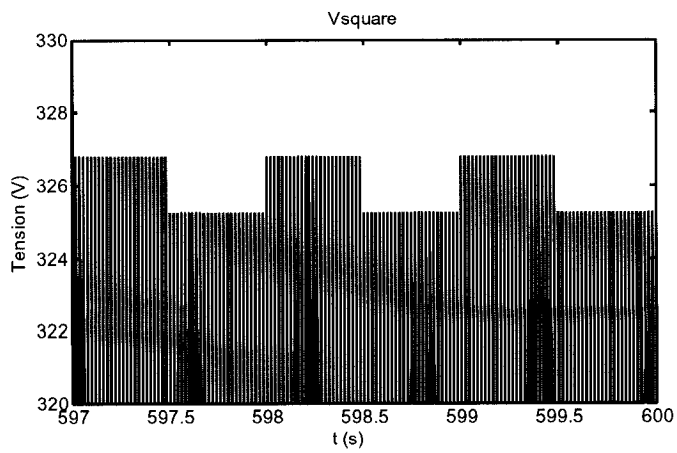

Figure 2.20 : Exemple de tension à variations rectangulaires

Hz	Fluctuation de tension %		Hz	Fluctuation de tension %	
	Lampe 120V réseau 60Hz	Lampe 230V réseau 50Hz		Lampe 120V réseau 60Hz	Lampe 230V réseau 50Hz
0,5	2,457	2,340	10,0	0,339	0,260
1,0	1,463	1,432	10,5	0,355	0,270
1,5	1,124	1,080	11,0	0,374	0,282
2,0	0,940	0,882	11,5	0,394	0,296
2,5	0,814	0,754	12,0	0,420	0,312
3,0	0,716	0,654	13,0	0,470	0,348
3,5	0,636	0,568	14,0	0,530	0,388
4,0	0,569	0,500	15,0	0,593	0,432
4,5	0,514	0,446	16,0	0,662	0,480
5,0	0,465	0,398	17,0	0,737	0,530
5,5	0,426	0,360	18,0	0,815	0,584
6,0	0,393	0,328	19,0	0,897	0,640
6,5	0,366	0,300	20,0	0,981	0,700
7,0	0,346	0,280	21,0	1,071	0,760
7,5	0,332	0,266	22,0	1,164	0,824
8,0	0,323	0,256	23,0	1,262	0,890
8,8	0,321	0,250	24,0	1,365	0,962
9,5	0,330	0,254	25,0	1,472	1,042
			33,33	Essai non prescrit	2,130
			40,0	4,424	Essai non prescrit

Tableau 2.1: Réponse normalisée d'un flickermètre

pour des fluctuations sinusoïdales de la tension [2]

Dans les sections suivantes, les résultats obtenus pour chaque modèle de l'arc électrique sont analysés.

Toutes les simulations suivantes ont été effectuées avec un pas de calcul Δt=1ms et un temps de calcul T=600s (soit 10 min). Ce temps de calcul T est le temps nécessaire pour calculer la sévérité du flicker à court terme P_{st} (cf.[2]).

2.2.2. Modèle 1 : R_{arc} statique.

Le temps de calcul nécessaire pour effectuer la simulation de 10 min sous EMTP-RV est de 98,406 secondes.

À partir de la courbe obtenue à la Figure 2.21, on calcule une sévérité P_{st}=0,9797.

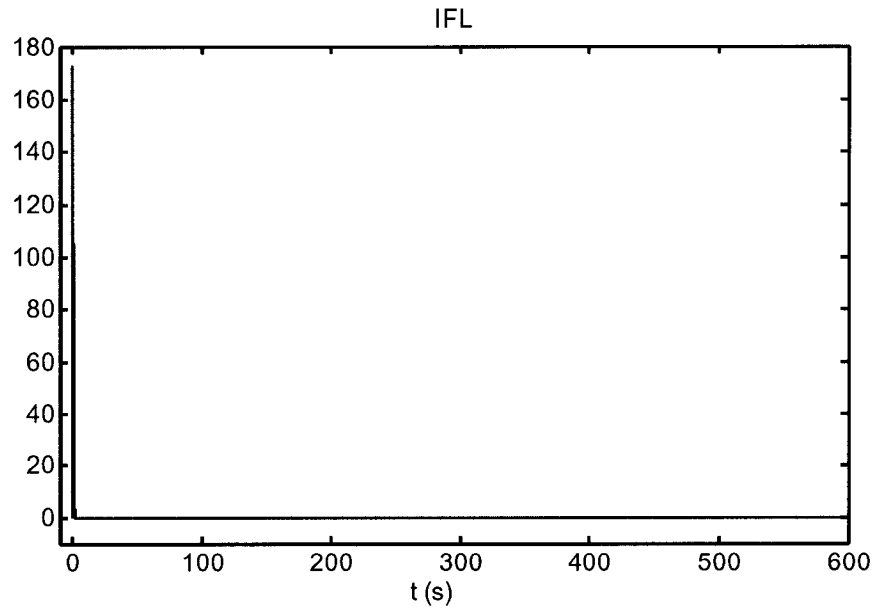

Figure 2.21 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle statique

Au PCC, on détermine la variation de la tension en pourcentage $\left.\frac{\Delta V}{V}\right)_{max}$ =1,098% qui varie périodiquement à la fréquence de 20 Hz (ce qui correspond à 2400 variations par minute) (Fig. 2.22).

D'après la norme [2], ce résultat est dans la limite acceptée. On peut donc considérer notre modèle comme convenable pour R_{arc} statique.

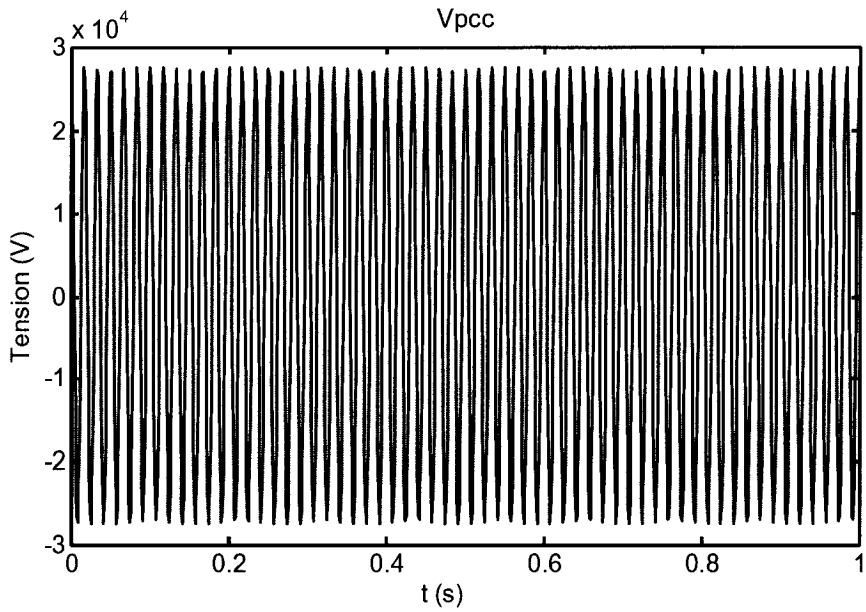

Figure 2.22 : Tension au PCC

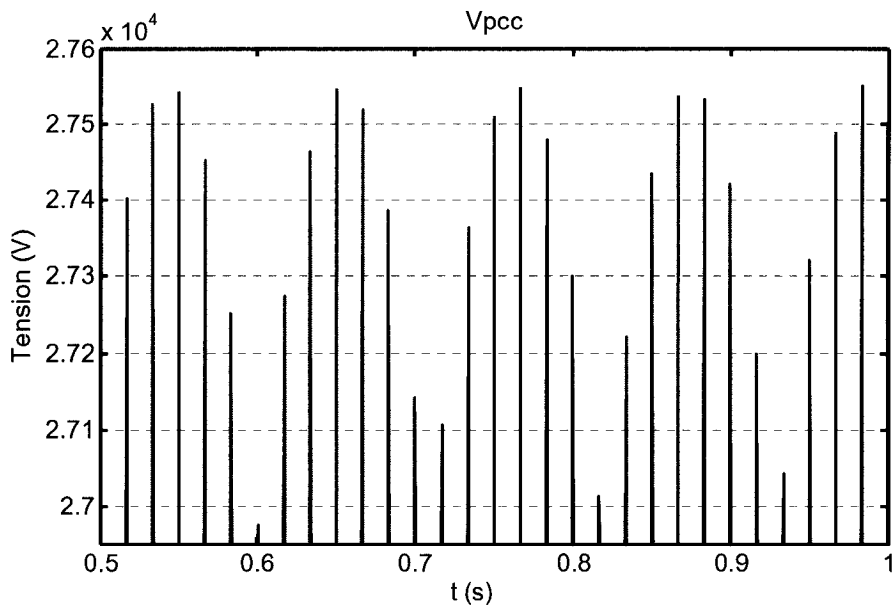

Figure 2.23 : Zoom de la Figure 2.21, tension au PCC

2.2.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}.

Le temps de calcul nécessaire pour effectuer la simulation de 10 min sous EMTP-RV est de 106,45 secondes.

À partir de la Figure 2.24, on calcule une sévérité P_{st} =6,01.

Au PCC, on détermine la variation de la tension en pourcentage $\left.\frac{\Delta V}{V}\right)_{max}$ =2,00% (Fig.2.25) qui varie périodiquement à la fréquence de 5 Hz (ce qui correspond à 600 variations par minute).

En se ramenant à une unité de perceptibilité (P_{st}=1), on obtient une variation de $\left.\frac{\Delta V}{V}\right)_{max}$ =0,381%. C'est cette dernière valeur qui sera comparée avec la norme.

D'après Figure 2.19 et le Tableau 2.1, les résultats sont proches des valeurs de variation de tension correspondant à la fréquence de variation.

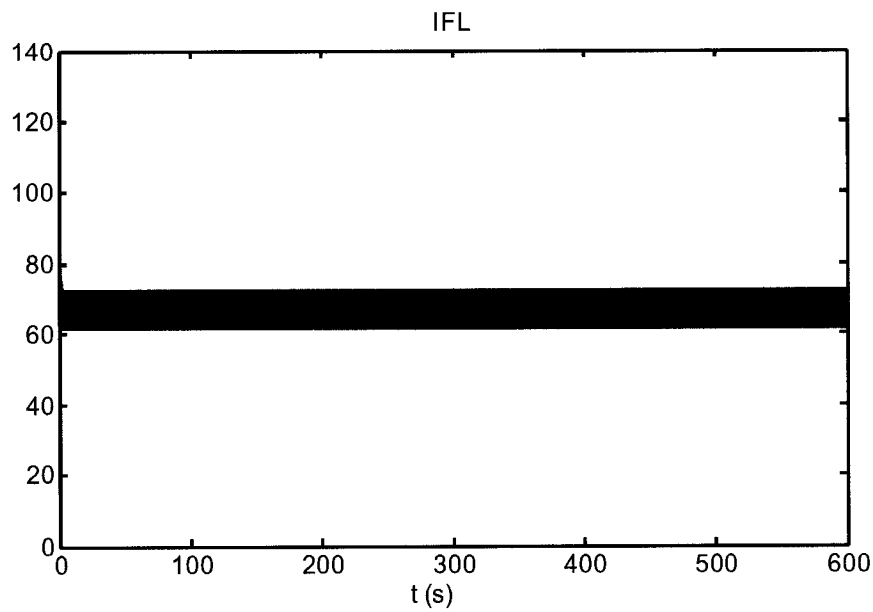

Figure 2.24 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle sinusoïdal

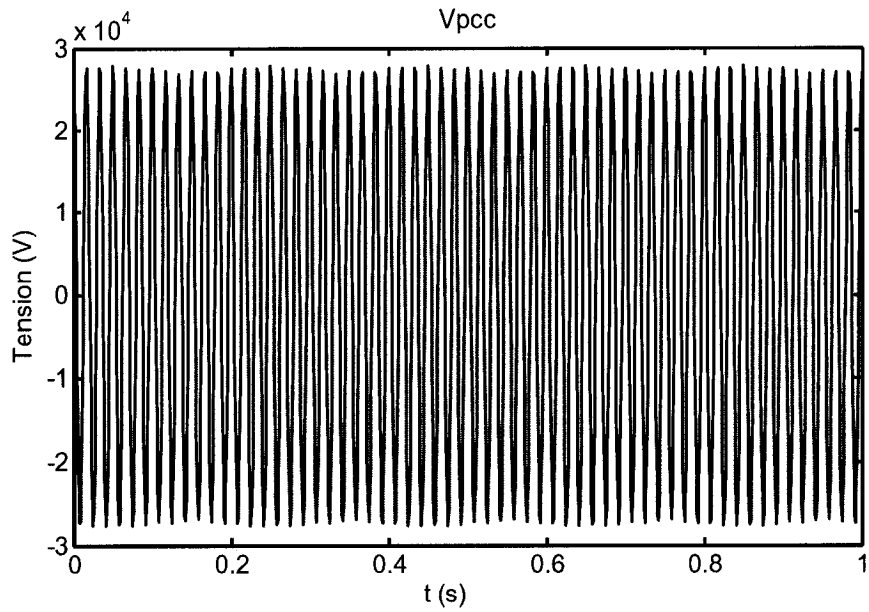

Figure 2.25 : Tension au PCC

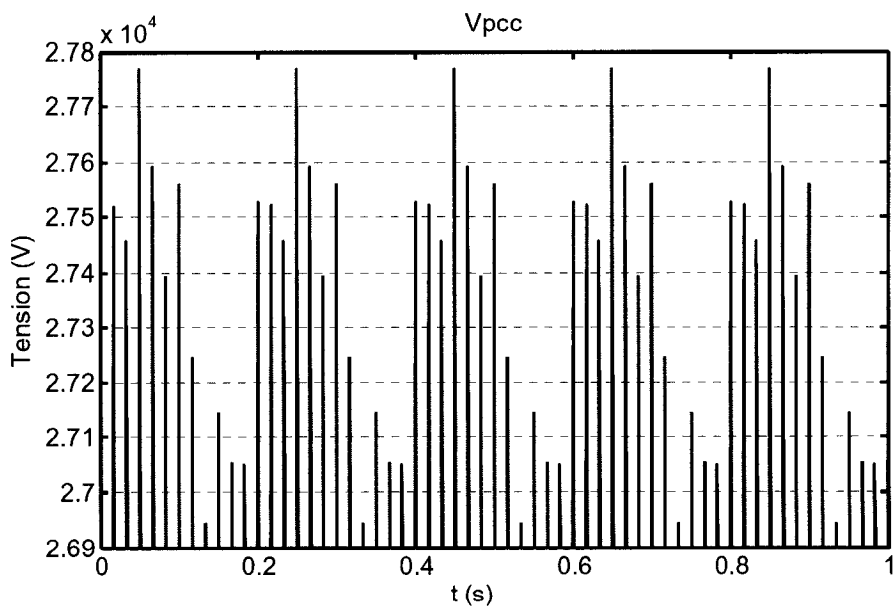

Figure 2.26 : Zoom de la figure 2.24, tension au PCC

2.2.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}.

Le temps de calcul nécessaire pour effectuer la simulation de 10 min sous EMTP-RV est de 104,203 secondes.

À partir de la Figure 2.27, on calcule une sévérité P_{st} =1,0354.

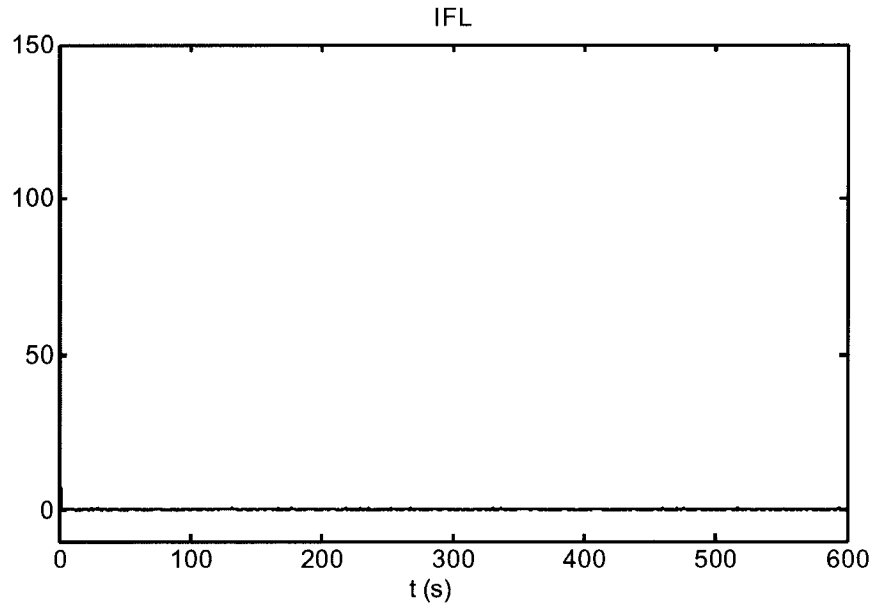

Figure 2.27 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle gaussien

Au PCC, on détermine la variation de la tension en pourcentage $\left.\frac{\Delta V}{V}\right)_{max}$ =0,18% (Fig.2.28), mais cette variation de tension n'est pas périodique.

Cependant, la variation de la tension est maximale avec une sévérité proche de l'unité. Comme l'unité de perceptibilité est le seuil correspondant au seuil de perceptibilité humain, ceci peut suffire à vérifier nos résultats.

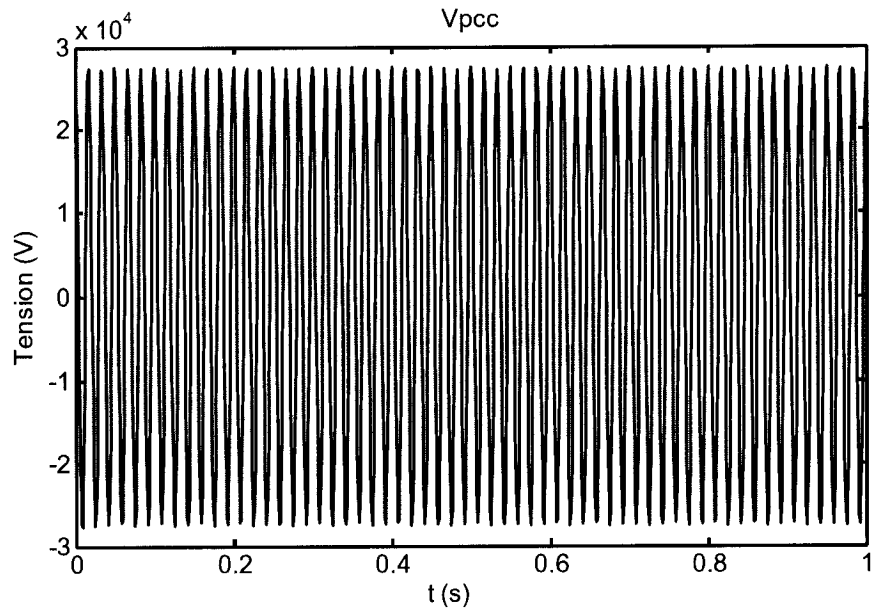

Figure 2.28 : Tension au PCC

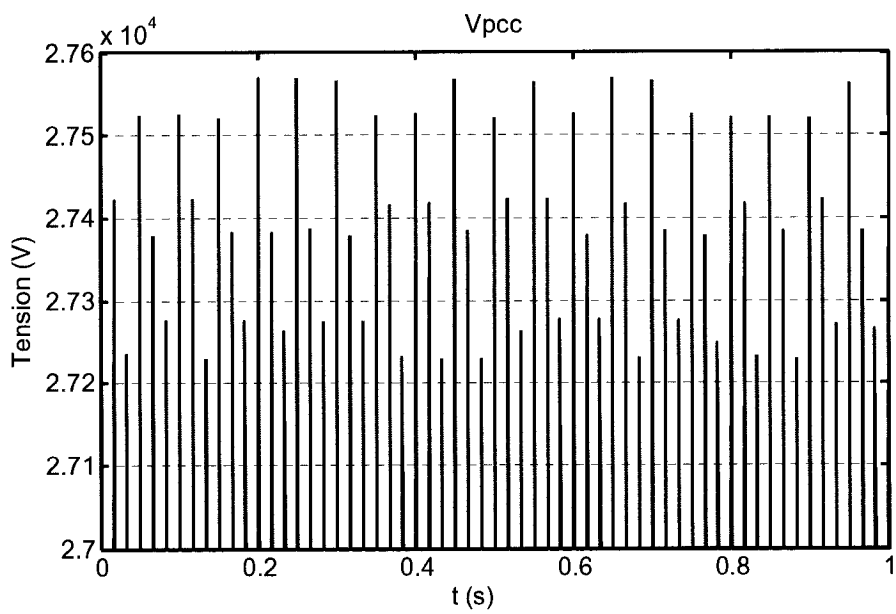

Figure 2.29 : Zoom de la figure 2.28, tension au PCC

2.2.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}.

Le temps de calcul nécessaire pour effectuer la simulation de 10 min sous EMTP-RV est de 104,28 secondes.

À partir de la Figure 2.30, on calcule une sévérité P_{st} =3,2746.

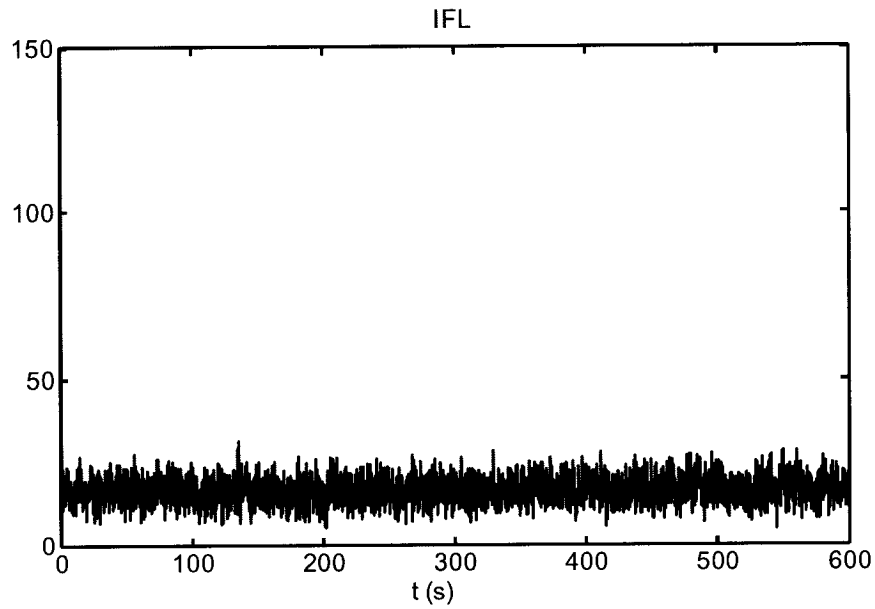

Figure 2.30 : Niveau de sensation du flicker I_{FL} pour le modèle chaotique

Au PCC, on détermine la variation de la tension en pourcentage $\left.\frac{\Delta V}{V}\right)_{max}$ =2,52% (Fig.2.31), mais cette variation de tension n'est pas périodique.

Étant donné que la sévérité P_{st} n'est pas égale à l'unité, il n'est pas possible de conclure sur la vérification du modèle chaotique avec la norme. Cependant, la variation de tension n'est pas trop élevée, cette valeur est tout à fait acceptable.

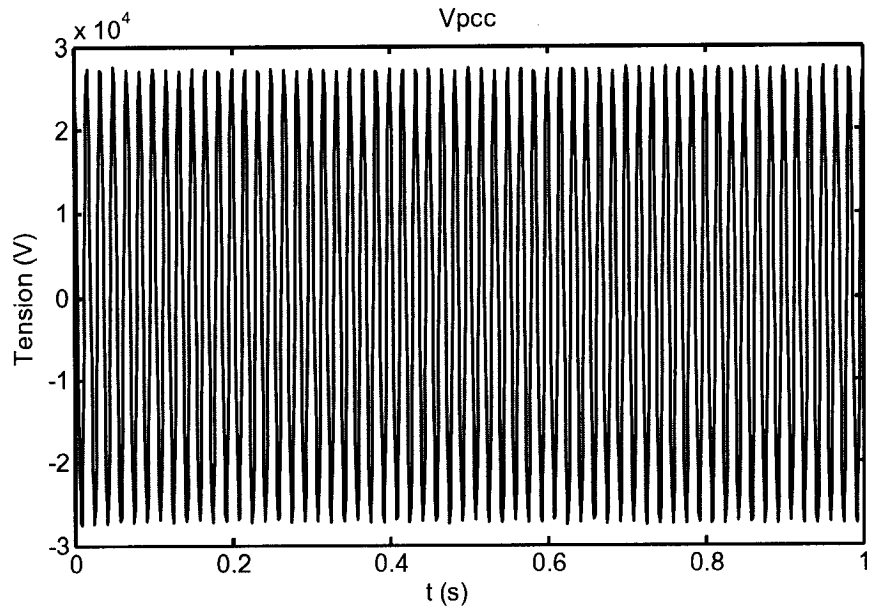

Figure 2.31 : Tension au PCC

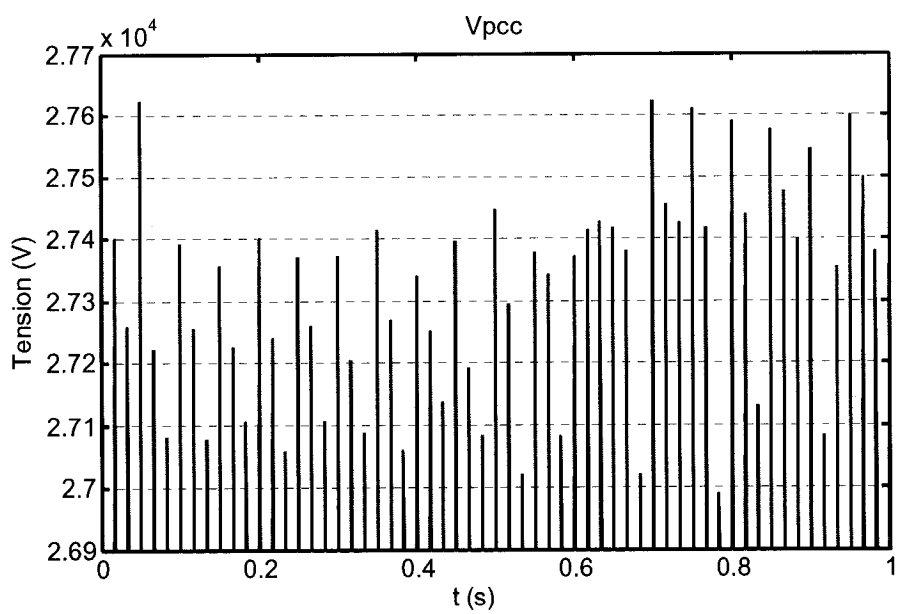

Figure 2.32 : Zoom de la figure 2.31, tension au PCC

2.3. Utilisation des caractéristiques électriques du four à arc

2.3.1. Procédure d'évaluation

Les tracés de la tension normalisée, du facteur de puissance et de la puissance réactive du four à arc sont obtenus en fonction du courant normalisé. Les tracés obtenus sont alors comparés avec ceux déjà existants pour les fours à arc ca. Ces courbes sont obtenues pour une simulation correspondant à une durée d'une période environ (soit T=1/60=16,7 ms).

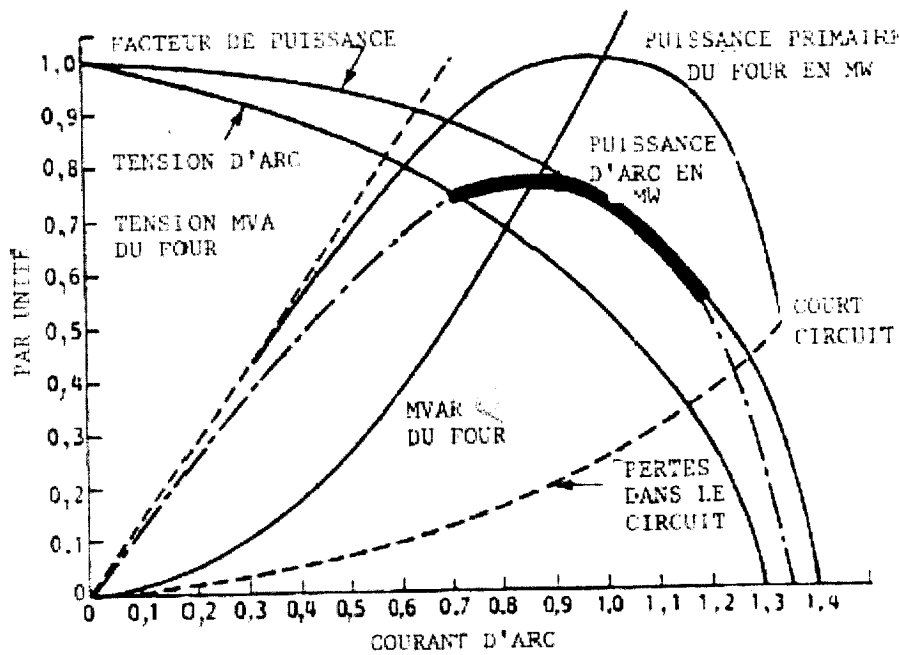

Figure 2.33 : Caractéristiques électriques du four [13]

2.3.2. Modèle 1 : pas de variation de R_{arc}.

Les tracés obtenus ont la même allure que celles de la Figure 2.33 du rapport de l'ACE [13].

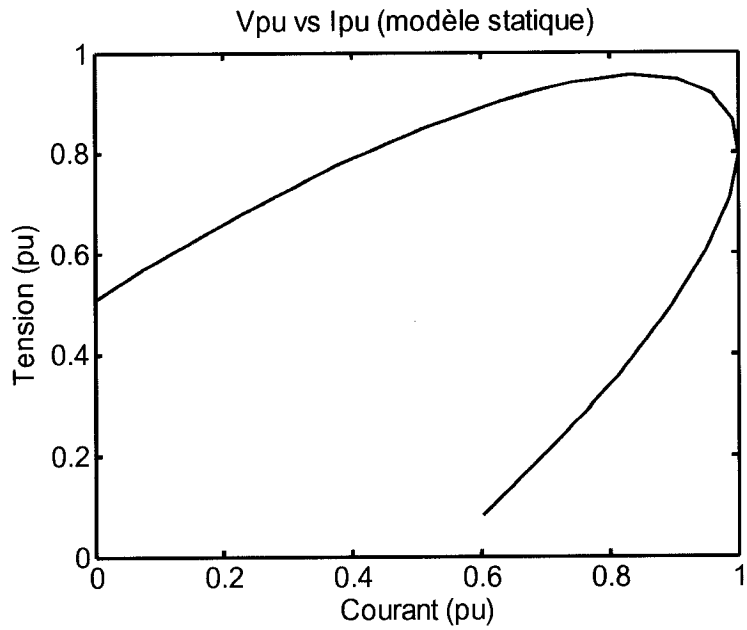

Figure 2.34 : V_{arc} en pu en fonction de I_{arc} en pu

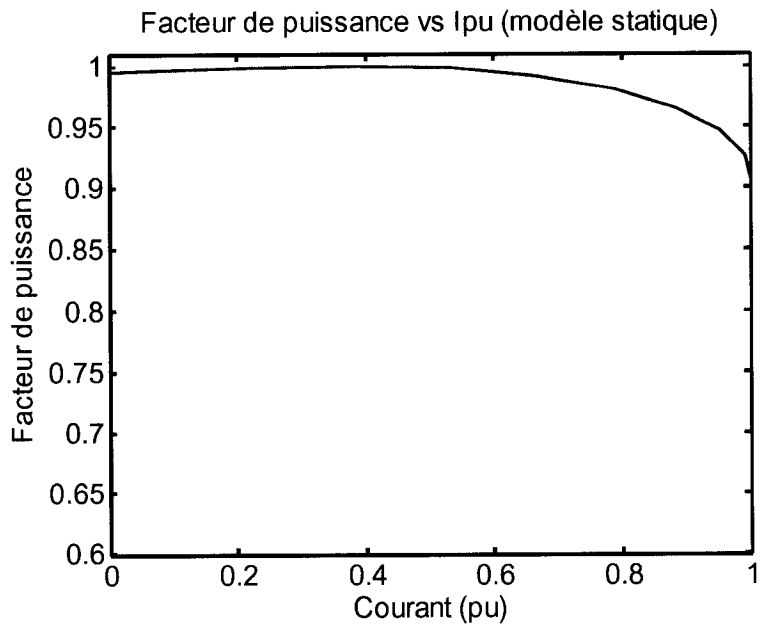

Figure 2.35 : Facteur de puissance du four en fonction de I_{arc} en pu

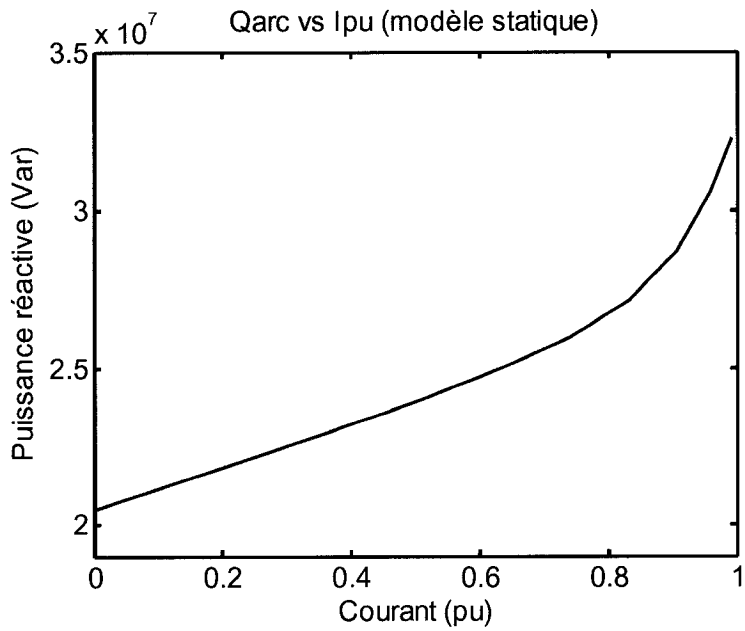

Figure 2.36 : Q_{arc} en fonction de I_{arc} en pu

2.3.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}.

Les tracés obtenus ont sensiblement la même allure que celle de la Figure 2.33.

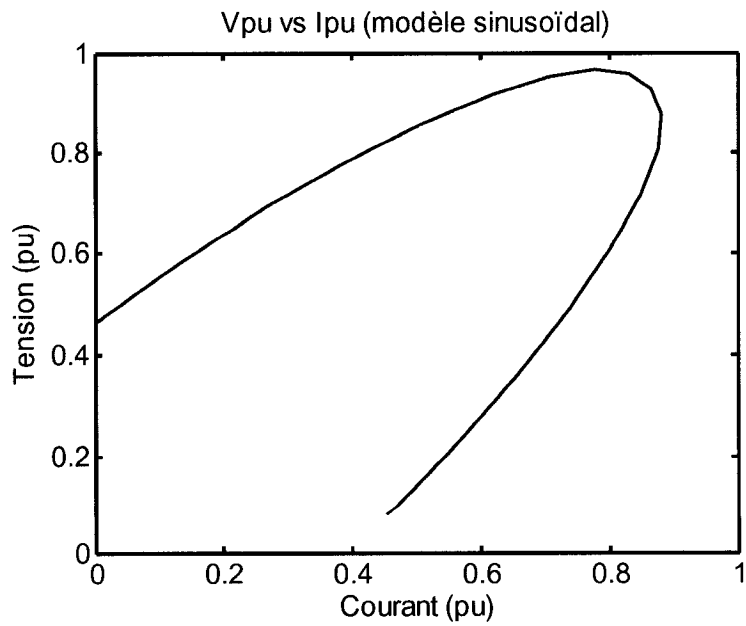

Figure 2.37 : V_{arc} en pu en fonction de I_{arc} en pu

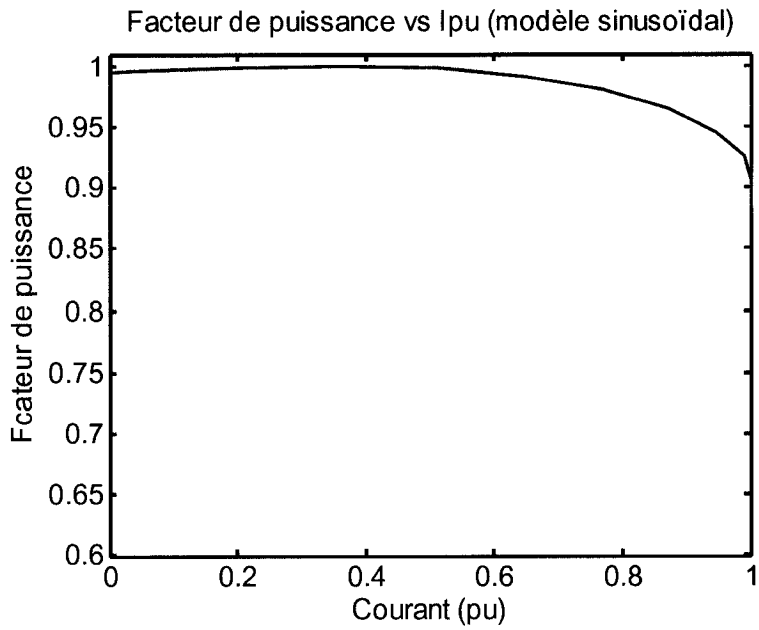

Figure 2.38 : Facteur de puissance du four en fonction de I_{arc} en pu

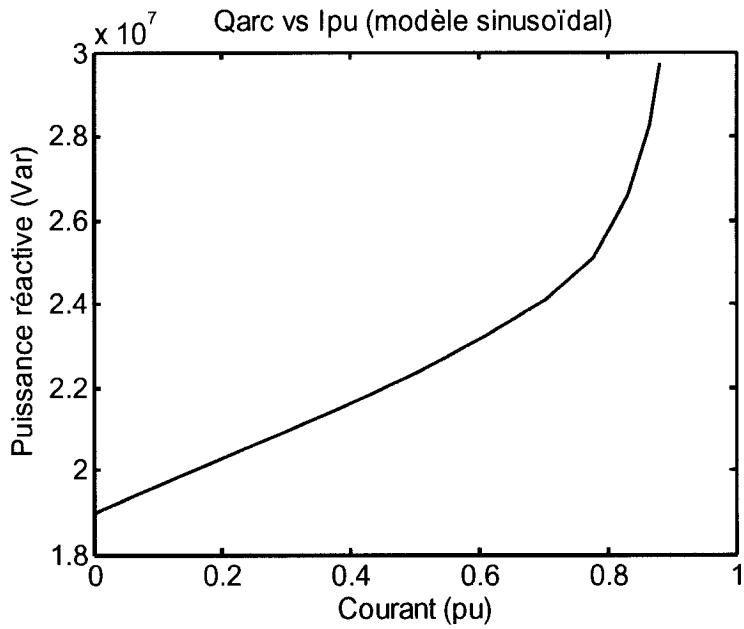

Figure 2.39 : Q_{arc} en fonction de I_{arc} en pu

2.3.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}.

Les tracés obtenus ont sensiblement la même allure que celle de la Figure 2.33.

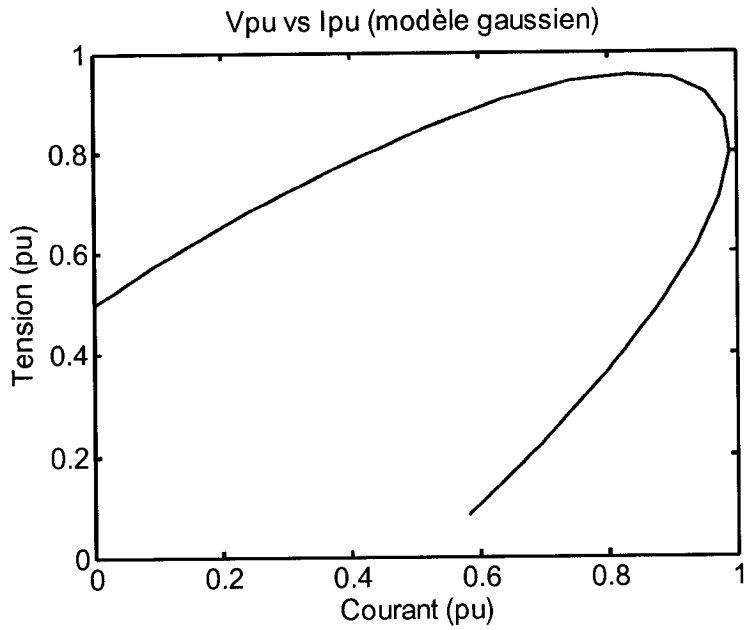

Figure 2.40 : V_{arc} (en pu) fonction de I_{arc} (en pu)

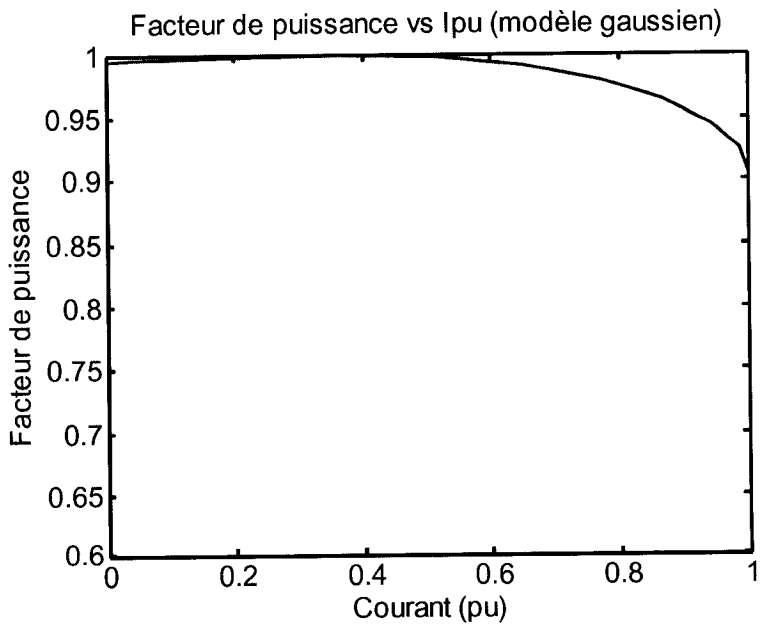

Figure 2.41 : Facteur de puissance du four fonction de I_{arc} en pu

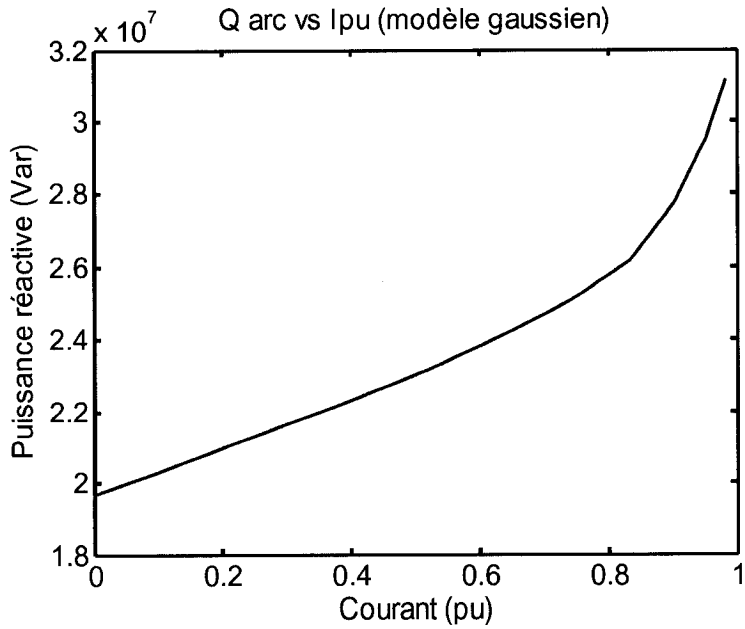

Figure 2.42 : Q_{arc} fonction de I_{arc} (en pu)

2.3.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}.

Les tracés obtenus ont sensiblement la même allure que celle de la Figure 2.33.

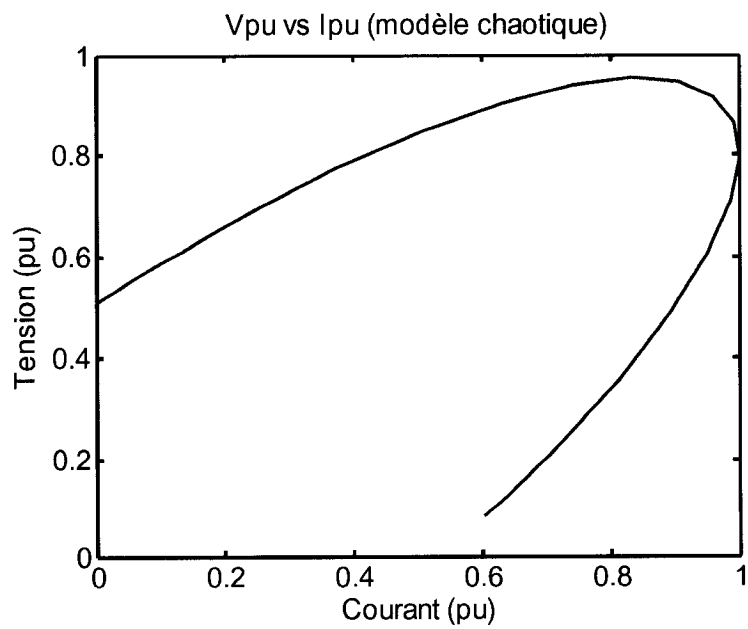

Figure 2.43 : V_{arc} (en pu) fonction de I_{arc} (en pu)

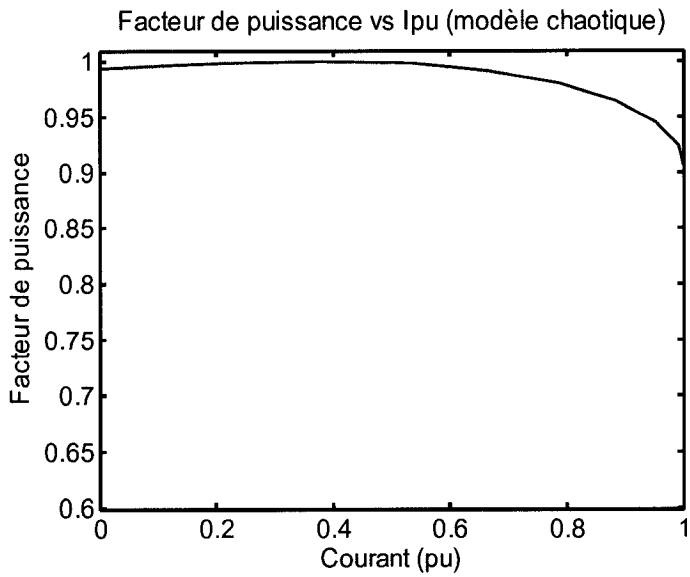

Figure 2.44 : Facteur de puissance du four fonction de I_{arc} (en pu)

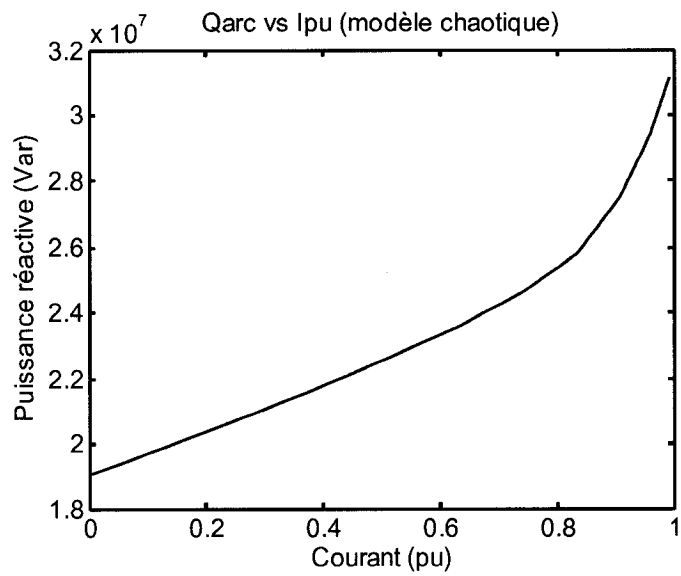

Figure 2.45 : Q_{arc} fonction de I_{arc} (en pu)

Conclusion :

Le rapport de l'Association Canadienne d'Électricité présente des données prises sur des fours à arc en service. En comparant les allures obtenues avec le modèle du four ca, il est possible de valider le modèle du four ca en comparant les allures générales du modèle avec ceux obtenus sur des fours réels.

2.4. Étude des spectres et des harmoniques

2.4.1. Procédure d'évaluation

L'étude des spectres de la tension et du courant au PCC nous permettra d'identifier l'amplitude des harmoniques.

On comparera ensuite les harmoniques aux niveaux de compatibilité des réseaux (Tableau 2.2) et de la représentation des courants harmoniques des fours à arc présenté au Tableau 2.3 [3]. Cette étude porte sur les harmoniques de rang 2 à 7.

Tableau 3 - Niveaux de compatibilité des réseaux					
Harmoniques impairs non multiples de 3		Harmoniques impairs multiples de 3		Harmoniques pairs	
Rang harmonique	Tension harmonique (%)	Rang harmonique	Tension harmonique (%)	Rang harmonique	Tension harmonique (%)
5	2	3	2	2	1.5
7	2	9	1	4	1
11	1.5	15	0.3	6	0.5
13	1.5	21	0.2	8	0.2
17	1	> 21	0.2	10	0.2
19	1			12	0.2
23	0.7			> 12	0.2
25	0.7				
> 25	0.2 + 2.5/h				
Taux global de distorsion inférieur ou égal à 3 %					

Tableau 2.2 : Niveau de compatibilité des réseaux pour les harmoniques de tension [3]

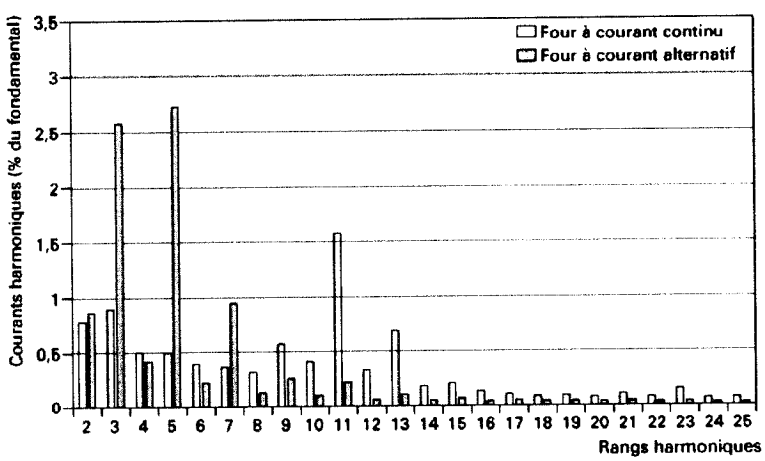

Tableau 2.3: Représentation des courants harmoniques d'un four à arc [3]

2.4.2. Modèle 1 : pas de variation de R_{arc}.

À l'aide de la fonction FFT (Fast Fourier Transform) de ScopeView de EMTP-RV, les spectres du courant et de la tension au PCC ont été obtenus. On constate que dans le modèle statique de R_{arc}, la seule fréquence notable sur les spectres obtenus est la fondamentale (qui est à 60 Hz).

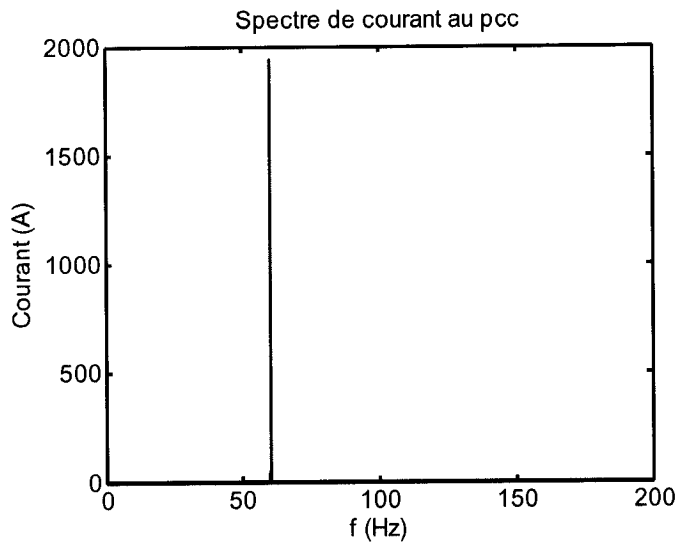

Figure 2.46 : Spectre du courant au PCC

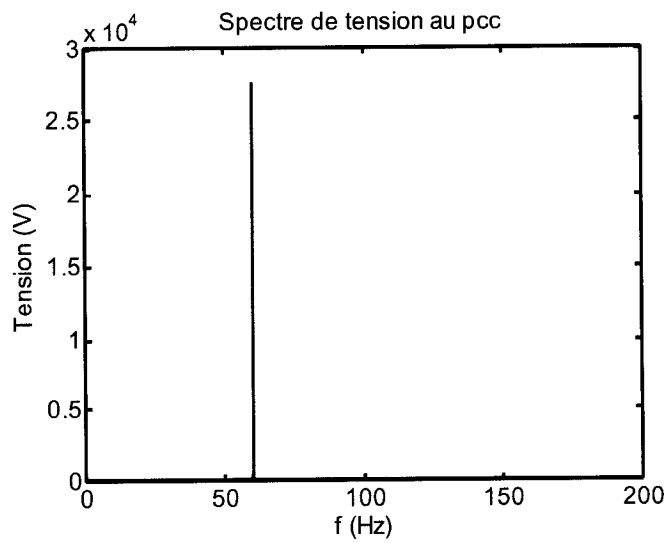

Figure 2.47 : Spectre de la tension au PCC

Même s'il n'est pas possible d'observer les harmoniques (de rang 1 à 7) sur les Figures 2.46 et 2.47, elles existent mais leur amplitude sont très faibles dans le cas de notre modèle statique de R_{arc}. Sur les schémas suivants, l'amplitude des harmoniques de tension et de courant à partir du rang 2 sont présentées.

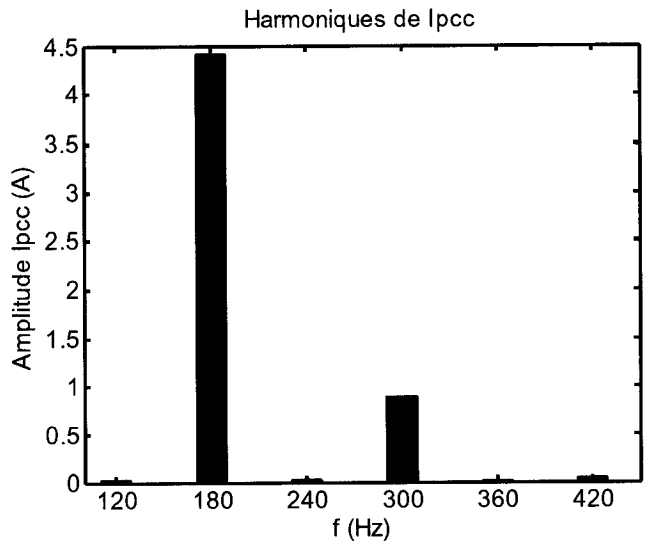

Figure 2.48 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7.

L'harmonique de courant de rang 3 (180Hz) est la plus élevée, elle ne correspond qu'à 0,22% de l'amplitude de la fondamentale.

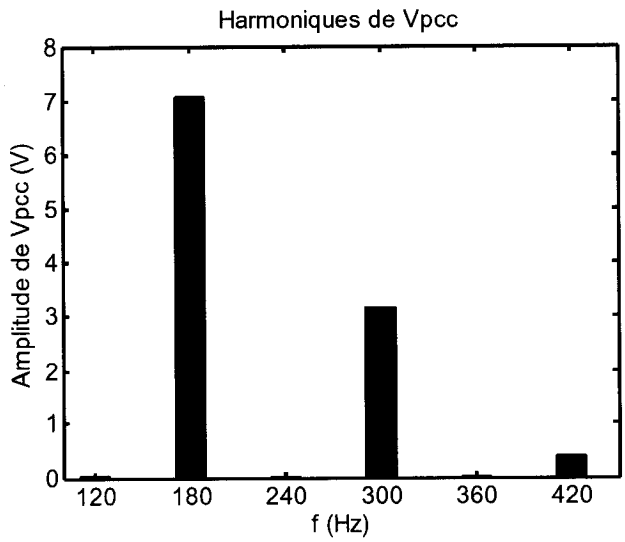

Figure 2.49 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7.

L'harmonique de tension de rang 3 est la plus élevée, et elle correspond à 0,025% de l'amplitude de la fondamentale.

Un tableau comparant les harmoniques de tension et de courant de tous les modèles de résistances d'arc sera présenté à la fin.

2.4.3. Modèle 2 : variation sinusoïdale de R_{arc}.

À l'aide de la fonction FFT de ScopeView de EMTP-RV, les spectres du courant et de la tension au PCC ont été obtenus. La fondamentale à 60 Hz est celle ayant l'amplitude la plus élevée sur les spectres obtenus.

Cependant, pour le spectre du courant, on remarque la présence de raies qui se répètent tous les 5 Hz de part et d'autre de la fondamentale. Cette fréquence de 5 Hz correspond à la fréquence de l'enveloppe de la tension V_{PCC} (Fig.2.25). ($\frac{\Delta V}{V}$ est périodique de période 5 Hz). Elles représentent des interharmoniques, dont les fours à arcs représentent la principale source.

Ces interharmoniques sont présentes lorsque l'origine du procédé ou le contrôle de position des électrodes n'a pas de relation de synchronisme avec la fréquence du réseau d'alimentation.

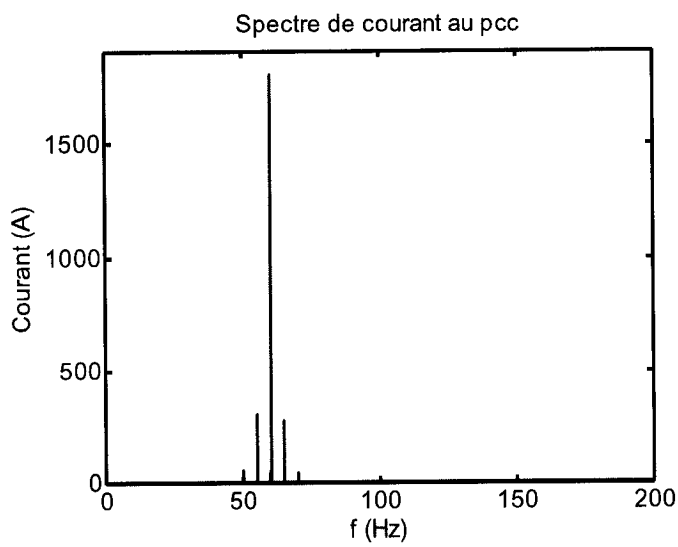

Figure 2.50 : Spectre de courant au PCC

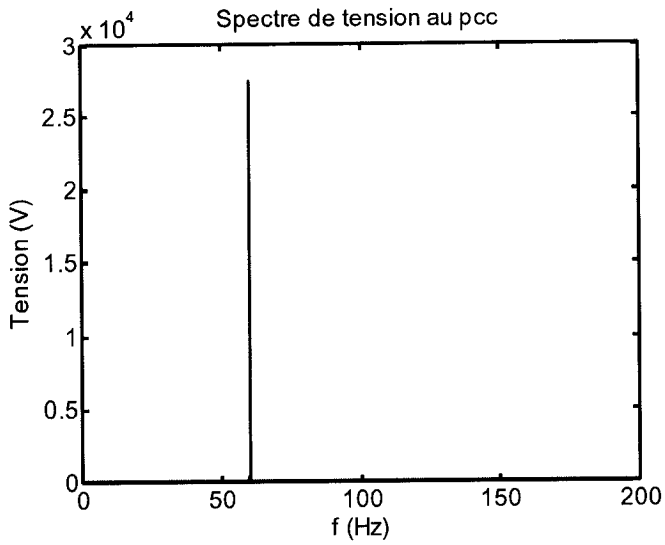

Figure 2.51 : Spectre de tension au PCC

On remarque que les harmoniques sont très faibles en pourcentage de la fondamentale et que ce sont les harmoniques de rang impair qui sont présentes (Fig. 2.52 et 2.53). Les harmoniques de courant de rang 3 sont les plus élevées, cependant elles restent d'amplitude relative très faible. Les harmoniques de tension sont encore plus faibles et même négligeables.

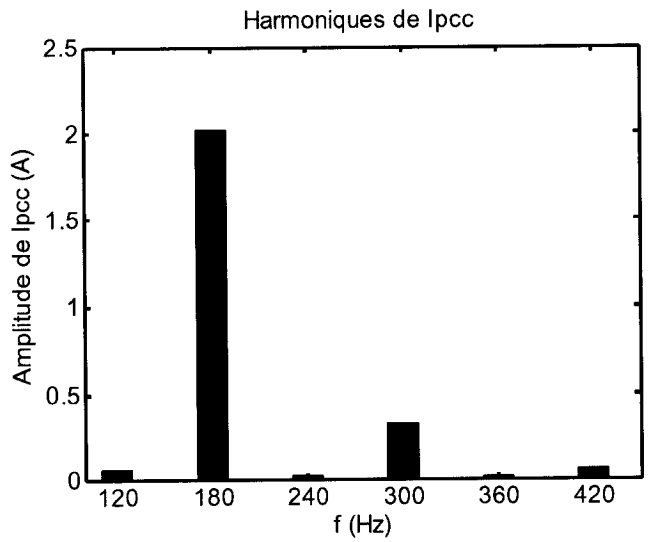

Figure 2.52 : Harmonique de courant du rang 2 à 7

L'harmonique de tension de rang 3 est deux fois plus faible que celle du modèle statique.

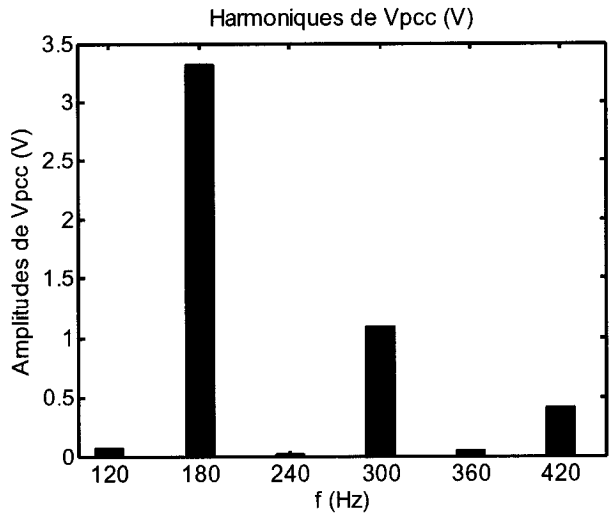

Figure 2.53 : Harmonique de tension du rang 2 à 7

2.4.4. Modèle 3 : variation normale de R_{arc}.

À l'aide de la fonction FFT de ScopeView de EMTP-RV, les spectres du courant et de la tension au PCC ont été obtenus. Dans le modèle gaussien de R_{arc}, la seule fréquence notable sur les spectres obtenus est la fréquence fondamentale (qui est à 60 Hz).

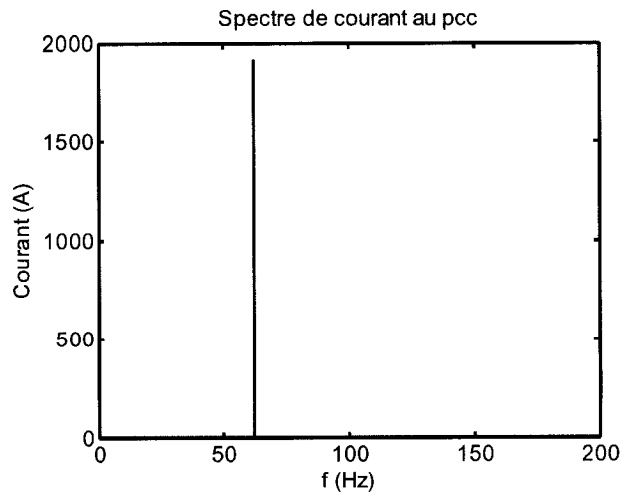

Figure 2.54 : Spectre du courant au PCC

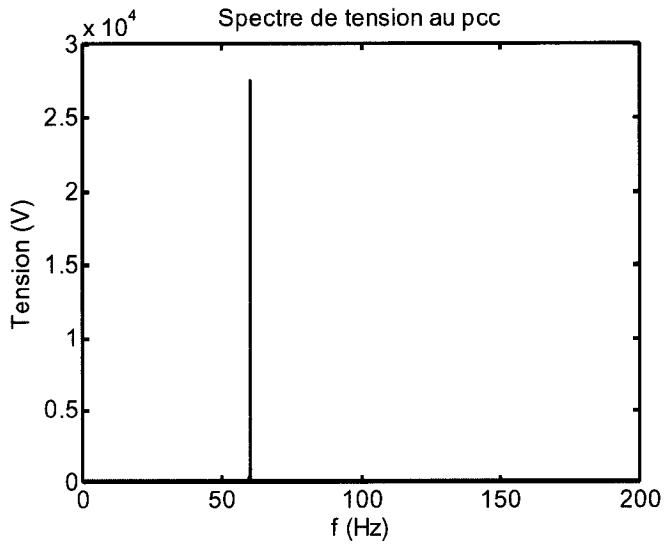

Figure 2.55 : Spectre de la tension au PCC

Les Figures 2.56 et 2.57 présentent l'amplitude des harmoniques (de rang 2 à 7) de ce modèle.

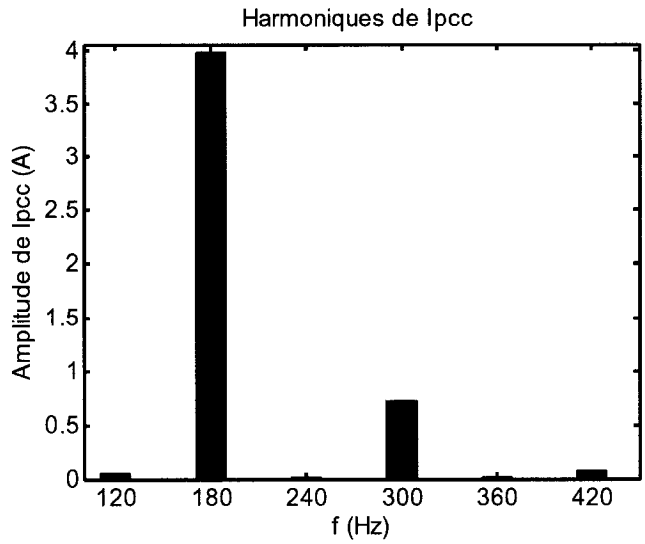

Figure 2.56 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7.

L'harmonique de courant de rang 3 (180Hz) est la plus élevée, elle ne correspond qu'à 0,2% de l'amplitude de la fondamentale.

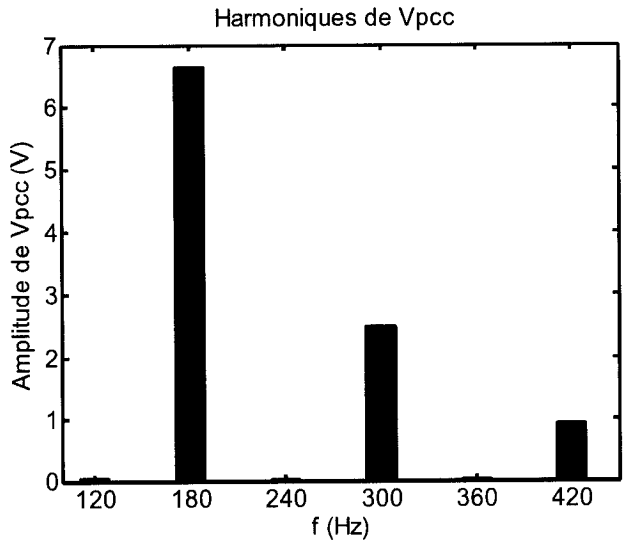

Figure 2.57 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7.

L'harmonique de rang 3 est la plus élevée, et elle est seulement de 0,02% de l'amplitude de la fondamentale.

2.4.5. Modèle 4 : variation chaotique de R_{arc}.

À l'aide de la fonction FFT de ScopeView de EMTP-RV, les spectres du courant et de la tension au PCC ont été obtenus. On constate que dans le modèle chaotique de R_{arc}, la seule fréquence notable sur les spectres obtenus est la fondamentale (qui est à 60 Hz).

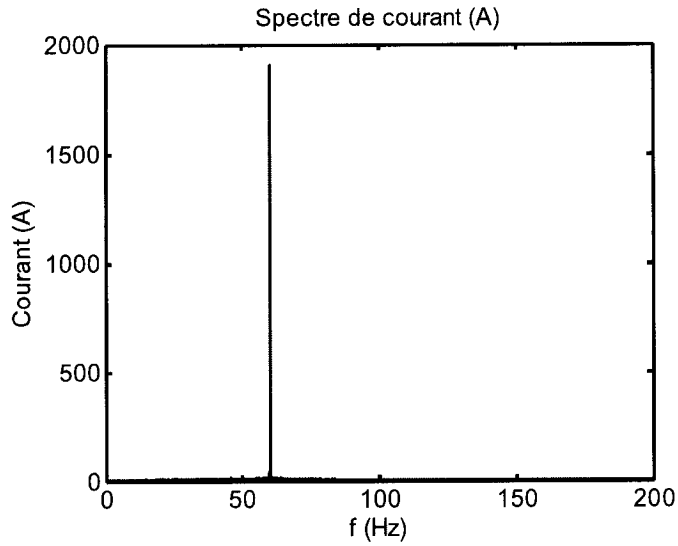

Figure 2.58 : Spectre du courant au PCC

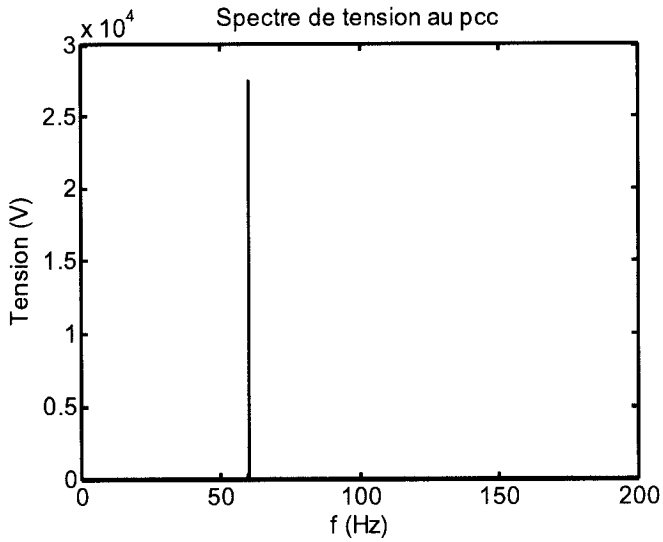

Figure 2.59 : Spectre de la tension au PCC

Les Figures 2.60 et 2.61 présentent l'amplitude des harmoniques (de rang 2 à 7) de ce modèle.

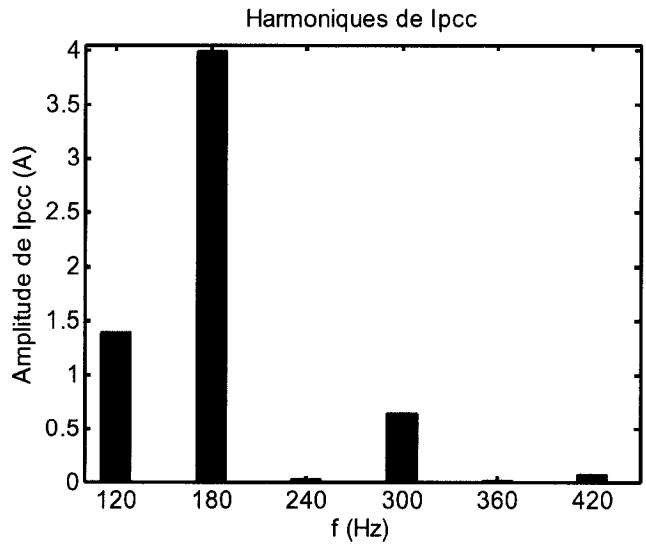

Figure 2.60 : Harmoniques de courant de rang 2 à 7.

L'harmonique de courant de rang 3 (180Hz) est la plus élevée, elle ne correspond qu'à 0,34% de l'amplitude de la fondamentale.

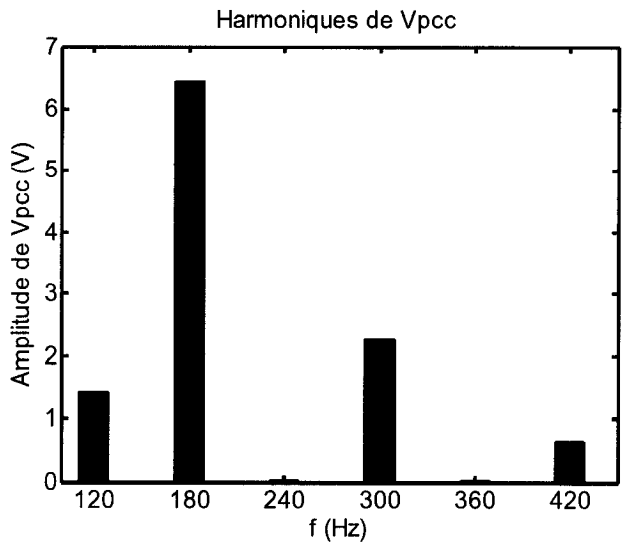

Figure 2.61 : Harmoniques de tension de rang 2 à 7.

L'harmonique de rang 3 est la plus élevée, et elle est seulement de 0,014% de l'amplitude de la fondamentale.

2.4.6. Récapitulatif

Ci-dessous, sont présentés deux tableaux qui rassemblent l'amplitude (en pourcentage de la fondamentale) des harmoniques de tension et de courant de chaque modèle de la résistance d'arc du four CA.

Harmoniques de rang (% de la fondamentale)	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Fondamentale (A)	1939	1795	1917	1906
2	0,000	0,003	0,002	0,074
3	0,227	0,113	0,207	0,337
4	0,001	0,001	0,000	0,001
5	0,046	0,018	0,037	0,119
6	0,000	0,001	0,000	0,000
7	0,002	0,003	0,003	0,033

Tableau 2.4 : Amplitude (en % du fondamental) des harmoniques de courant de tous les modèles de R_{arc}

Dans les fours à arc à courant alternatifs, les harmoniques de courant de rang impair sont généralement prépondérants, c'est ce qui est constaté au Tableau 2.4. En effet, les harmoniques de rang impair (surtout le rang 3) sont les plus élevées. Cependant cela reste tout de même très faible (0,22% en moyenne), on reste bien inférieur au 2,5% du fondamental, présenté au Tableau 2.3.

Harmoniques de rang (% de la fondamentale)	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3	Modèle 4
Fondamentale (V)	27560	27510	27220	27530
2	0,000	0,002	0,000	0,005
3	0,026	0,012	0,024	0,014
4	0,000	0,000	0,000	0,000
5	0,011	0,004	0,009	0,002
6	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,001	0,002	0,003	0,000

Tableau 2.5 : Amplitude (en % du fondamental) des harmoniques de tension de tous les modèles de R_{arc}

Les harmoniques de tension sont toutes très faibles, de l'ordre de 0,02% de la fondamentale. Ces valeurs sont très faibles, les harmoniques de tension sont bien en dessous des limitations fournies au Tableau 2.5.

CONCLUSION

Ce projet de recherche a permis la création de modèles sous EMTP-RV, en utilisant des composants appartenants à la librairie de EMTP-RV.

Le four à arc à courant continu est un tout premier modèle existant sous EMTP-RV. Dans l'industrie, il existe de nombreux modèles différents de four à courant continu; le modèle développé peut alors servir de modèle de base pour la création sous EMTP-RV de d'autres modèles. Cependant, le modèle développé est le plus récent et le plus coûteux, ce qui explique que de tels fours sont peu répandus (ils existent en Europe uniquement).

Les résultats obtenus pour le four cc sont pour des temps de simulation de 3 secondes, ce qui est court, car en pratique le fonctionnement d'un four à arc est d'environ 45 minutes par étape.

Il est possible d'améliorer le modèle en modifiant le système de contrôle du hacheur (convertisseur cc/cc), plus précisément le contrôle des IGBTs. En effet, il n'a pas été possible d'obtenir de données réelles concernant la réalisation de ce module, certaines données étant très souvent à usage interne de l'industrie métallurgique.

Le four à courant alternatif est, quant à lui, très répandu. Il est utilisé dans de nombreuses aciéries au Canada (par exemple, l'aciérie les Forges de Sorel au Québec). Les tests de validation et d'évaluation du modèle sont satisfaisants, et conformes aux normes en vigueur. Par conséquent, le modèle du four ca est tout à fait convenable pour des essais en simulation. Il peut bien évidemment être amélioré suivant les besoins en simulation requis.

RÉFÉRENCE

[1] P.Ladoux, G.P., H.Foch,J.Nuns, *A Comparative Study of AC/DC Converters for High DC Arc Furnace.* IEEE Transactions on Industrial Electronics, June 2005. **52**(3): p. 747 - 757.

[2] *Flickermètre : spécifications fonctionnelles et de conception.* Septembre 2003. **CEI 61000-4-15**.

[3] M.KRATZ, *Fours à arcs.* Techniques de l'Ingénieur, 2007. **D 5 920**.

[4] J. Mahseredjian, S.D., L. Dubé, B. Khodabakhchian, L.Gérin-Lajoie, *On a new approach for the simulation of transients in power systems.* Electric Power Systems Research, September 2007. **Vol 77**(Issue 11): p. 1514-1520.

[5] P.Ladoux, G.P., H.Foch, J.Nuns, *Structure and design of high power chopper for DC Arc Furnace.* EPE-PEMC, Dubrovnik, Croatia, September 2002.

[6] J.Bekker, P.H.S., C.F.Landy, D.A.Marshall, *Modelling of a DC Arc Furnace for Optimal Integration with the Supply System.* Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE, 8-12 oct.1995. **2**: p. 1741 - 1748

[7] S. Park, K.M., *Random number generators: good ones are hard to find.* Communications of the ACM, October 1988. **Vol 31, Nb 10**.

[8] L.D.Bellomo, *Modèle EMTP-RV du four à arc triphasé.* 31 mai 2005.

[9] S. Varadan, E.B.M., A.A.Girgis, *A new time domain voltage source model for an arc furnace using EMTP.* IEEE Transactions on Power Delivery, July 1996. **11**(3): p. 1685 - 1691.

[10] G.C.Montanari, M.L., A.Cavallini, L.Pitti, D.Zaninelli, *Arc-furnace model for the study of flicker compensation in electrical networks.* IEEE Transactions on Power Delivery, October 1994. **9**(4): p. 2026-2036.

[11] G.Manchur, C.C.E., *Development of a model for predicting flicker from electric arc furnaces.* IEEE Transactions on Power Delivery, January 1992. **7**(1): p. 416-426.

[12] E.O'Neill-Carrillo, G.T.H., E.J. Kostelich, S.S. Venkata, A. Sundaram, *Nonlinear Deterministic Modeling of Highly Varying Loads.* IEEE Transactions on Power Delivery, April 1999. **Vol.14, n°2**.

[13] *Analyse du papillotement produit par les fours à arc*, A.C.d. l'Électricité, Editor. Septembre 1983.

ANNEXE A :
Flickermètre [2]

Le modèle existant sous EMTP correspond à la norme CEI 868 [2]. Des tests en accord avec cette norme ont été effectués pour valider le modèle de flickermètre.

A.1. Présentation du modèle

Le flickermètre est un appareil de mesure permettant d'évaluer le papillotement de la tension(ou « flicker »), ce dernier engendre une variation du flux lumineux. Il a été conçu afin de déterminer le niveau acceptable de perception du papillotement du flux lumineux (il est possible de faire une analogie avec la variation de luminosité d'une ampoule).
L'intérêt d'un tel appareil est de déterminer si les charges installées sur le réseau ne vont pas engendrer de fortes variations lumineuses qui sensibiliserait l'œil humain.

Le flickermètre peut être divisé en deux parties :

- la simulation de la réponse de la chaîne lampe-œil-cerveau
- l'analyse statistique du signal du flicker.

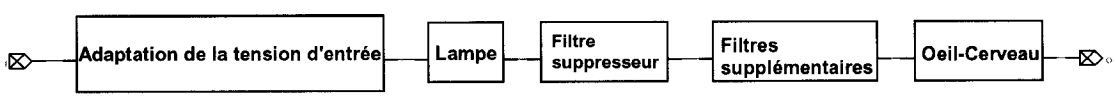

Figure A.1 : Modèle du flickermètre

A.1.1. Bloc « Adaptation de la tension d'entrée»

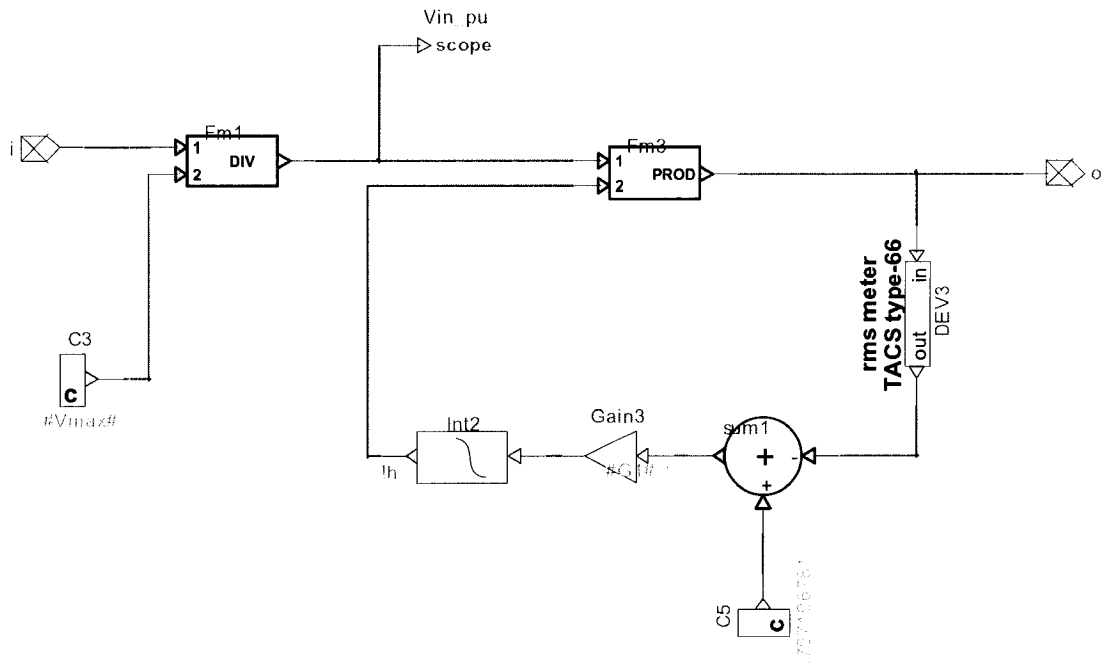

Figure A.2 : Modèle du bloc « Adaptation de la tension d'entrée »

Dans cette partie, il s'agit d'adapter la tension d'entrée en la ramenant à un niveau interne de référence (qui est la valeur moyenne de la valeur efficace du fondamental de la tension d'entrée), on obtient alors le signal V_{pu}.

Un correcteur RMS (« Root Mean Square » ou valeur efficace) a été ajouté pour minimiser et contrôler les variations de la tension en pu.

A.1.2. Ensemble « Lampe-œil-cerveau »

Dans cette partie, 4 blocs sont étudiés.

Le bloc « Lampe » (Fig.A.3) est constitué d'un démodulateur quadratique, dont le rôle est de restituer la fluctuation de la tension en élevant au carré la tension V_{pu}. Ce bloc permet de simuler le comportement d'une lampe incandescente.

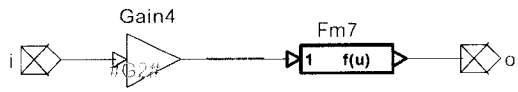

Figure A.3 : Modèle du bloc « Lampe »

La seconde partie est le bloc « Filtre suppresseur » (Fig.A.4). Il est composé de deux filtres en cascade permettant de supprimer des comportements indésirables, tels que la composante continue et la composante de fréquence double de celle du réseau, toutes deux présentes à la sortie du démodulateur quadratique. Les deux filtres composant ce bloc sont :

- un filtre passe haut du premier ordre, dont la fréquence de coupure à 3 dB est de 0.05 Hz (f_{cut}=0,05 Hz).
- un filtre passe-bas qui est un filtre de Butterworth du 6ème ordre avec une fréquence de coupure à 3 dB de 35 Hz (f_{cut}=35 Hz).

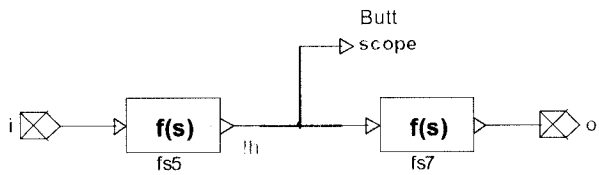

Figure A.4 : Modèle du bloc « Filtre suppresseur »

Le bloc « Filtres supplémentaires » comprend une fonction de transfert globale (Équ.A.1) pour les 2 blocs précédents dans le cas où le filtre suppresseur n'ait qu'une influence négligeable. Ce filtre permet de supprimer les fréquences indésirables provenant du démodulateur quadratique, et de simuler la réponse lampe-œil-cerveau. Cette fonction de transfert est définie comme ceci :

$$F(s) = \frac{k\omega_1 s}{s^2 + 2\lambda s + \omega_1^2} \cdot \frac{1 + s/\omega_2}{(1 + s/\omega_3)(1 + s/\omega_4)} \qquad \text{(A.1)}$$

Ces 3 blocs représentent la réponse d'une lampe à une variation de tension et la capacité de perception de l'œil humain.

Le dernier bloc « Œil-Cerveau » (Fig.A.5) est composé d'un élévateur au carré et d'un étage réalisant le lissage de la tension. L'élévateur au carré simule la perception non linéaire du couple œil-cerveau. Le lissage de la tension simule l'effet de mise en mémoire à court terme dans le cerveau, il est obtenu à l'aide d'un filtre passe-bas du 1er ordre avec une constante de temps de 300 ms.

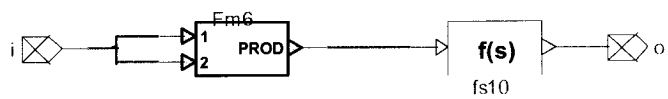

Figure A.5 : Modèle du bloc « Œil-Cerveau »

À la fin de ces étapes, on obtient ce qu'on appelle la sensation instantanée du flicker I_{FL}.

A.1.3. Évaluation de la sévérité du flicker

Avec le résultat du dernier bloc (cf. §A.1.2), on effectue une analyse statistique de la sensation instantanée du flicker. On obtient alors ce qu'on appelle la sévérité du flicker à court terme P_{st}.[7]

Cette évaluation est faite sur une période d'observation courte T_{st}=10min (st pour short term). Elle est obtenue à l'aide de la méthode statistique d'analyse de la durée pendant laquelle un niveau donné est atteint. On utilise la formule suivante :

---

[7] Il existe une évaluation à long terme P_{lt}, qui est obtenue à l'aide de l'équation suivante : $P_{lt} = \sqrt[3]{\sum_{i=1}^{N} P_{sti}^3 \Big/ N}$, où P_{sti} sont les valeurs consécutives de P_{st} pendant des temps courts. Cependant dans notre évaluation, elle n'est pas utilisée.

$$P_{st} = \sqrt{0{,}0314P_{0,1} + 0{,}0525P_{1l} + 0{,}0657P_{3l} + 0{,}28P_{10l} + 0{,}08P_{50l}} \qquad (A.2)$$

Où les quantités $P_{0.1}$, P_1, P_3, P_{10} et P_{50} sont les niveaux de flicker dépassés pendant 0.1, 1, 3, 10 et 50% du temps de la période d'observation. Dans l'équation (A.2), les quantités sont des valeurs lissées obtenues à partir des équations suivantes :

$$\begin{aligned} P_{50l} &= \frac{P_{30} + P_{50} + P_{80}}{3} \\ P_{10l} &= \frac{P_6 + P_8 + P_{10} + P_{13} + P_{17}}{5} \\ P_{3l} &= \frac{P_{2,2} + P_3 + P_4}{3} \\ P_{1l} &= \frac{P_{0,7} + P_1 + P_{1,5}}{3} \end{aligned} \qquad (A.3)$$

Avec la constante de temps de 300ms du flickermètre, $P_{0,1}$ ne peut changer de façon brutale, donc aucun lissage n'est nécessaire pour ce quantile.

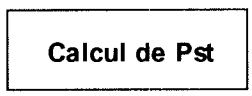

Figure A.6 : Module « Calcul de P_{st} » utilisé sous EMTP-RV pour le calcul du P_{st}

L'analyse statistique se fait sous EMTP-RV à l'aide d'un module « Calcul de Pst » (Fig.A.6). La procédure se fait comme suit :

- Effectuer la simulation temporelle du modèle
- Ouvrir ScopeView
- Afficher le signal : IFL@control
- Exporter le signal IFL sous le nom de fichier IFL.mat dans un dossier de votre choix.
- Double-cliquer sur le module « Calcul de Pst », et choisir le dossier où se trouve le fichier .mat que vous avez précédemment enregistré.

La valeur de la sévérité du flicker P_{st} sera alors calculée et affichée sur la console de EMTP-RV.

A.1.4. Fonctionnement du module « Calcul de P_{st} »

Ce module permet de calculer la sévérité du P_{st} (à l'aide des équations présentées au paragraphe A.1.3) sans que l'utilisateur n'ait à utiliser un outil de calcul tel que Matlab.

Tout d'abord, il a fallu créer un fichier .m sous matlab qui puisse effectuer le calcul de la sévérité (Fig.A.7).

```
function pst

load('\IFL.mat')

global y;
global PST1;

y=IFL(:,2);

P01c=prctile(y,99.9);

P0_7=prctile(y,99.3);
P1=prctile(y,99);
P1_5=prctile(y,98.5);

P2_2=prctile(y,97.8);
P3=prctile(y,97);
P4=prctile(y,96);

P6=prctile(y,94);
P8=prctile(y,92);
P10=prctile(y,90);
P13=prctile(y,87);
P17=prctile(y,83);

P30=prctile(y,70);
P50=prctile(y,50);
```

```
P80=prctile(y,20);

P1c=(P0_7+P1+P1_5)/3;
P3c=(P2_2+P3+P4)/3;
P10c=(P6+P8+P10+P13+P17)/5;
P50c=(P30+P50+P80)/3;

PST1=sqrt(0.0314*P01c+0.0525*P1c+0.0657*P3c+0.28*P10c+0.08*P50c)
```

Figure A.7 : Fichier Pst.m permettant le calcul de la sévérité

L'outil MBuilder de Matlab est ensuite appelé grâce à la fonction « dotnettool ». Cet outil permet alors de créer ce qu'on appelle un COM Object (Component Object Model), ce qui permet à des applications de communiquer par l'intermédiaire d'objets possédant un certain nombre de méthodes et de propriétés publiques.

Par la suite, le module « Calcul de Pst » a pu être créé. Il joue le rôle d'un bouton dont le script (langage javascript : Script_PST.dwj sous EMTP) est le suivant (Fig.A.7):

```
f=SPFile;
f.openDialog();

var objet;
objet = new ActiveXObject("pst.pstclass.1_0");
objet.pst();
var myvalue;
myvalue=objet.PST1;
writeln("Pst=" + myvalue)
```

Figure A.8 : Fichier Script_PST.dwj

En double-cliquant sur ce bouton, une fenêtre de dialogue apparaît (fonction openDiaglog()). On choisit alors le fichier .mat (cf. §A.1.3). Le script ci-dessus crée ensuite un objet ActiveX (les objets ActiveX sont un type particulier d'objets COM).

Ceci permet d'effectuer le calcul de la sévérité comme le ferait Matlab. Le résultat de ce calcul s'affiche ensuite sur la console de EMTP.

A.2. Tests pour validation

Pour les validations, nous allons nous conformer aux spécifications de la norme CEI 868. Ces spécifications concernent deux tests, on souhaite obtenir la réponse du flickermètre pour:

- des fluctuations sinusoïdales de la tension.
- des fluctuations rectangulaires de la tension.

Afin de valider le modèle du flickermètre, on utilise les Tableaux A.1 et A.2. En effet, ces tableaux nous donnent une réponse de sévérité du flicker P_{st}=1,00±5% pour des amplitudes relatives et des fréquences données.

Hz	Fluctuation de tension %		Hz	Fluctuation de tension %	
	Lampe 120V réseau 60Hz	Lampe 230V réseau 50Hz		Lampe 120V réseau 60Hz	Lampe 230V réseau 50Hz
0,5	2,457	2,340	10,0	0,339	0,260
1,0	1,463	1,432	10,5	0,355	0,270
1,5	1,124	1,080	11,0	0,374	0,282
2,0	0,940	0,882	11,5	0,394	0,296
2,5	0,814	0,754	12,0	0,420	0,312
3,0	0,716	0,654	13,0	0,470	0,348
3,5	0,636	0,568	14,0	0,530	0,388
4,0	0,569	0,500	15,0	0,593	0,432
4,5	0,514	0,446	16,0	0,662	0,480
5,0	0,465	0,398	17,0	0,737	0,530
5,5	0,426	0,360	18,0	0,815	0,584
6,0	0,393	0,328	19,0	0,897	0,640
6,5	0,366	0,300	20,0	0,981	0,700
7,0	0,346	0,280	21,0	1,071	0,760
7,5	0,332	0,266	22,0	1,164	0,824
8,0	0,323	0,256	23,0	1,262	0,890
8,8	0,321	0,250	24,0	1,365	0,962
9,5	0,330	0,254	25,0	1,472	1,042
			33,33	Essai non prescrit	2,130
			40,0	4,424	Essai non prescrit

Tableau A.1 : Réponse normalisée d'un flickermètre pour des fluctuations sinusoïdales de la tension [2]

Hz	Fluctuation de tension %	Hz	Fluctuation de tension %
≤ 0,5	0,514	9,5	0,200
1,0	0,471	10,0	0,205
1,5	0,432	10,5	0,213
2,0	0,401	11,0	0,223
2,5	0,374	11,5	0,234
3,0	0,355	12,0	0,246
3,5	0,345	13,0	0,275
4,0	0,333	14,0	0,308
4,5	0,316	15,0	0,344
5,0	0,293	16,0	0,380
5,5	0,269	17,0	0,421
6,0	0,249	18,0	0,461
6,5	0,231	19,0	0,506
7,0	0,217	20,0	0,552
7,5	0,207	21,0	0,603
8,0	0,201	22,0	0,657
8,8	0,199	23,0	0,713
		24,0	0,767

Tableau A.2 : Réponse normalisée d'un flickermètre pour des fluctuations rectangulaires de la tension [2]

A.2.1. Fluctuation sinusoïdale de la tension :

Cas Fichier Flickermeter\flickermeter_test_norme_SIN.ecf

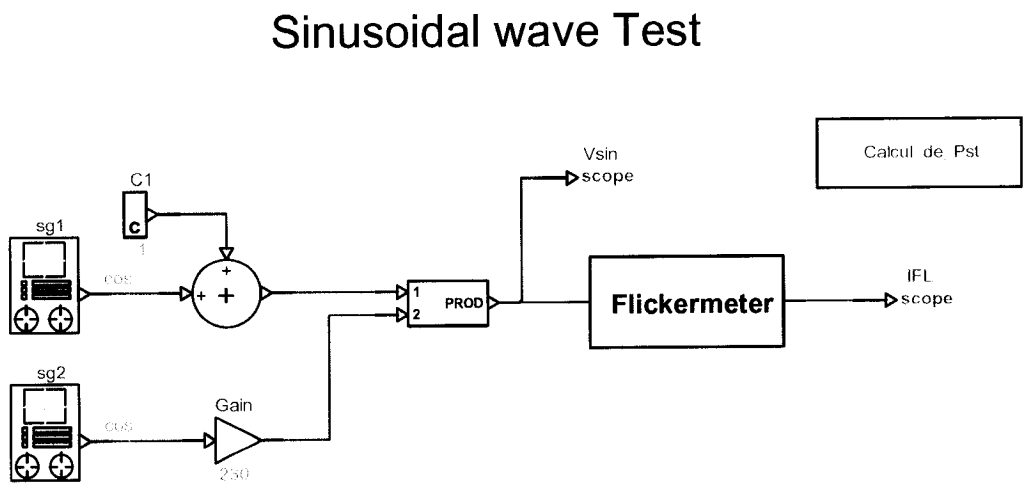

Figure A.9 : Fichier Test du flickermeter aux fluctuations sinusoïdales.

Le signal d'entrée a une modulation sinusoïdale centrée sur 8,8Hz. Il se présente comme ceci :

$$V_{\sin} = 230\sqrt{2}\cos(2\pi 50t)[1 + 0{,}00125\cos(2\pi 8{,}8t)] \qquad \text{(A.4)}$$

On a une fluctuation de la tension d'entrée de $\frac{\Delta V}{V} = 0{,}25\%$ à une fréquence de 8,8Hz.

Voici les résultats obtenus pour une simulation de 10 minutes avec un pas de calcul Δt=100 µs.

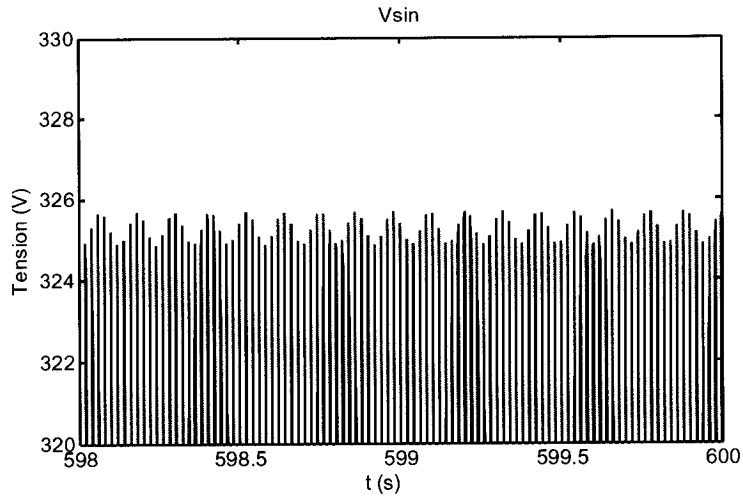

Figure A.10 : V_{sin} pour le test aux fluctuations sinusoïdales de la tension.

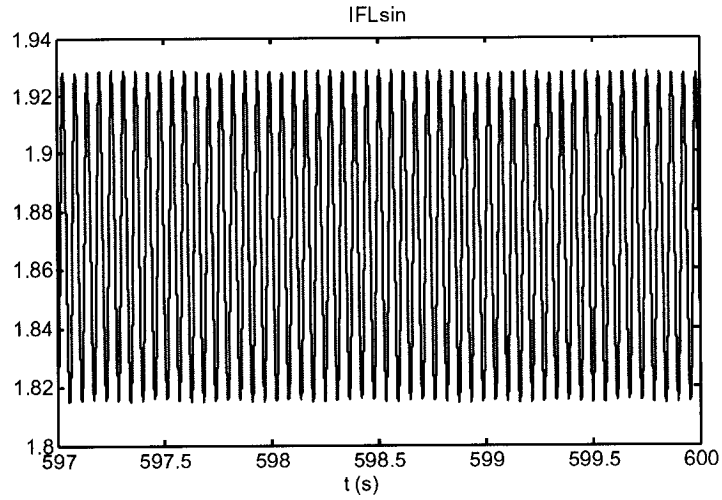

Figure A.11 : Sensation instantanée du flicker I_{FL} pour V_{sin}

À partir des données obtenues lors de la simulation de 10 minutes de I_{FL} correspondant aux fluctuations sinusoïdales, on calcule la sévérité P_{st}=1,0319. D'après les données du Tableau A.1, la sévérité obtenue est bien de l'ordre de 1,00±5%. La fluctuation de tension est de 0,25% et varie à une fréquence de 8,8 Hz.

A.2.2. Fluctuation rectangulaire de la tension :

Cas Fichier Flickermeter\flickermeter_test_norme_SQUARE.ecf

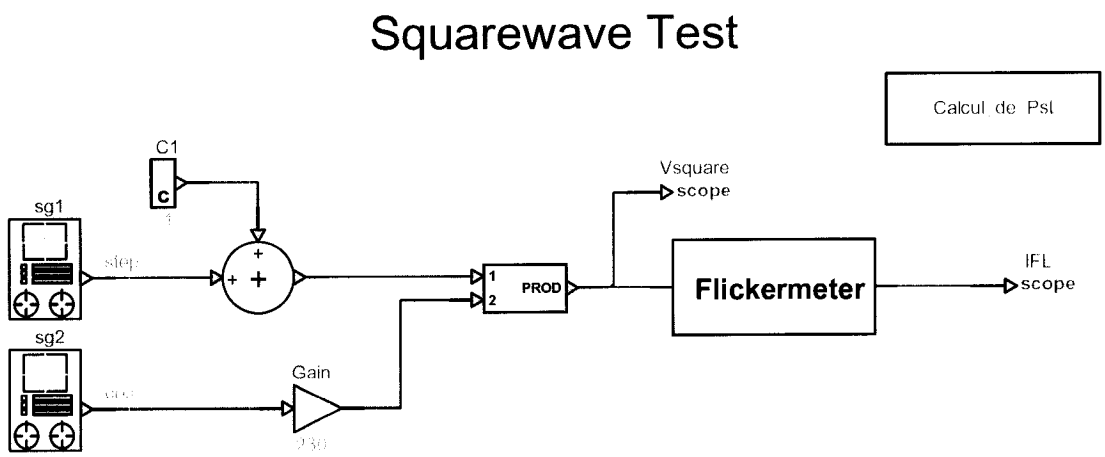

Figure A.12 : Test du flickermètre aux fluctuations rectangulaires.

Le signal d'entrée a une modulation rectangulaire périodique de période 1 Hz. Il se présente comme ceci :

$$V_{square} = 230\sqrt{2}\cos(2\pi 50t)\left[1 + 0.00471 \cdot step(0,5s, T = 1s)\right] \qquad (A.5)$$

Où $step(0,5s, T = 1s)$ est un échelon de durée 0,5 seconde et périodique de période de 1 seconde.

On a une fluctuation de la tension d'entrée de $\frac{\Delta V}{V} = 0{,}471\%$ périodique de période 1Hz.

Voici les résultats obtenus pour une simulation de 10 minutes avec un pas de calcul Δt=500 µs.

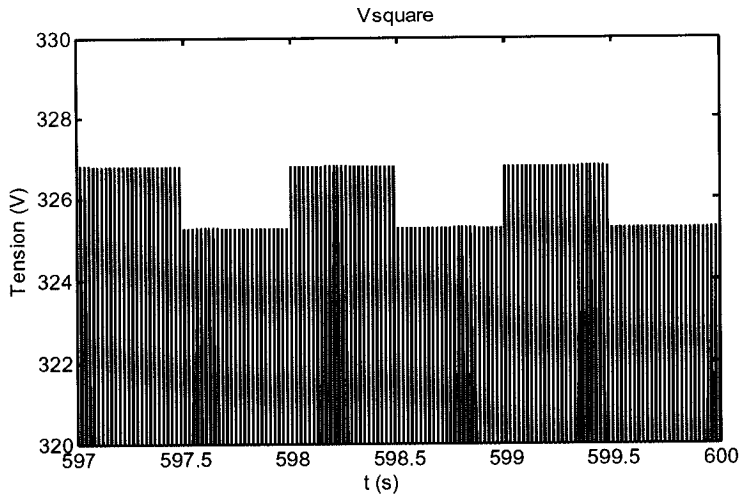

Figure A.13 : V_{square} pour le test aux fluctuations sinusoïdales de la tension.

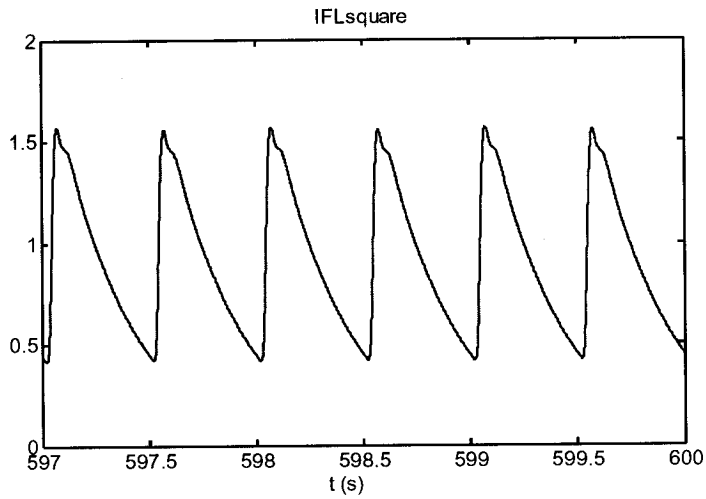

Figure A.14 : Sensation instantanée du flicker I_{FL} pour V_{square}

À partir des données obtenues lors de la simulation de 10 minutes de I_{FL} correspondant aux fluctuations rectangulaires, on calcule la sévérité P_{st}=1,0192. D'après les données du tableau A.2, la sévérité obtenue est bien de l'ordre de 1,00±5%. La fluctuation de tension est de 0,471% et varie à la fréquence de 1 Hz.

CONCLUSION

La modélisation du flickermètre est entièrement basée sur la norme CEI. Les tests de validation sont conformes aux tests présentés dans la norme CEI. Le modèle du flickermètre présenté ci-dessus est validé par les tests, il est alors conforme au modèle souhaité.

Le flickermètre peut être utilisé pour des évaluations de four à arc (comme pour le four ca). Comme EMTP est un logiciel spécialisé dans les régimes transitoires, il n'est pas possible d'évaluer la sévérité à long terme P_{lt}, qui nécessite une durée de simulation de l'ordre de 45 minutes (temps correspondant à la durée normale de fonctionnement d'un four à arc), ou même de plusieurs heures ou plusieurs jours dépendamment de l'évaluation souhaitée.

ANNEXE B :
Documentation du four à arc à courant continu.

Le modèle du four à arc à courant continu est présenté à la Figure B.1.

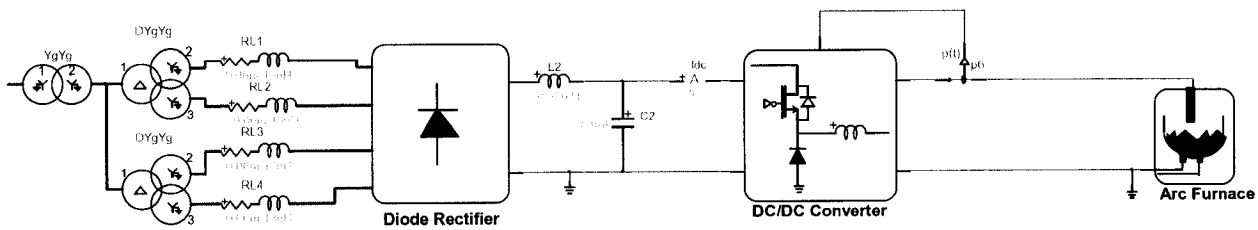

Figure B.1 : Modèle général du four à arc à courant continu

Le four à arc cc triphasé est composé :

- de transformateurs
- d'un convertisseur ca/cc
- d'un convertisseur cc/cc
- d'un modèle d'arc du four cc

A. Les transformateurs

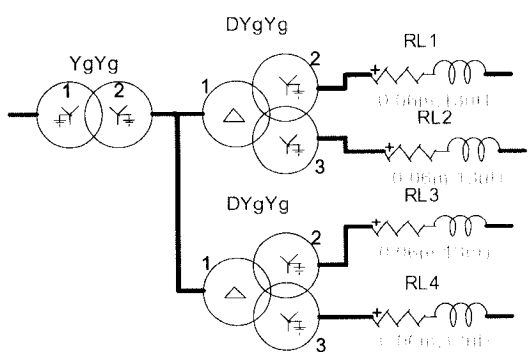

Figure B.2 : Modèle des transformateurs

On effectue deux transformations :

- la 1ère transformation est du type YgYg 220 kV/33 kV.
- La 2nde transformation est constituée de deux transformateurs à deux enroulements DYgYg 33 kV/1,4 kV.

Une résistance et une inductance équivalentes ont été ajoutées à l'externe pour tenir compte des imperfections des transformateurs. Les données de ces impédances sont :

$R = 60\ \mu\Omega$

$L = 13\ \mu H$

B. Convertisseur ca/cc

Le convertisseur ca/cc (« Diode Rectifier » sur la Fig.B.1) permet de convertir la tension ca en tension cc. Il est constitué de 4 ponts à diodes non idéales (Fig.B.3).

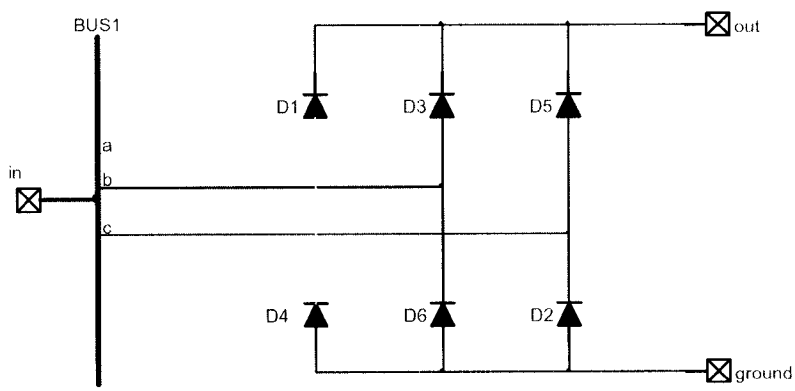

Figure B.3 : Pont à diodes

Le modèle de la diode non idéale est montré à la Figure B.4. Il comprend une diode D1 de type idéal, une tension continue Vf de 0,7 V, une résistance de polarisation inverse Rd et une inductance Lt en série avec D1.

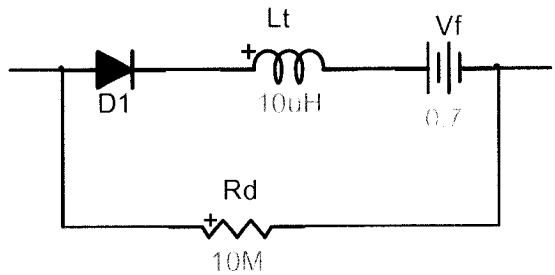

Figure B.4 : Modèle de la diode non idéale

La tension à la sortie du redresseur est lissée afin d'obtenir une tension continue pour le four à arc cc. Un filtre LC a été ajouté pour lisser cette tension (Fig.B.5). Les données du filtre sont :

$L = 0.25$ mH

$C = 84$ mF

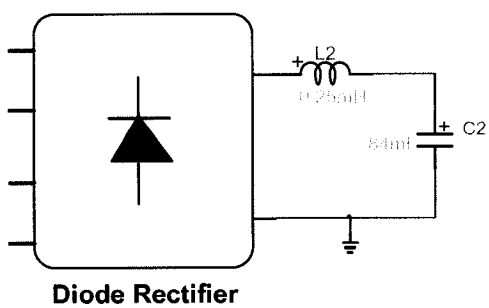

Figure B.5 : Convertisseur ca/cc et filtre LC de lissage

C. Convertisseur cc/cc

Le convertisseur cc/cc (Fig.B.6) est un hacheur permettant de réduire la tension continue pour alimenter le four à arc cc.

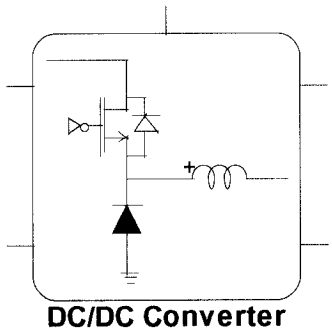

Figure B.6 : Modèle du convertisseur cc/cc

Il est constitué de 64 blocs contenant chacun 3 hacheurs simples mis en parallèle (Fig.B.7).

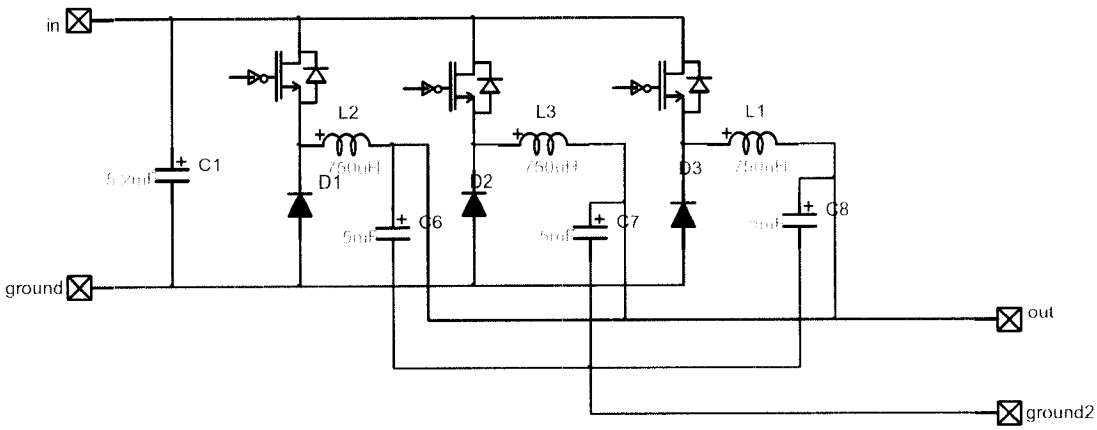

Figure B.7 : Mise en parallèle de 3 hacheurs

Un hacheur simple est constitué d'un IGBT, d'une diode non idéale et d'une inductance de lissage. Un condensateur a été ajouté à chaque branche afin de constituer un filtre passe-bas avec l'inductance de lissage pour améliorer les résultats.

Le hacheur est contrôlé par l'intermédiaire de l'IGBT.

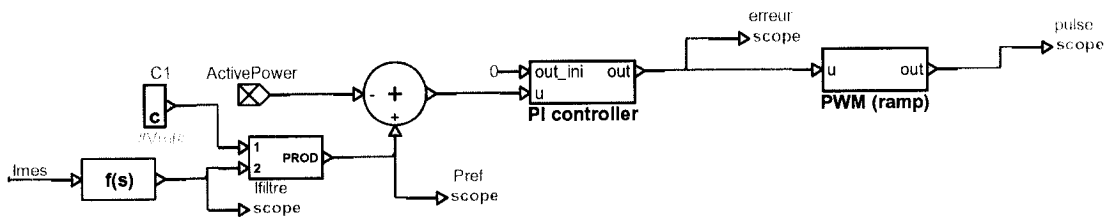

Figure B.8 : Modèle de contrôle du hacheur

La puissance de référence P_{ref} est obtenue à partir de la mesure du courant sur la fiche « out » (Fig.B.7) :

$$P_{ref} = I_{mes_filtré} * V_{ref} \tag{B.1}$$

Où V_{ref} = tension de référence (=800 V)

Et I_{mes} est le courant obtenue à la sortie du hacheur. Ce courant est ensuite filtré par un filtre passe bas de fréquence de coupure de 50 Hz (f_{cut}=50 Hz), il devient alors $I_{mes_filtré}$. La fréquence de coupure f_{cut} a été déterminée après quelques simulations afin d'atténuer les variations du courant.

Pour la simulation à puissance réduite (40 MW), la valeur de P_{ref} est de 40 MW.

P_{ref} est alors comparée à la puissance réelle délivrée par le four. L'erreur obtenue entre la puissance réelle et celle de référence est injectée dans un contrôleur proportionnel intégral. L'équation régissant ce contrôleur est :

$$S = K_p E + K_i \int E dt \tag{B.2}$$

Où K_p = gain proportionnel = 0,1

K_i = gain intégrateur = 4

Le signal obtenu à la sortie du contrôleur PI est comparé à un signal en rampe. Cette comparaison est alors envoyée aux grilles des IGBT à une fréquence de commutation de 1 kHz (f_{com}=1 kHz).

D. Modèle de l'arc électrique

L'arc électrique est un circuit RL série. La résistance d'arc pour le four cc est représentée sur la Figure B.9. Elle est modélisée comme une forme gaussienne donnée par l'équation:

$$R_{arc} = R_{arc(nom)} + \Delta R_{arc}(Rand - 0{,}5) \qquad \text{(B.3)}$$

Où $R_{arc(nom)}$ = *valeur moyenne de* R_{arc}

$\Delta R_{arc} = 0{,}5 \cdot R_{arc(nom)}$

Rand = distribution uniforme entre 0 *et* 1

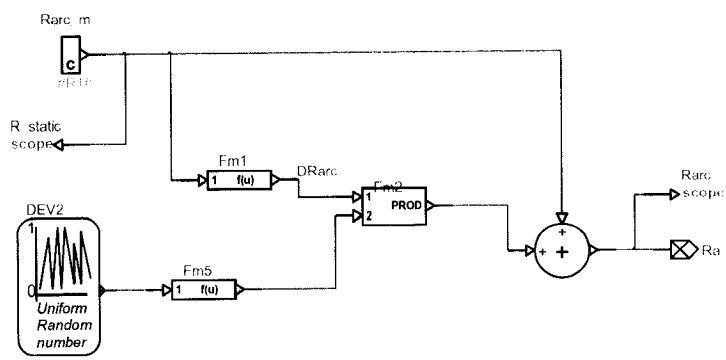

Figure B.9 : Modélisation de la résistance d'arc R_{arc}

L'inductance de l'arc électrique est, quant à elle, considérée comme étant proportionnelle à la résistance d'arc :

$$X_{arc} = 2.\pi.f.L_{arc} \qquad \text{(B.4)}$$

Où $L_{arc} = 2K_x.R_{arc}$

Sous EMTP, le circuit RL est en fait une résistance commandée en parallèle avec une source de courant. On injecte alors la valeur de cette résistance et celle du courant (Fig.B.10).

On effectue une discrétisation avec un pas de calcul Δt.

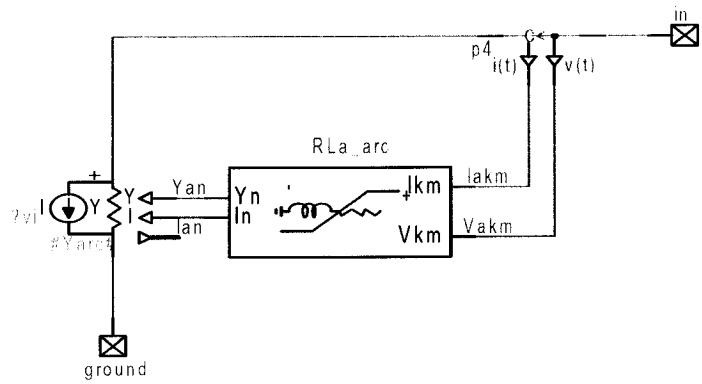

Figure B.10: Modèle de l'arc électrique du four cc

Deux modèles de l'inductance électrique existent dans le modèle du four cc.

D.1. Premier modèle de L_{arc}

Le premier modèle de l'arc électrique est une représentation mathématique.

D'après la Figure 10, le modèle de l'arc électrique est présenté à l'aide d'un composant de la librairie EMTP-RV (Fig.B.11). L'arc électrique est représenté par le modèle de Norton. Ce composant est une admittance Y en parallèle avec une source de courant I (respectivement Y_n et I_n sur la Figure B.12).

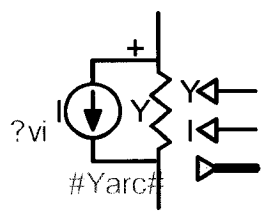

Figure B.11 : Composant utilisé pour représenter l'arc électrique

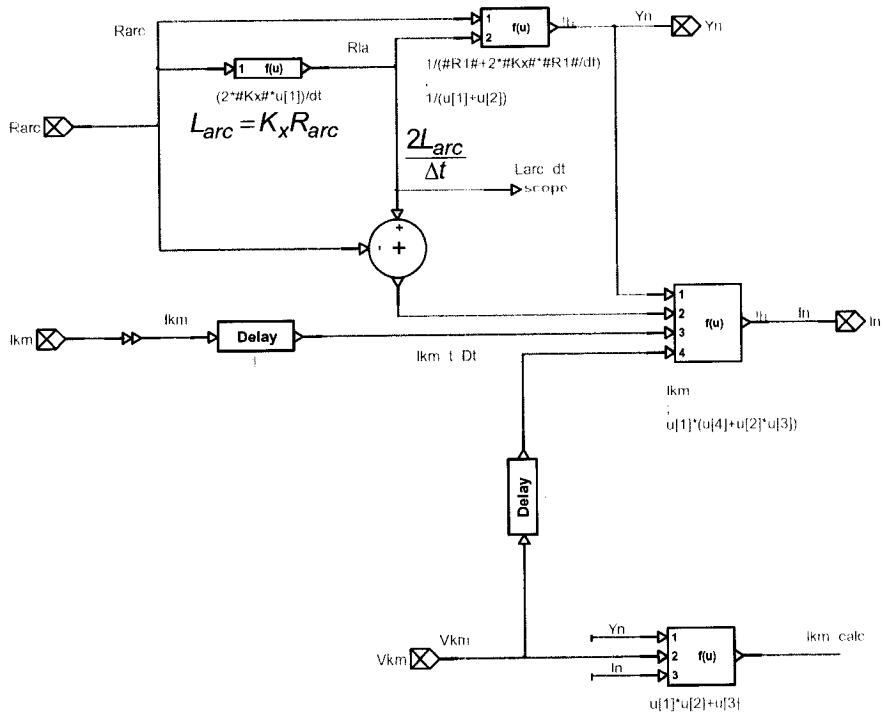

Figure B.12 : Modélisation de l'arc électrique dans EMTP-RV

La Figure B.12, ci-dessus, présente en détail les définitions de l'admittance Y_n et le courant I_n. L'arc électrique est modélisé par un circuit RL en série. L'admittance Y_n contient ces deux éléments, l'équation le représentant est :

$$Yn = \frac{1}{R_{arc} + \frac{2.L_{arc}}{\Delta t}} \tag{B.5}$$

Dans l'équation (B.5), $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t}$ est en ohms. Dans ce modèle, l'inductance est discrétisé par un pas de calcul Δt. L'inductance L_{arc} est proportionnelle à la résistance d'arc R_{arc}. Elle est définie par :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{B.6}$$

Où $K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f}$

$FP = facteur\ \ de\ \ puissance$

$f = 50\ \text{Hz} = 50\ \text{s}^{-1}$

Ainsi $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t} = \frac{\tan(\arccos(FP))}{\pi \cdot f \cdot \Delta t} R_{arc}$ et $\frac{2.L_{arc}}{\Delta t}$ est bien en ohms.

Pour déterminer le courant injecté, il faut tenir compte de la méthode d'intégration utilisée. Ce modèle est discrétisé en suivant la méthode trapézoïdale.

Le courant I_n représente l'historique de ce courant, il contient toutes les informations à l'instant précédent t, soit t-Δt (où Δt est le pas de calcul).

Le courant à l'instant t de notre composant (Fig.B.11) est :

$$I_{km_t} = Y_n V_{km_t} + I_n \qquad \text{(B.7)}$$

Où I_n = l'historique du courant (celui qui est injecté dans le composant de la Figure B.11)

L'historique du courant est défini par :

$$I_n = Y_n (V_{km_{t-\Delta t}} + \frac{2L_{arc}}{\Delta t} I_{km_{t-\Delta t}}) \qquad \text{(B.8)}$$

Ainsi le courant à l'instant t de ce composant (Fig.B.12) est :

$$I_{km_t} = Y_n V_{km_t} + Y_n (V_{km_{t-\Delta t}} + \frac{2L_{arc}}{\Delta t} I_{km_{t-\Delta t}}) \qquad \text{(B.9)}$$

D.2. Deuxième modèle de L_{arc}

Ce modèle utilise les propriétés des transformateurs (Fig.B.13 et B.14). Le composant représentant l'arc électrique est celui de la Figure B.11, comme pour le premier modèle d'arc. Cependant, la source de courant est désactivée (I_n=0), et l'admittance est maintenant définie par (Fig.B.13):

$$Yn = \frac{1}{R_{arc}} \qquad \text{(B.10)}$$

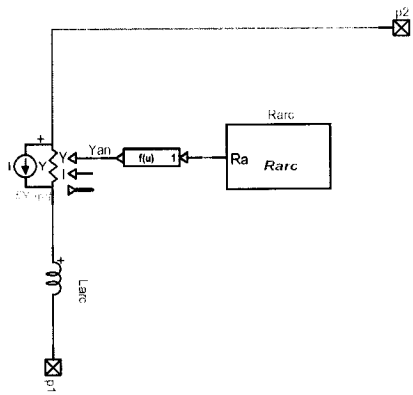

Figure B.13 : Deuxième modèle de l'arc électrique

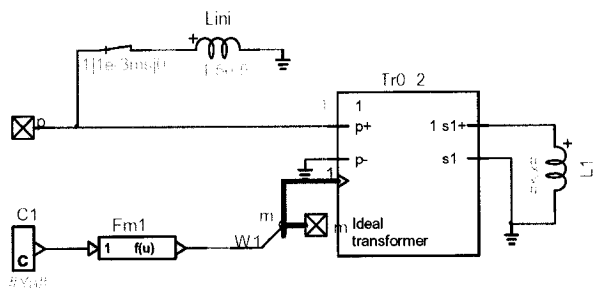

Figure B.14 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc}

Le modèle présenté à la Figure B.14 a été réalisé en s'inspirant du premier modèle de l'inductance d'arc (cf §D.1). Dans le premier modèle, L_{arc} est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{B.11}$$

$$\text{Où } K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

FP=facteur de puissance

$f = 50$ Hz

On considère le coefficient K_x comme étant constant car le facteur de puissance du four est quasi constant et la fréquence est également constante. La seule variable dans notre équation est la résistance d'arc R_{arc} dont la valeur moyenne et les variations dépendent du modèle choisi. On décide alors de considérer, sur la Figure B.14, l'inductance au secondaire comme étant K_x.

Le transformateur de la Figure B.14 est un transformateur unitaire dont le ratio est contrôlé. Ce ratio est représenté par la lettre m. Il est défini comme ceci :

$$m = \frac{1}{\sqrt{2 * 1/Y_{arc}}} \tag{B.12}$$

Ainsi, l'inductance au secondaire[8] vaut alors :

$$L_{PRI} = \frac{L_{SEC}}{m^2} = \frac{2}{Y_{arc}} K_x = 2K_x R_{arc} \tag{B.13}$$

L'inductance d'arc est alors définie comme pour le modèle mathématique. Cependant, dans ce cas-ci, L_{arc} est obtenue en utilisant les propriétés des transformateurs.

Une autre inductance, nécessaire pour l'initialisation du modèle de four L_{ini}, a été ajoutée en parallèle avec L_{arc} pendant une microseconde (Fig.B.14).

---

[8] Le composant « Ideal Transformer » sous EMTP fonctionne comme suit : le ratio $\frac{E_{PRI}}{E_{SEC}} = \frac{1}{m}$, voilà pourquoi nous avons cette équation.

ANNEXE C :
Documentation du four à arc à courant alternatif.

Le modèle du four à arc à courant alternatif est présenté à la Figure C.1.

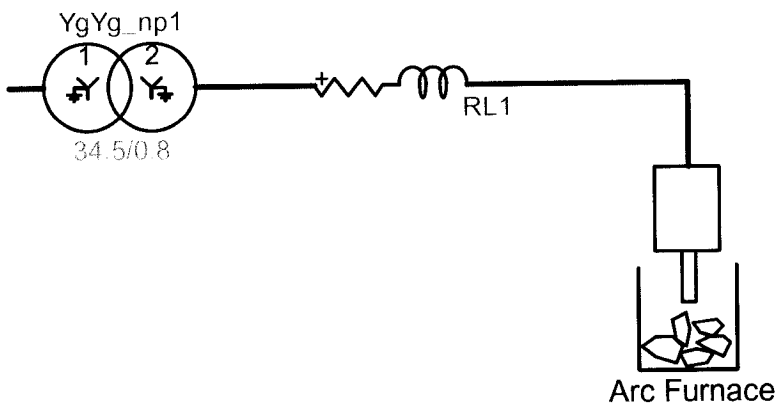

Figure C.1 : Modèle du four à arc à courant alternatif

Le four à arc ca triphasé est composé :

- d'un transformateur abaisseur
- d'un modèle d'arc du four ca

A. Le transformateur

Le transformateur est du type YgYg 34,5 kV/0,8 kV. Une résistance et une inductance équivalentes ont été ajoutées à l'externe pour tenir compte des imperfections du transformateur. Les données de ces impédances sont :

$R = 25\ \mu\Omega$

$L = 250\ \mu\Omega$

B. Le modèle de l'arc électrique

Pour chaque phase, le modèle de l'arc électrique est le même, le modèle de la phase *a* est présenté à la Figure C.2.

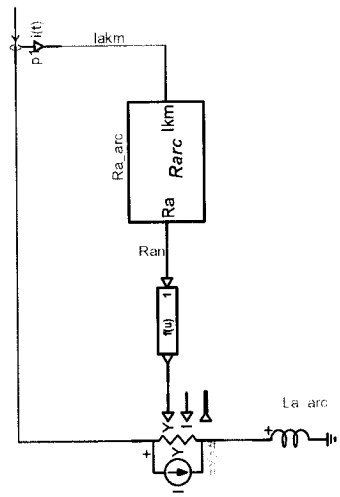

Figure C.2 : Modèle de l'arc électrique pour la phase *a*

L'arc électrique est modélisé comme un circuit RL série.

B.1. Modèle de la résistance d'arc R_{arc}

Il existe 4 modèles de résistance d'arc R_{arc} : le modèle statique, sinusoïdal, gaussien et chaotique (Fig.3). Ces modèles sont détaillés dans les paragraphes suivants.

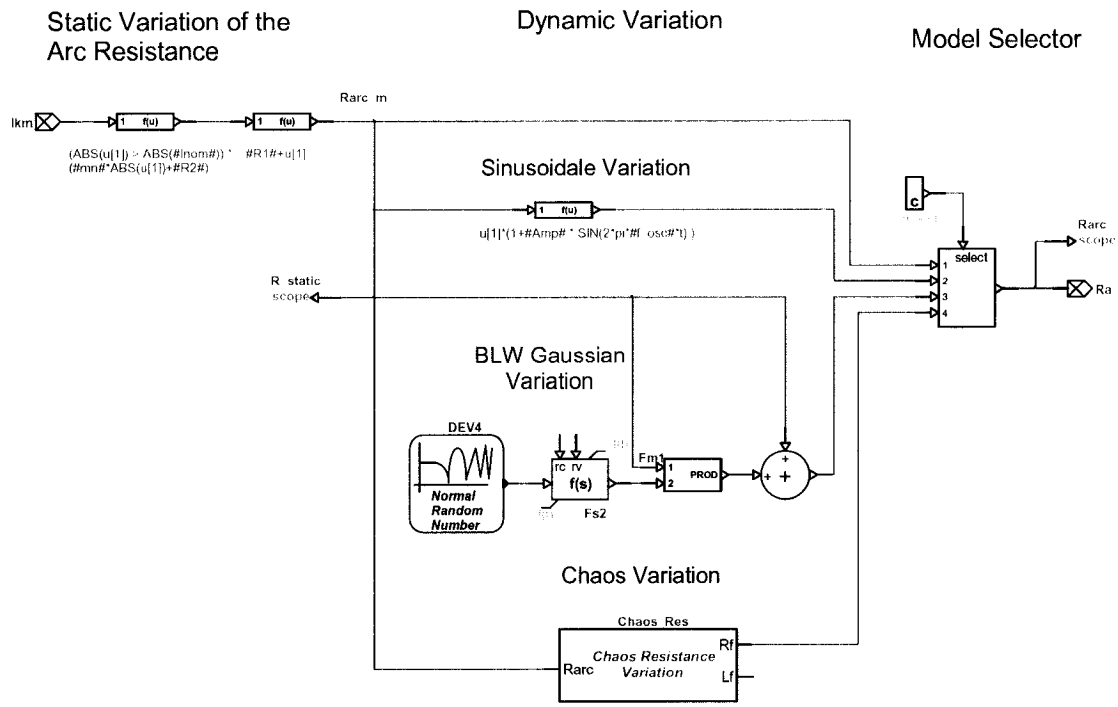

Figure C.3 : Les 4 modèles de R_{arc}

B.1.1 Modèle statique de R_{arc}

Ce modèle est basé sur une approximation linéaire de la caractéristique tension-courant de l'arc électrique (Fig.C.4).

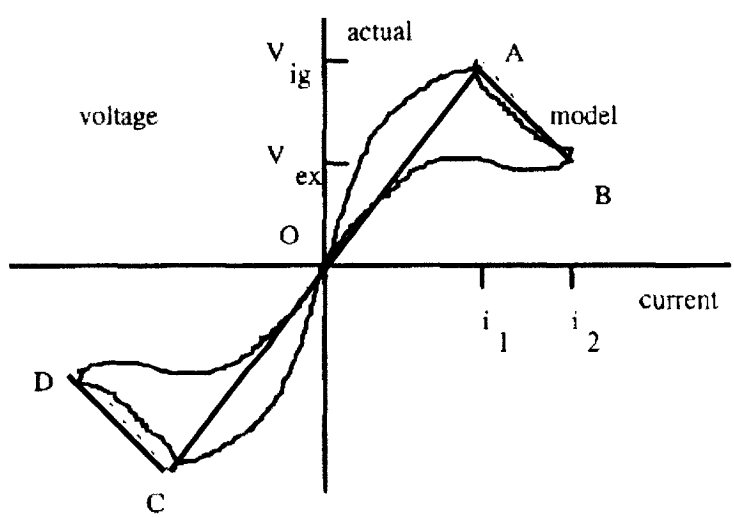

Figure C.4 : Caractéristique V-I du four à arc

L'approximation linéaire utilisée dans notre modèle de four est représentée sur la Figure C.5. Sur un plan mathématique, la résistance d'arc pour se traduit comme ceci :

$$\begin{cases} R_{static} = R_{arc_mean}\left(1 - a\dfrac{|I_{km}| - I_{nom}}{I_{nom}}\right) & pour\ |I_{akm}| > I_{nom} \\ R_{static} = R_{arc_mean} & pour\ |I_{akm}| < I_{nom} \end{cases} \tag{C.24}$$

Où a = pente de la droite AB

R_{arc_mean} = *pente de la droite OB*

et I_{nom} = *courant nominal* = 65 kA

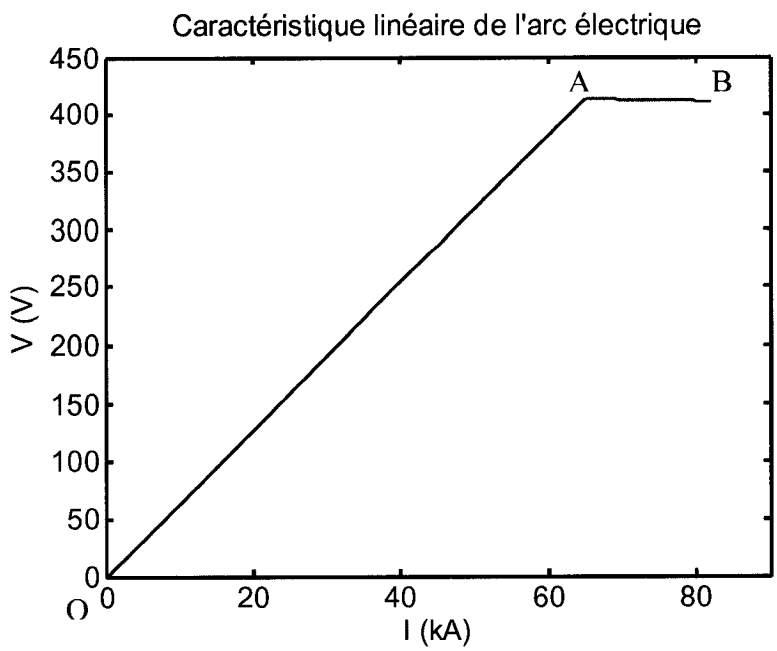

Figure C.5 : Approximation linéaire de la caractéristique V-I de l'arc électrique

B.1.2 Modèle sinusoïdal de R_{arc}

Dans ce modèle, on considère une variation sinusoïdale de R_{arc} dont le modèle mathématique est :

$$R_{sinus} = R_{static}\left(1 + \sin(\omega_f t)\right) \tag{C.25}$$

$où\ \ \omega_f = pulsation\ \ d'oscillation = 2\pi f_{osc}$

$f_{osc} \in [5,14]$ Hz

et R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe B.1.1.

B.1.3 Modèle gaussien de R_{arc}

La représentation mathématique de ce modèle est une variation dynamique en fonction d'un bruit blanc à bande limitée :

$$R_{gaus} = R_{static} \cdot (1 + BLW) \tag{C.26}$$

et R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe B.1.1.

BLW=Bruit Blanc à Bande Limitée, il représente le signal R filtré (Équ.C.27).

Le filtre employé est un filtre passe bas de fréquence de coupure de 16 Hz (f_{cut}=16 Hz). Ce type de filtre nous permet de laisser passer les fréquences comprises entre [4 14 Hz] :

$$\begin{aligned} BLW &= (R)_{filtré} \\ R &= \sigma\left(\sqrt{-2\ln(rand1)}\right)\cos(2\pi \cdot rand2) \end{aligned} \tag{C.27}$$

$Où\ rand1\ et\ rand2 = distribution\ uniforme\ entre\ 0\ et\ 1$

$et\ \sigma = variance$

B.1.4 Modèle chaotique de R_{arc}

Ce modèle est basé sur la théorie du chaos. Les équations non linéaires de Lorenz nous permettent de représenter ce phénomène. On utilise donc le modèle de Lorenz pour la résistance d'arc. La représentation mathématique de ce modèle est :

$$R_{chaos} = R_{static} + C_1 x \tag{C.28}$$

$$où\ \frac{dx}{dt} = 30\sigma(y - x)$$

$$\frac{dy}{dt} = 30(rx - y - xz)$$

$$\frac{dz}{dt} = 30(xy - bz)$$

$$avec\ \sigma = 10$$

$$r = \frac{8}{3}$$

$$b = 28$$

$$C_1 = coefficient\ du\ modèle\ chaotique$$

et R_{static} est la résistance statique présentée dans le paragraphe B.1.1.

C. Le modèle de l'inductance d'arc L_{arc}

L'inductance d'arc est représentée par le composant L_{a_arc} sur la Figure C.2.

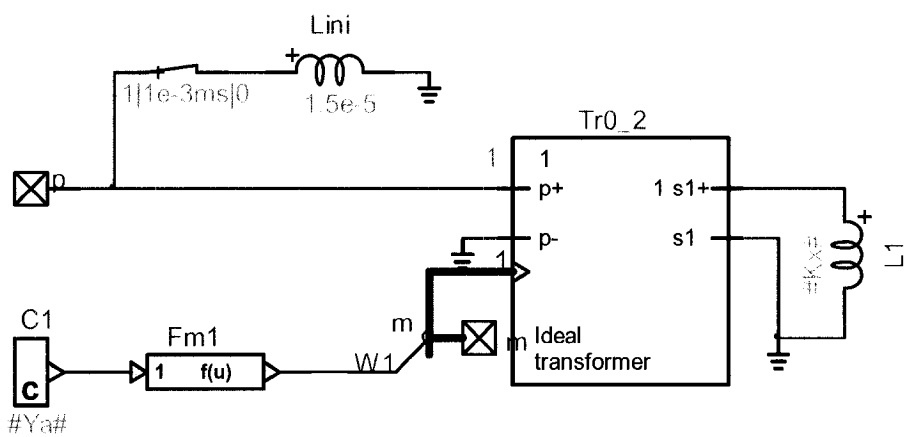

Figure C.6 : Modèle de l'inductance de l'arc électrique L_{arc}

Le modèle de l'inductance d'arc présenté à la Figure C.6 a été réalisé en utilisant les propriétés des transformateurs. L_{arc} est obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$L_{arc} = 2K_x.R_{arc} \tag{C.29}$$

$$\text{Où } K_x = \frac{\tan(\arccos(FP))}{2} \cdot \frac{1}{2\pi f}$$

FP=facteur de puissance=0,85

$f = 60$ Hz

On considère le coefficient K_x comme étant constant car le facteur de puissance du four est quasi constant et la fréquence est également constante. La seule variable dans notre équation est la résistance d'arc R_{arc} dont la valeur moyenne et les variations dépendent du modèle choisi. On décide alors de considérer, sur la Figure C.6, l'inductance au secondaire comme étant K_x. Le transformateur de la Figure C.6 est un transformateur unitaire dont le ratio est contrôlé. Ce ratio est représenté par la lettre m. Il est défini par :

$$m = \frac{1}{\sqrt{2 * 1/Y_{arc}}} \tag{C.30}$$

Ainsi, l'inductance au secondaire[9] vaut alors :

$$L_{PRI} = \frac{L_{SEC}}{m^2} = \frac{2}{Y_{arc}} K_x = 2K_x R_{arc} \tag{C.31}$$

Une autre inductance, nécessaire pour l'initialisation du modèle de four L_{ini}, a été ajoutée en parallèle avec L_{arc} pendant une microseconde (Fig.C.6).

---

[9] Le composant « Ideal Transformer » sous EMTP fonctionne comme suit : le ratio $\frac{E_{PRI}}{E_{SEC}} = \frac{1}{m}$, voilà pourquoi nous avons cette équation.