

Étude, modélisation et conception d'un système de détection de défauts d'arcs électriques pour l'habitat

Jinmi Gregory Lezama Calvo

▶ **To cite this version:**

Jinmi Gregory Lezama Calvo. Étude, modélisation et conception d'un système de détection de défauts d'arcs électriques pour l'habitat. Autre. Université de Lorraine, 2014. Français. NNT : 2014LORR0211 . tel-01751191

HAL Id: tel-01751191
https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01751191

Submitted on 29 Mar 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITÉ DE LORRAINE

École doctorale Informatique Électronique
Électrotechnique Mathématiques

Étude, modélisation et conception d'un système de détection de défauts d'arcs électriques pour l'habitat

THÈSE

Présentée et soutenue le 10 décembre 2014
Pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine
(Spécialité systèmes électroniques)

Par Jinmi Gregory LEZAMA CALVO

Composition du jury

Président	M. Michel PAINDAVOINE, Professeur, Université de Bourgogne, Dijon
Rapporteurs :	M. Bertrand RAISON, Professeur, Université Joseph Fourier, Grenoble
	M. Philippe TESTÉ, Professeur, École supérieur d'électricité – Supélec, Paris
Examinateurs :	M. Etienne TISSERAND, MCU-HDR, Université de Lorraine, Nancy
	M. Patrick SCHWEITZER, MCU-HDR, Université de Lorraine, Directeur de thèse
	M. Serge WEBER, Professeur, Université de Lorraine, Co-directeur de thèse
Invité :	M. Patrice JOYEUX, Ph.D., Hager electro SAS.

Institut Jean Lamour – Mesure et Architecture Électronique MAE 406

Institut Jean Lamour

Remerciements

Je voudrais exprimer ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont fait l'honneur de participer à ce jury de thèse Monsieur Michel PAINDAVOINE, professeur à l'Université de Bourgogne de Dijon, Monsieur Philippe TESTÉ, professeur à l'École supérieur d'électricité – Supélec de Paris et Monsieur Bertrand RAISON, professeur à l'Université Joseph Fourier de Grenoble, pour avoir accepté d'examiner ce travail et de participer au jury.

Je remercie mes directeurs de thèse, Monsieur Patrick SCHWEITZER et Monsieur Serge WEBER, pour la confiance qu'ils m'ont témoignée tout au long de ces années de travail et pour leurs précieux conseils qu'ils ont peu m'apporter durant l'encadrement de cette thèse, ainsi que pour ses conseils au niveau scientifique et humains qui vont m'aider tout au long de ma vie.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à la société Hager electro SAS et à Monsieur Patrice JOYEUX pour la confiance et ses précieux conseils envers ma recherche.

Je tiens à remercier Monsieur Etienne TISSERAND pour sa disponibilité, sa collaboration et son soutien tout au long de ces années.

Mes remerciements les plus chaleureux à tous les membres et collègues de l'équipe IJL 406 pour leur aide et les conseils qu'ils ont pu m'apporter et également à tous les thésards pour la bonne ambiance de travail mais également pour les nombreux bons moments passés ensembles. En particulier Patrice Roth pour son sens de l'humour, les conseils et les bons moments passés au laboratoire.

Il m'est impossible d'oublier mes amis de différentes nationalités, en spécial les péruviens (à Nancy et à Cusco) et bien sûr mes amis mexicains pour tous les moments de partage, convivialité et amitié tout au long de ces années, merci à vous mes amis.

Pour finir, j'adresse toute mon affection à mes parents, Gregorio et Barbara, pour son encouragement, soutien et sans qui je ne serais pas arrivé jusque-là. Mon frère Juan Carlos et ma sœur Dayana Julieth pour son soutien affectif sans faille pendant tous ces années. Cette thèse est dédiée à vous. A mi familia por su amor y apoyo incondicional.

Jinmi Gregory Lezama Calvo

Table de Matières

Remerciements 3

Table de Matières 5

Introduction Générale 9

Chapitre 1 12

1 Problématique de la détection de défauts d'arcs électriques 14
1.1 Introduction 14
1.2 Installation électrique domestique et Norme NF C15-100 14
1.3 Système de disjonction et mode de fonctionnement 15
1.4 Arcs électriques et habitat 18
1.5 Mécanismes de production d'un arc électrique 20
1.5.1 Décharge électrique DC 20
1.5.2 Courbe de Paschen et influence de la température et de la pression 22
1.5.2.1 Courbe de Paschen. 22
1.5.2.2 Influence de la température et de la pression 23
1.5.3 Caractéristique statique d'un circuit DC 23
1.5.4 Tension d'arc en fonction de la nature des électrodes 24
1.5.5 Décharge dans l'air et l'isolant 24
1.5.5.1 Décharge dans l'air 24
1.5.5.2 Rupture d'un isolant solide 25
1.6 Arc électrique en régime alternatif 25
1.7 Modèle d'arc électrique 26
1.7.1 Modèles de conductance 27
1.7.1.1 Modèle de Mayr 27
1.7.1.2 Modèle de Cassie 27
1.7.2 Modèles à diodes 28
1.8 Arcs électriques et habitat – Aspects normatifs 29
1.8.1 Arc électrique série. 30
1.8.2 Arc électrique parallèle 31
1.8.3 Causes d'apparition des défauts d'arcs électriques 31
1.8.4 Systèmes de disjonction pour la détection des défauts d'arcs 33

1.8.5 Temps de déclenchement d'un détecteur des défauts d'arcs 33
1.8.6 Tests exigés par la norme IEC62606 35
1.9 Génération d'un défaut d'arc électrique 37
1.9.1 Arc électrique amorcé par surtension 37
1.9.2 Amorçage par ouverture de contacts 38
1.9.3 Test du chemin carboné 39
1.9.4 Système de génération d'arc parallèle 41
1.10 Conclusion 43

Chapitre 2 44

2 Modélisation d'un réseau électrique 46
2.1 Introduction 46
2.2 Classification des charges domestiques 48
2.3 Configurations étudiées et paramètres de validation 49
2.3.1 Le taux de distorsion harmonique (THD) 50
2.3.2 Indice de confiance (Index of agreement « d ») 50
2.4 Modélisation d'un arc électrique alternatif 52
2.5 Modèle de la source de tension 53
2.6 Modélisation de charges domestiques 54
2.6.1 Modélisation des charges résistive et inductive 55
2.6.2 Modélisation d'une lampe fluorescente avec ballast électromagnétique.55
2.7 Modélisation d'un moteur 58
2.7.1 Description d'un moteur universel 58
2.7.2 Modélisation d'un appareil électrique contenant un moteur universel..60
2.7.3 Bloc de contrôle de puissance. 61
2.7.4 Couple de charge. 62
2.7.4.1 Couple d'un aspirateur. 62
2.7.4.2 Couple d'une perceuse. 63
2.7.5 Modèle complet d'une charge domestique à base du moteur 63
2.8 Résultats de modélisation de charges simples 65
2.8.1 Résultats de simulation pour un aspirateur 65
2.8.2 Résultats de simulation pour une perceuse 66
2.9 Résultats de simulation pour des charges combinées 67
2.9.1 Aspirateur en parallèle avec une perceuse 68
2.9.2 Aspirateur en parallèle avec une bouilloire 69
2.9.3 Perceuse en présence d'un arc électrique série. 70
2.9.4 Charge de masquage 71
2.10 Conclusion 73

Chapitre 3 74

3 Analyse des principes de détection 76
3.1 Introduction 76
3.2 Classification des techniques et méthodes de détection 77
3.3 Banc de test de défauts d'arcs électriques 78
3.4 Analyse fréquentielle 80
3.4.1 Présentation et classification des différentes méthodes 80
3.4.2 Analyse fréquentielle du courant 81
3.4.3 Harmoniques paires et impaires. 84
3.4.4 Inter-Harmoniques 85
3.4.5 Fréquences entre 2 kHz et 5 kHz. 86
3.4.6 Bande de fréquence centrée autour de 22 MHz. 87
3.4.7 Analyse fréquentielle de la tension 89
3.4.8 Détection des arcs série par analyse fréquentielle du 5ème Harmonique. 90
3.5 Analyses temporelles et statistiques 92
3.5.1 Dérivée du courant 92
3.5.1.1 Principe de détection 93
3.5.1.2 Résultats sous Matlab 94
3.5.2 Analyse du passage à zéro du courant 96
3.5.3 Analyse de la périodicité du signal 97
3.5.4 Calcul des moments statistiques d'ordre k (valeur moyenne, variance, écart type) 99
3.5.5 Méthode basée sur la corrélation 100
3.6 Méthode combinée proposée par C. Kim 103
3.7 Conclusion 106

Chapitre 4 108

4 Méthodes de détection de défauts d'arcs 110
4.1 Introduction 110
4.2 Signaux électrique du courant d'arc 110
4.3 Méthode 1 : Calcul de l'énergie du courant 112
4.4 Méthode 2: PEDSR 113
4.5 Méthode 3 : EMDP 113
4.6 Test des méthodes de détection 113
4.6.1 Résultats pour charges simples 113
4.6.2 Résultats des méthodes pour les charges de masquage 115
4.7 Ajustage du seuil de détection 118

4.7.1 Seuil de détection fixe....118
4.7.1.1 Distribution de fréquence statistique pour la détermination du seuil de détection fixe....118
4.7.2 Détermination du seuil fixe pour la méthode 2 (PEDSR) 120
4.7.2.1 Détermination des paramètres intervenant dans la méthode....120
4.7.2.2 Détermination du seuil de détection....122
4.7.3 Détermination du seuil de détection fixe pour la méthode 3 EMDP ...124
4.7.3.1 Détermination des paramètres intervenant dans la méthode....124
4.7.3.2 Détermination du seuil de détection....125
4.8 Comparaison des performances des différentes méthodes....127
4.8.1 Méthode 1 : Énergie d'une bande de fréquence 129
4.8.2 Méthode 2 : PEDSR....130
4.8.3 Méthode 3 : EMDP....131
4.9 Méthode Combinée 132
4.9.1 Détermination du seuil de détection 135
4.10 Test de la méthode PEDSR avec le réseau électrique modélisé....138
4.11 Conclusion....140
5 Conclusion générale et perspective....142
6 Bibliographie....145

Introduction Générale

Les travaux présentés dans ce rapport de thèse ont été menés dans le cadre d'une thèse CIFRE avec l'entreprise Hager Electro SAS (Obernai). L'objectif pour l'entreprise est de disposer d'un équipement pour la détection et la protection des réseaux électriques domestiques contre les défauts d'arc électriques.

1. Contexte et objectifs

Selon les normes UL1699 [1] et IEC62606 [2]: l'arc est défini comme « une décharge lumineuse d'électricité dans un milieu isolé qui produit une volatilisation partielle des électrodes » et un défaut d'arc est défini par « l'apparition d'un arc non intentionnel dans un circuit ».

Un défaut d'arc électrique accidentel peut se produire à tout instant et peut être la cause de dommages irréversibles dans un système électrique. Les défauts d'arcs peuvent être la cause de nombreux incendies dans les résidences et leur détection de manière fiable relève d'un réel enjeu majeur [1-4].

Aux États unis en 2014, 81% des incendies ayant une origine électrique sont attribués à un défaut d'arc électrique [5, 6] produit par une dégradation de l'isolation des câbles ou des appareils.

Ces arcs électriques produits dans une installation ont de multiples causes : usure de l'isolant des câbles, contacts électriques défectueux, mauvais serrage des vis de connexion, installation électrique non conforme aux normes en vigueur, câbles marqués par des coupures, mauvaise installation, etc… Lors de la production d'un arc électrique maintenu dans le temps et pour une valeur du courant comprise entre 3 A et 10 A, l'énergie dégagée par l'arc peut atteindre environ 100 Joule. Il peut dans ce cas conduire à l'ignition d'arcs dans un câble en PVC, lequel peut atteindre une température supérieure à 5000 °C. Les dispositifs de protection électrique, actuellement installés (fusibles, disjoncteurs magnétothermique, etc…) ne peuvent détecter un arc électrique et donc sont dans l'incapacité de protéger l'habitation contre ce défaut. Un arc électrique peut se produire en parallèle avec une charge du circuit d'alimentation. Produisant une sur-intensité dans le circuit plus ou moins importante. Cette sur-intensité peut être détectée par un disjoncteur classiquement. Toutefois lorsque cet arc se produit entre la phase et le neutre d'un réseau électrique sans charge connectée, le courant dans certains cas (pont carboné) reste inférieur au seuil de déclenchement du disjoncteur protégeant le circuit.

Un arc peut également se produire en série avec une charge électrique dans le circuit. C'est le cas d'une borne mal vissée ou d'un interrupteur défectueux. Dans ce cas, l'arc constitue une impédance en série avec la charge n'engendrant tout au plus aux « yeux » du disjoncteur qu'une très légère baisse de courant. Ainsi aucune protection ne peut être assurée

par un disjoncteur dans le cas d'un arc série. Ce sont les phénomènes d'arc les plus difficiles à détecter et les plus dangereux pour les installations électriques dans l'état actuel des dispositifs de protection mis en place.

L'existence des arcs électriques non dangereux pour le fonctionnement des charges complique également la détection. C'est le cas de la présence d'arcs électriques sur les collecteurs à charbon de tous les moteurs électriques universels installés dans les appareils domestiques (aspirateur, batteur, robot de cuisine, …).

La problématique de recherche sur ce thème n'est pas nouvelle. Plusieurs approches ont fait dans le passé l'objet de publications ou de brevets. Elles sont basées soit sur des analyses du contenu fréquentiel du courant ou de la tension de ligne soit, d'analyses temporelles ou bien encore en temps-fréquence. Toutefois tous ces travaux sont limités à la détection dans des conditions que l'on peut considérer simples. C'est le cas du réseau constitué d'une seule charge souvent linéaire. Dans le cas d'un réseau complexe à plusieurs charges de nature différente incluant des charges de type gradateur et où l'arc peut se produire sur la ligne entre deux charges différentes, le problème de la détection est fortement accru.

Pourtant c'est dans ce contexte que les dispositifs domestiques doivent agir et protéger d'éventuelles sources d'incendies dues à des arcs électriques.

2. Problématique scientifique et technique

La finalité est de concevoir un dispositif capable de protéger une installation électrique domestique contre l'éventualité d'un défaut d'arc électrique. Pour une protection fiable de toute l'installation domestique, il faut disposer de détecteurs pour chaque branche de dérivation de l'installation ou pour chaque prise électrique, ce qui n'est pas viable économiquement. Une solution est l'implantation de ces techniques et circuits de détection au sein des disjoncteurs magnétothermiques qui sont installés sur le tableau électrique et qui protègent chaque branche de l'installation.

Ainsi les acquisitions d'informations faites au niveau du disjoncteur magnétothermique en amont de l'installation, doivent être non intrusives : ni capteur, ni phase d'apprentissage à l'intérieur de la résidence.

Les paramètres et contraintes à prendre en compte sont :

- S'appuyer sur la mesure du courant et de la tension de ligne en amont de l'installation
- Prendre en compte le temps de présence du défaut d'arc détecté et répondre par une commande d'ouverture du circuit selon la durée mesurée en présence d'un défaut d'arc.
- Être capable de détecter pour les cas de charges non linéaires et pour des charges dites de masquage.
- Prendre en compte le faible encombrement disponible dans un disjoncteur.

3. Démarche suivie

Notre démarche commence avec une analyse des systèmes d'installations domestiques et des défauts d'arcs électriques dans l'habitat, ainsi que des méthodes de détection existantes dans la littérature.

Notre travail exploite la modélisation d'un système électrique domestique avec l'objectif de disposer d'une plateforme de simulation numérique, pour représenter de manière fiable une installation électrique domestique avec les charges typiques (aspirateur, lampe,

bouilloire, perceuse, ordinateur,…) et aussi l'insertion d'un défaut d'arc électrique sur la ligne. Ces résultats sont comparés avec les acquisitions réelles de courant. La simulation de cette plateforme permet de mesurer les signaux du courant et tension de ligne, lesquels sont analysés et testés par les méthodes de détection de défauts d'arcs électriques (de la littérature et celles que nous proposons). L'objectif de cette étape est de pouvoir tester les méthodes de détection avant l'implémentation numérique et surtout d'avoir un moyen de test rapide en simulation avant le test réel.

L'étude, le test et le développement de différentes méthodes de détection de défauts d'arcs électriques sont menés afin d'observer et d'évaluer chacune des méthodes proposées dans la littérature (rapports, articles, brevets,…). Les analyses des caractéristiques en fréquence et en temps vont permettre l'identification d'éléments propres aux défauts d'arcs électriques. Les études réalisées ont permis d'identifier certaines caractéristiques électriques liées à un défaut d'arc et de développer trois méthodes de détection originales. Chaque méthode est testée en présence de défauts d'arcs sur différentes charges ainsi que pour plusieurs configurations de réseau électrique. La décision entre présence ou absence d'arc est un problème délicat et difficile à établir quelque soit la méthode testée. Afin d'obtenir de meilleurs résultats lors de la détection de défauts d'arcs, une quatrième méthode est proposée en combinant deux des méthodes originales proposées. Les résultats de cette dernière approche fournissent les meilleurs résultats pour la détection de défauts d'arcs électriques pouvant réduire le taux de fausses détections.

4. Organisation de la thèse

Le mémoire de cette thèse est organisé en quatre chapitres.

Un premier chapitre introductif présente l'essentiel des notions relatives aux systèmes électriques domestiques, aux défauts d'arcs électriques et à la norme électrique IEC pour la génération et le test des circuits de détection.

Le deuxième chapitre est une étude détaillée sur la modélisation d'un réseau électrique domestique contenant différentes charges ainsi que le modèle électrique représentant un défaut d'arc électrique. Les résultats des modèles sont validés par comparaison entre les courants mesuré et simulé. Tous les modèles sont développés sous Matlab / Simulink et SimPowerSystems.

Le troisième chapitre est consacré à l'état de l'art en matière de détection d'arcs et aux tests de ces méthodes. Des signaux réels acquis sur le banc expérimental du laboratoire ont permis de mettre toutes les méthodes dans des conditions réelles de détection.

Le quatrième chapitre est dédié au développement de nouvelles méthodes de détection. Les méthodes sont validées avec plusieurs tests sur différents types de signatures pour des charges simples et des charges combinées. La problématique du seuil de détection est aussi traitée afin de choisir le seuil optimal de détection.

Chapitre 1

1 Problématique de la détection de défauts d'arcs électriques

1.1 Introduction

L'objet de ce chapitre est de présenter dans un premier temps les installations électriques domestique et les principaux systèmes de protection contre les différents défauts susceptibles de représenter un danger électrique.

Ensuite, après une description des mécanismes physiques de l'arc électrique, nous nous intéressons à l'apparition et à la détection de tels défauts dans l'habitat. Aux États-Unis le Code National Electric (NEC) exige l'utilisation de disjoncteurs AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter). Le développement de ces dispositifs est réglementé par la norme UL1699 [1]. En Europe, il n'existe pas encore de réglementation pour l'installation de ce type de dispositif dans l'habitat. Toutefois, l'international Électrotechnique Commission (IEC) a publié la norme IEC 62606 [2], réglementant la conception de dispositifs de détection de défauts d'arc électrique.

À partir de la norme IEC62606 nous définissons ensuite les tests à mener (type de charge et configurations de branchement) pour la mise au point de méthodes de détection d'arcs fiable dédiées à l'habitat.

1.2 Installation électrique domestique et Norme NF C15-100

Le système d'alimentation électrique dans l'habitat est constitué par une source de tension alternative 230 V - 50 Hz pour l'Europe et 110 V - 60 Hz pour les États Unis.

Les deux types de distributions électriques existantes sont :

- Le régime monophasé constitué par deux pôles (phase et neutre) et une prise de terre. C'est le mode d'alimentation généralement utilisé dans les habitations domestiques.
- Le régime triphasé est constitué de trois lignes électriques permettant d'alimenter la charge avec un déphasage de 120 degrés entre chaque phase. Ce type d'alimentation est réservé plus spécifiquement pour l'industrie.
- Le régime triphasé + Neutre est constitué de trois lignes électriques permettant d'alimenter la charge avec un déphasage de 120 degrés entre phase et neutre. Ce type d'alimentation est réservé plus spécifiquement pour l'industrie et peut être assimilé comme trois lignes monophasées distinctes.

La norme électrique NF C15-100 s'applique obligatoirement aux nouvelles habitations domestiques et fournit les exigences minimales pour la protection des installations et des personnes.

La norme NF C 15-100 [7] impose :

- Un disjoncteur général de coupure et de protection.
- Des dispositifs de protection différentiels pour les prises.
- Un dispositif de protection différentiel pour le lave-linge et les plaques de cuisson.
- La présence de la prise de terre à chaque point d'utilisation.
- L'installation de disjoncteurs qui comprend plusieurs circuits spécialisés :
  - 1 circuit protégé par un disjoncteur 32 A dédié à la cuisine.
  - 3 autres protégés par un disjoncteur 20 A pour les appareils (lave-linge, lave-vaisselle, sèche-linge, four…).
  - Des circuits dédiés à l'alimentation du chauffage électrique.
  - Des circuits dédiés à l'éclairage pour le logement.
  - Des circuits pour les prises de courant non spécialisées 16 A.

Par contre la norme d'installation électrique (NF C15-100) ne contient pas de réglementation pour l'utilisation de dispositifs de détection et coupure dans le cas des défauts d'arcs électriques.

La Figure 1.1 représente le schéma général d'un réseau électrique domestique comprenant les systèmes de protection dédiés à chaque circuit.

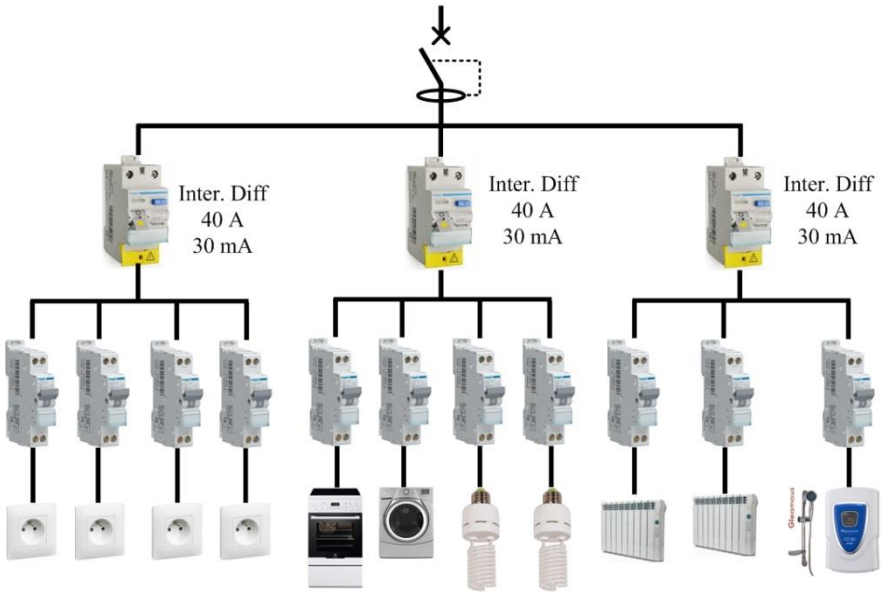


Figure 1.1. Réseau électrique domestique

1.3 Système de disjonction et mode de fonctionnement

Le système de disjonction électrique protège la ligne électrique contre des défauts éventuels du type surcharge lente ou des courts-circuits. Ces défauts peuvent avoir des

conséquences importantes sur l'installation comme la destruction de la ligne, voir l'amorçage d'un incendie. Les protections actuelles protègent donc les câbles contre des échauffements trop importants en analysant:

- Des surcharges dites lentes (déclenchement thermique de 1.13 à 1.45 fois le courant nominal).
- Des surcharges dites rapides ou court-circuit (déclenchement magnétique suivant la courbe 3 à 5 ou 5 à 10 ou de 10 à 20 fois le courant nominal).
- Des défauts d'isolement (pour les produits différentiels).

Chaque disjoncteur utilise différentes techniques pour le déclenchement et l'ouverture du système de coupure. La Figure 1.2 présente les éléments principaux qui composent un disjoncteur magnétothermique, ce sont :

A. Bobine magnétique, relais magnétique pour la protection contre les court-circuits.
B. Bilame métallique, relais thermique pour la protection contre les surcharges.
C. Serrure de fermeture et ouverture des contacts
D. Chambre de coupure pour l'extinction de l'arc électrique.

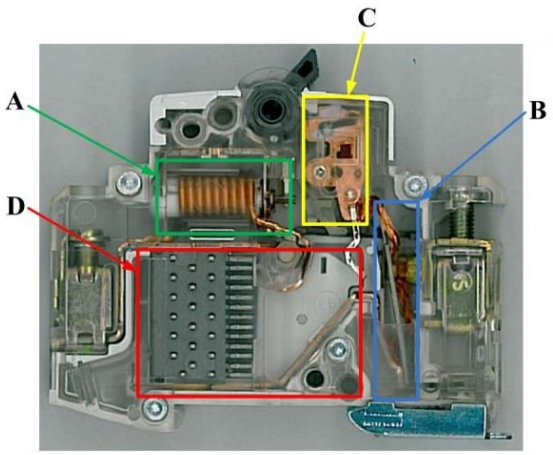


Figure 1.2. Constitution d'un disjoncteur magnétothermique.

Le principe de fonctionnement d'un disjoncteur est basé sur les 2 effets suivants :

- **L'effet thermique**

Une surcharge de courant traversant le système électromécanique composé par un bilame produit un échauffement et une déformation de celui-ci par effet joule (transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique). Le bilame fournie l'énergie mécanique nécessaire pour ouvrir une serrure interrompant ainsi le courant dans la ligne. Cette protection thermique protège principalement les conducteurs contre les échauffements.

- **L'effet magnétique**

Le courant dans le disjoncteur produit un champ électromagnétique qui est mesuré par un électroaimant. Un courant électrique important provoque un champ magnétique qui déplace un noyau mobile entrainant l'ouverture rapide du circuit (déplacement d'un noyau de fer doux).

Le choix d'un disjoncteur est basé sur ces caractéristiques principales :

- Calibre I_n : Courant nominal ou courant assigné d'emploi.

- Courant de réglage I_{th} : réglage du déclenchement thermique.
- Courant de déclenchement magnétique I_m : en général I_m = 5 à 10 I_n.
- Courant de déclenchement instantané I_{inst} : n'existe que sur les disjoncteurs électroniques. Il correspond à une coupure immédiate en cas de fort court-circuit.
- Tension assignée d'emploi 230 V.
- Pouvoir de coupure.
- Nombres de pôles (monophasé, triphasé,…).

La Figure 1.3 présente les caractéristiques techniques d'un disjoncteur commercial Hager de courant nominal 16 A.



Caractéristiques techniques:
Nombre de pôles : 2
Courant nominal : 16 A
Pouvoir de coupure : 3 kA
Fréquence : 50/60 Hz
Tension d'emploi : 230 V
Température de fonctionnement : -25 à 60 °C

Figure 1.3 Disjoncteur Hager

À chaque type de disjoncteur est associée la courbe de déclenchement représentée sur la Figure 1.4. Elle détaille les zones protégées par ce type de dispositif.

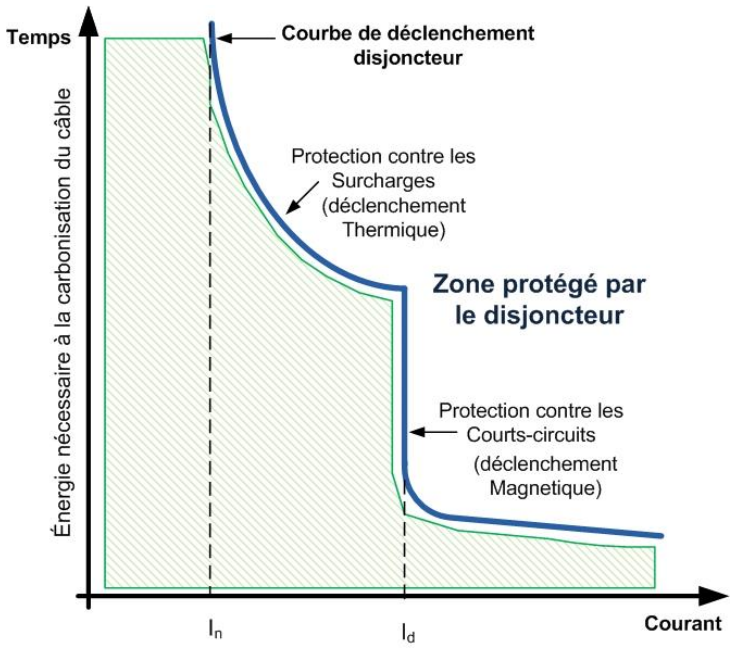


Figure 1.4. Courbe de déclenchement disjoncteur

Toutefois, d'autres défauts peuvent apparaître dans une installation comme l'apparition d'un arc électrique dû, par exemple, à un mauvais serrage de conducteur. Ces défauts d'arcs

électriques peuvent se produire dans la zone de non protection des disjoncteurs (zone hachurée en vert), pour laquelle la valeur du courant d'arc est inférieure à la valeur minimale du courant de détection de la courbe de déclenchement. Dans ce cas, les produits conventionnels tels que les fusibles, disjoncteur ou autres produits différentiels ne seront pas en mesure de détecter cette anomalie (sauf si le défaut est produit entre phase et terre ou neutre et terre).

1.4 Arcs électriques et habitat

En mars 2014, l'USFA's (U.S. Fire Administration's National Fire incedent Reporting System - NFIRS) aux Etat Unis a présenté un rapport sur les conséquences et les causes des incendies d'origine électrique [6]. Le rapport conclut qu'annuellement entre 2009 et 2011 une estimation de 25900 incendies sont produits par des défauts électriques. Ces incendies ont causé 280 morts, 1125 blessés et 1.1 billions de dollars en pertes matérielles. 15% des incendies d'origine électrique se produisent et débutent dans la chambre à coucher (Tableau 1.1). Les principales causes de génération de ces incendies (46.8%) sont dues au vieillissement et à la dégradation des câbles électriques dans le temps (Figure 1.5) [5].

Lieu d'origine des incendies	% d'Incendies	Conséquences en		
		Morts	Blessures	Pertes $
Chambre à coucher	15.1 %	16.6 %	26.9 %	16.0 %
Grenier	11.3 %	--	--	11.6 %
Cuisine	9.4 %	6.4 %	6.2 %	9.0 %
Couloir	8.4 %	5.7 %	5.9 %	8.2 %
Salon	6.8 %	31.2 %	13.9 %	7.1 %
Autres	--	8.3 %	6.6 %	--

Tableau 1.1. Origine des incendies dans l'habitat

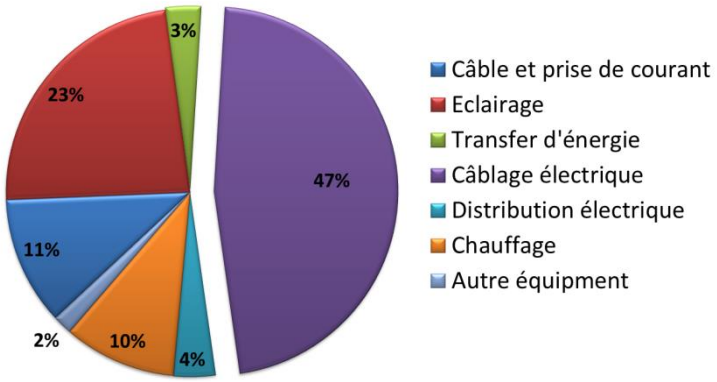


Figure 1.5. Équipements domestiques impliqués dans le déclenchement des incendies

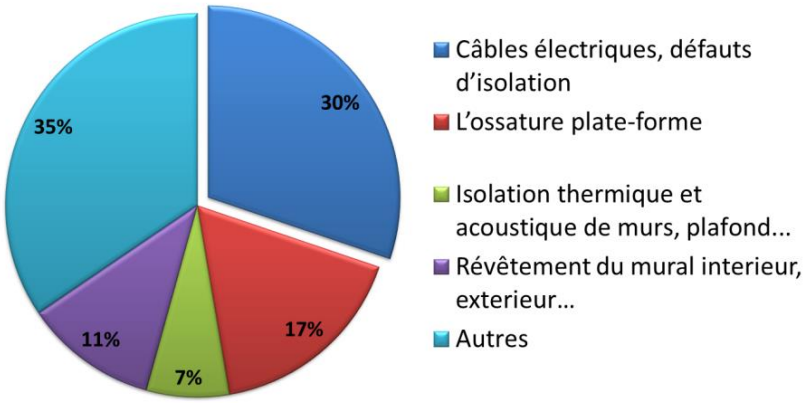


Figure 1.6. Localisation d'allumage des arcs électriques

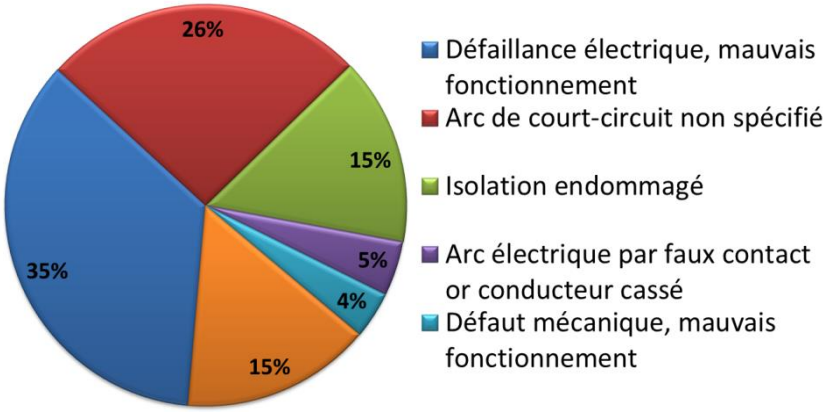


Figure 1.7. Facteurs de déclenchement d'un incendie.

Ce rapport met également en évidence que 30.2 % des incendies sont liés au câbles électriques et à des défauts d'isolation (Figure 1.6).

La Figure 1.7 montre les principaux facteurs qui contribuent à l'allumage d'un incendie d'origine électrique. 81 % des incendies sont dus à des défauts électriques et la partie directement liée à un arc électrique (arc de court-circuit et arc par mauvais contact) représente 45.5 % des causes de déclenchement d'incendie et 35.4 % des cas liés à un problème électrique pour lesquelles les causes sont mal définies.

En France, le Groupe de Réflexion sur la Sécurité Électrique dans le Logement en 2014 (GRESEL) [8] a regroupé des études et des estimations sur les incendies d'origine électrique et indique que :

- Le Centre Européen de Prévention des Risques (CEPR) estime que 34% des incendies ont été causés par des défauts d'origine électriques.
- Le Centre National de Prévention et de Protection (CNPP) estime entre 25 et 30% la proportion des incendies domestiques d'origine électrique.
- La Brigade de Sapeurs-Pompiers de Paris (BSPP) estime à au moins un tiers la proportion des incendies d'origine électrique.

L'Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé (INPES) en 2004 [9] conclut sur la situation et les conséquences des incendies en France :

- On dénombre 10 000 victimes chaque année dont environ 460 décès.

- Un incendie sur 4 est dû à une installation électrique défectueuse.
- La température d'une pièce en feu atteint près de 600°C en 5 minutes.

En Nouvelle Zélande, entre 1986 et 2003, le New Zealand Fire Service (NZFS) [10] a référencé principalement deux types d'incendie d'origine électrique : le premier lié à un arc (câble endommagé,…) et le second initié par un équipement électrique défectueux. De plus, environ 59000 incendies ont été produits par des défauts électriques dont environ 11000 directement par un arc électrique.

L'ensemble de ces études menées dans de nombreux pays montrent clairement que le déclenchement de nombreux incendies est lié à des problèmes électriques et notamment à l'apparition d'arc électrique dans la ligne. Ces conclusions justifient la nécessité d'une protection accrue des dispositifs électriques domestiques et notre étude sur la détection de l'apparition des arcs électriques.

1.5 Mécanismes de production d'un arc électrique

1.5.1 Décharge électrique DC

Par définition une décharge électrique est produite par l'ionisation des atomes dans l'isolant qui sépare deux électrodes à des potentiels différents.

Le circuit de la Figure 1.8 représente le circuit mis en œuvre permettant d'obtenir les caractéristiques courant – tension lors des décharges. La Figure 1.9 décrit le comportement du courant en fonction de la tension appliquée [11].

Une différence de potentiel continue, appliquée entre les deux électrodes séparées par la distance « d », produit l'ionisation de l'isolant. Les électrons libres contenus dans un gaz (l'isolant) s'accélèrent. Cette ionisation charge une particule et libère un électron qui va obtenir une énergie suffisante pour ioniser une autre particule et libérer un autre électron. Ce phénomène est appelé avalanche électronique [11-14].

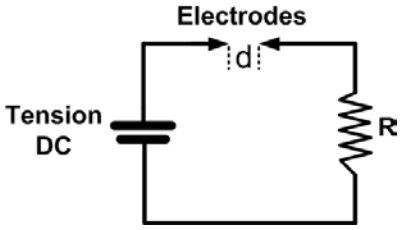


Figure 1.8. Circuit électrique

Une décharge à courant continu peut alors se diviser en 4 phases différentes qui se succèdent, deux régions peuvent être observées [13] :

- La région sombre :
  - Une zone de collection
  - La décharge Townsend
- La région luminescente :
  - La décharge luminescente

- La décharge d'arc

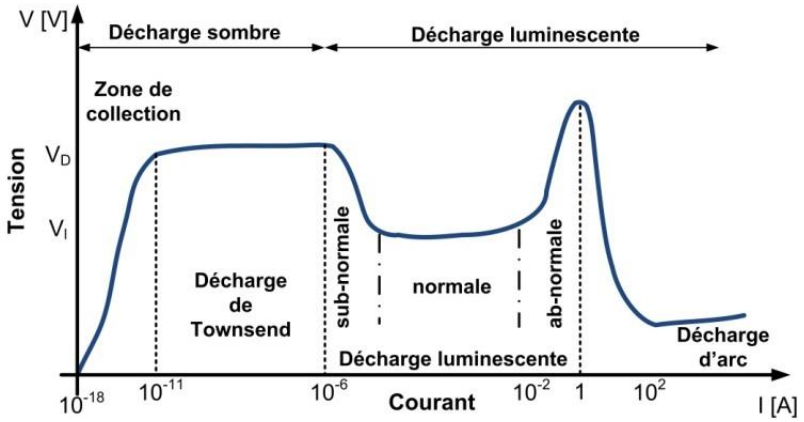


Figure 1.9. Caractéristiques courant-tension de différents régimes de décharge

- **Zone de collection**

Cette zone se caractérise par la faible quantité d'électrons libérés car le champ électrique est faible. La décharge ne peut exister que par la présence d'une source extérieure d'alimentation qui provoque l'émission d'électrons de la cathode. Cette décharge n'est pas entretenue.

- **Décharge de Townsend**

Lorsque le champ électrique augmente, une saturation du courant est observée. Les électrons acquièrent une énergie suffisante pour ioniser le gaz par collisions des atomes. La décharge produit alors une avalanche d'électrons de la cathode vers l'anode. Le courant augmente alors très fortement pour une faible variation de la tension. Il n'existe toutefois pas encore de condition d'auto entretien.

Si la tension atteint le seuil V_D appelé « potentiel disruptive ou tension d'amorçage» alors le courant croit fortement suite au bombardement des électrons vers l'anode. La décharge devient auto-entretenue [13] (décharge de Townsend).

- **Décharge luminescente**

Cette décharge correspond au passage de la décharge de Townsend à la décharge luminescente caractérisée par une luminosité visible à l'œil nu. Ce régime est divisé en trois étapes successives :

– Décharge luminescente subnormale

Cette zone se caractérise par l'augmentation du courant et la diminution de la tension. Dans cette étape le plasma n'est pas encore créé.

– Décharge luminescente normale

C'est le régime typique de fonctionnement d'un tube à décharge pour les applications d'éclairage. Due à la nouvelle configuration du champ électrique entre les électrodes et la génération du plasma, le passage des ions vers la cathode et des électrons vers l'anode est facilité. La décharge normale nécessite une tension plus faible que celle dans la décharge de Townsend [11, 12].

- Décharge luminescente ab-normale

Elle s'établit lorsque la décharge recouvre la totalité de la surface de la cathode, ce qui constitue une condition d'auto entretien. L'augmentation du champ électrique entraine celles de la tension et du courant. On parle alors de la décharge corona [14].

- **Décharge d'arc**

La décharge d'arc est caractérisée par une émission lumineuse très intense avec une température très élevée. Le courant augmente alors fortement et la tension diminue. Les électrons sont émis par un procédé thermoïonique dû au chauffage de la cathode (spot cathodique).

1.5.2 Courbe de Paschen et influence de la température et de la pression

1.5.2.1 Courbe de Paschen.

La courbe de Paschen décrit le mécanisme de rupture de Townsend dans différents milieux. Elle représente l'évolution de la tension de claquage ou d'amorçage « Vs » nécessaire pour augmenter le nombre des électrons porteurs de charges produites par les collisions électroniques, en fonction de la pression « p » et la distance « d » entre deux électrodes [11, 13].

La Figure 1.10 donne l'allure des courbes obtenues pour différents isolants. Cette courbe montre qu'une tension d'amorçage minimale est nécessaire pour le déclenchement de l'arc à une distance déterminée. Pour une distance donnée, plus la pression augmente plus la tension d'amorçage diminue.

Les déviations de la courbe de Paschen sont liées à la variation des conditions environnementales (air, H_2, NO, $SO_{2,...}$). Les principaux facteurs d'influence sur la tension de claquage sont :

- La nature des électrodes et leurs combinaisons.
- Les conditions atmosphériques (pression, température et humidité)
- La tension appliquée et la fréquence

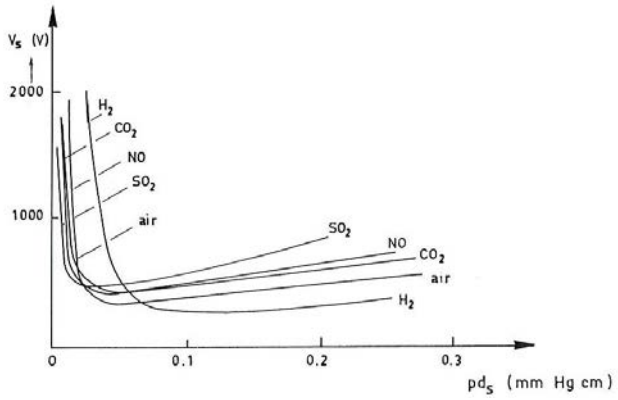


Figure 1.10. Courbes de Paschen pour l'air, NO, H_2, CO_2, SO_2 [13]

1.5.2.2 Influence de la température et de la pression

Les variations de la pression et de la température (Figure 1.11) influent sur la valeur de la tension de claquage de l'arc en raison de l'énergie des ions en mouvement et de l'agitation thermique qui contribuent à la mobilité des électrons. Ainsi Koliatene [13] met en évidence les variations de la courbe de Paschen en fonction de la température et de la pression.

Une augmentation de la température favorise la formation d'une décharge électrique disruptive dans l'isolant [13, 15], la tension nécessaire pour le claquage de l'arc baisse.

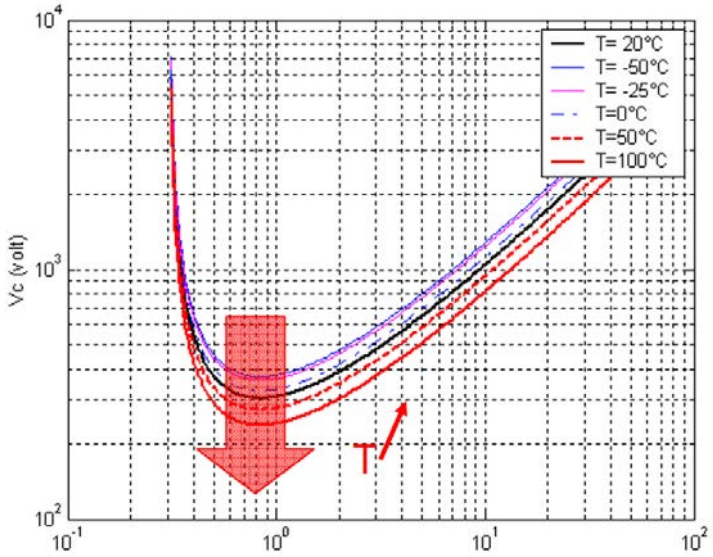
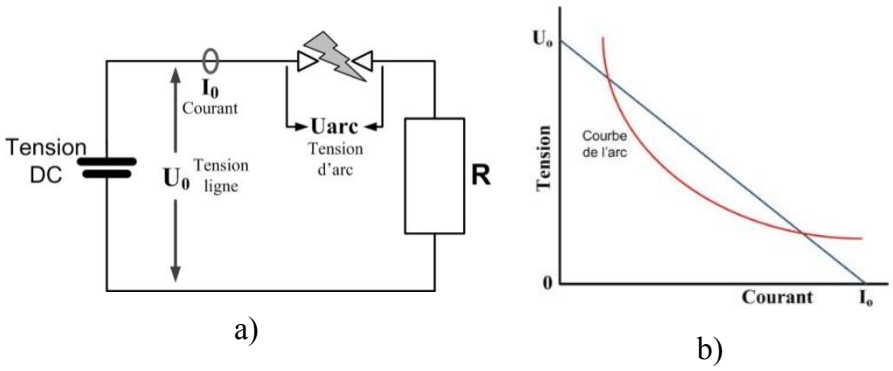


Figure 1.11. Courbes de Paschen pour différents valeurs de température [13, 15].

1.5.3 Caractéristique statique d'un circuit DC

La Figure 1.12 présente le circuit qui permet de faire une étude statique du comportement de l'arc lors de la variation de la distance entre les électrodes.

Lorsque les électrodes sont en contact, la tension d'arc U_{arc} est nulle et le courant vaut I_0. Lorsque les électrodes sont très éloignées, la tension d'arc U_{arc} vaut U_0 et le courant $I_0 = 0$ A.



a) b)

Figure 1.12. Caractéristiques statiques de l'arc.

La Figure 1.13 présente les caractéristiques tension – courant d'arc obtenues pour différentes distances entre les électrodes (gap) dans un milieu environnant constitué d'air. Pour une distance donnée, la tension d'arc augmente avec la distance inter électrode.

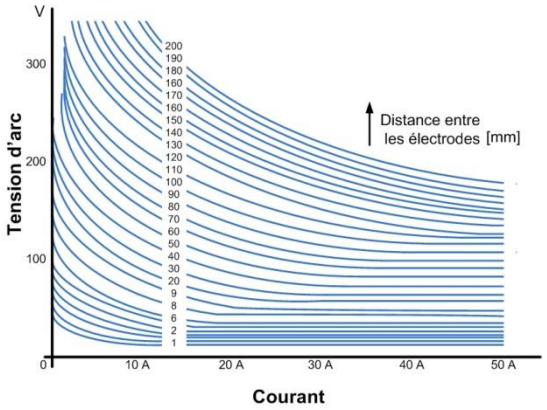


Figure 1.13. Courbe courant - tension pour différents gaps [16, 17].

1.5.4 Tension d'arc en fonction de la nature des électrodes

Plusieurs auteurs [11, 18, 19] ont déterminé les valeurs de tension minimale d'un arc entre deux électrodes (Tableau 1.2). Ces valeurs peuvent aussi dépendre de la nature et la géométrie des électrodes utilisées et de l'atmosphère environnante.

Matériau	**Tension d'arc (V)**	**Matériau**	**Tension d'arc (V)**
Cuivre (Cu)	13	Or (Au)	15
Fer (Fe)	13 - 15	Nickel (Ni)	14
Carbone (C)	20	Platine (Pt)	17.5
Argent (Ag)	12		

Tableau 1.2. Tension d'arc minimale pour différents matériaux dans l'air [18, 19]

1.5.5 Décharge dans l'air et l'isolant

1.5.5.1 Décharge dans l'air

L'air est le plus important isolant, avec une grande résistivité et une rigidité électrique élevée; le mouvement de ses particules est libre et aléatoire. Le processus d'ionisation des molécules de l'air produite par la collision des électrons lors de l'application d'un champ électrique cause la perte de la propriété d'isolement et favorise la formation d'une décharge.

1.5.5.2 Rupture d'un isolant solide

Quand une décharge est produite, la décharge détériore une partie de l'isolant, il se crée un pont résistif entre les conducteurs : cette étape correspond à la création d'un chemin carboné ou pont carboné. Lors que le champ électrique nécessaire pour une nouvelle rupture augmente, l'isolant devient plus faible cet effet favorise la formation d'un arc. Les différentes phases de génération de la décharge sur l'isolant solide sont représentées dans la Figure 1.14. La création de ce chemin carboné est faite avec un générateur d'haute tension (6 kV) pour un courant de 5 A.

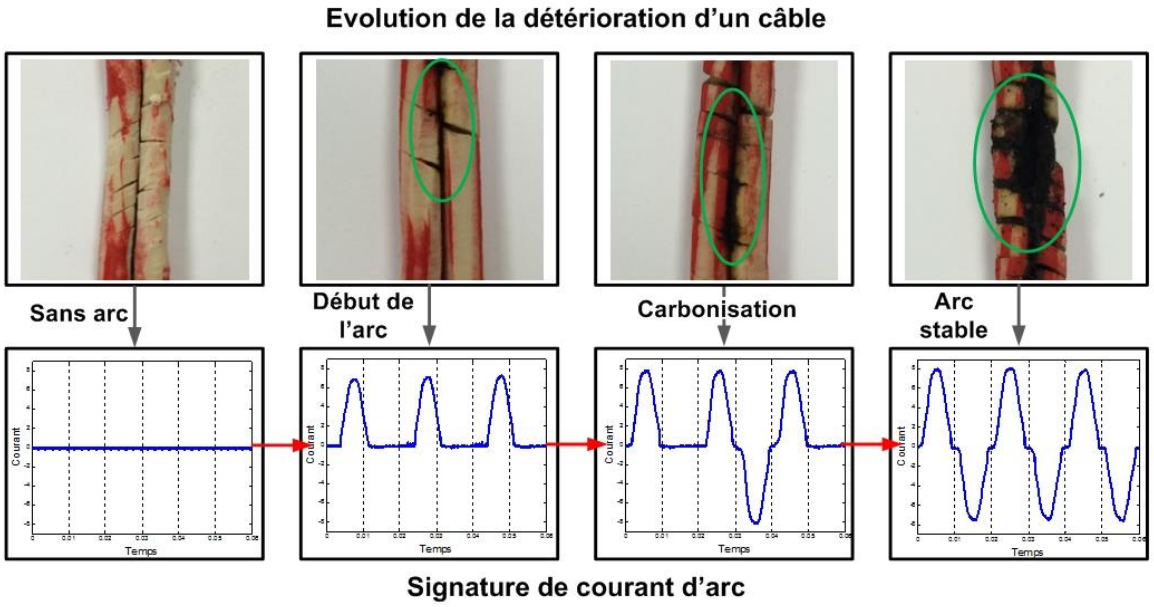


Figure 1.14. Décharge à travers d'un isolant solide (chemin carboné)

1.6 Arc électrique en régime alternatif

Les processus de décharge présentent un comportement identique à ceux décrits pour une décharge avec une excitation continue. La décharge électrique AC produit une alternance du champ électrique entre l'anode et la cathode provoquant un déplacement alterné des électrons entre les électrodes (anode et cathode) [20-22]. Pour l'alimentation alternative, la fréquence de 50 Hz ou 60 Hz est suffisamment basse pour permettre à un électron de rejoindre l'anode.

La Figure 1.15 montre le circuit de test pour la génération d'un arc électrique alternatif.

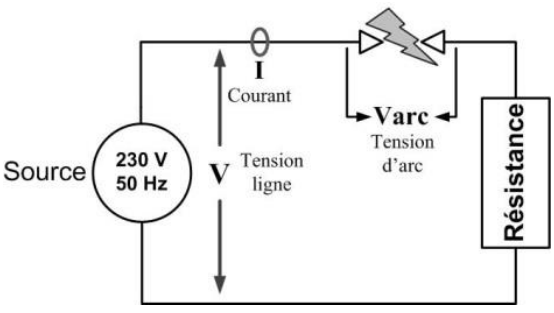


Figure 1.15. Circuit pour la génération d'un arc électrique alternatif

La Figure 1.16 montre les caractéristiques de tension et courant de ligne lors de la production d'un arc électrique alternatif sur une charge résistive.

Pour l'alternance positive, lorsque la tension appliquée entre les électrodes atteint le seuil de claquage positif (tension de restrike), le champ électrique produit favorise la conduction des électrons vers l'anode. À cet instant, il se produit une conduction majoritaire des électrons (courant électrique). La tension entre les électrodes ou tension d'arc, diminue et se stabilise à une valeur quasiment constante liée à la valeur d'impédance d'arc entre les électrodes.

Lorsque la tension du signal d'entrée ne permet plus de maintenir l'arc électrique, celui-ci s'éteint. L'impédance de l'arc devient infinie et se confond à la tension d'alimentation. Au passage par zéro, une tension négative est appliquée au circuit. Dès que la tension de re-strike (seuil de claquage négatif qui peut être différent du seuil positif) est atteinte, l'arc s'amorce à nouveau. Comme lors de l'alternance positive la tension d'arc se stabilise à une valeur constante mais négative. L'arc s'éteint lorsque la tension d'alimentation est trop faible. Le mécanisme de production d'arc se reproduit identiquement lors des alternances suivantes.

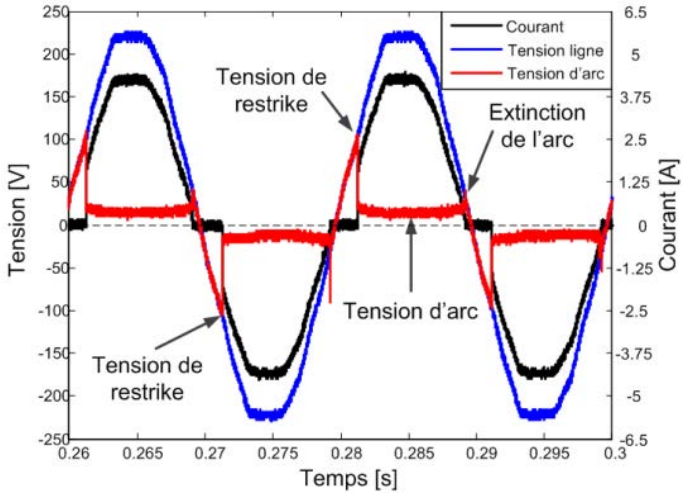


Figure 1.16. Caractéristiques tension-courant d'un arc électrique pour une charge résistive

Les caractéristiques principales d'un arc électrique alternatif [23, 24] sont :

- La présence d'un bruit haute fréquence dans les signaux tension et courant.
- La tension entre les électrodes chute pendant la durée de l'arc et est maintenue constante.
- La forme d'onde de la tension aux bornes de l'arc se rapproche d'un signal rectangulaire pendant la durée de l'arc.
- Au passage par zéro de chaque demi-alternance, l'arc s'éteint et se réamorce, entre ces deux instants, le courant a une valeur nulle comme le montre la Figure 1.16.

1.7 Modèle d'arc électrique

L'ensemble des modèles d'arcs électriques liés fortement aux applications divers sont de deux types :

- Les modèles de conductance d'arc.

- Les modèles à diodes.

Les disjoncteurs et sectionneurs utilisent les modèles basés sur les études développées par Mayr [25] et Cassie [26]. Les modèles à diodes et à conductance sont principalement utilisés pour simuler des défauts de type haute impédance (High Impedance Fault - HIF) dans le cas de la moyenne et haute tension [20, 27-31].

Pour notre application limitée à l'alimentation domestique (la tension de 230 volts et le courant alternatif), nous utiliserons une combinaison de l'ensemble de ces modèles et celui proposé par Andrea et al [32].

1.7.1 Modèles de conductance

Ces modèles de représentations macroscopiques d'arcs permettent de calculer l'évolution de la conductance de l'arc. Ils sont très utilisés pour comprendre les phénomènes d'interaction entre l'arc de coupure et le circuit à interrompre [11].

1.7.1.1 Modèle de Mayr

Afin d'élaborer son modèle, Mayr en 1943 [25] a assimilé l'arc à un cylindre de rayon constant dans lequel l'évacuation de l'énergie est uniquement due à la conduction thermique [11, 33]. Il pose que la conductivité électrique varie avec la quantité de chaleur. Son modèle d'arc est décrit par l'équation suivante :

$$\frac{1}{g}\frac{dg}{dt} = \frac{d\ln g}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{ui}{P} - 1\right) \qquad (1)$$

Où :

- g est la conductance de l'arc
- u est la tension d'arc
- i est le courant d'arc
- τ est la constante de temps de l'arc.
- P est la puissance de refroidissement

1.7.1.2 Modèle de Cassie

Cassie en 1939 [26] modélise également l'arc par un cylindre mais de rayon variable et de température constante. Les pertes d'énergie ne sont dues qu'à la convection et sont proportionnelles à la section de l'arc [11]. L'équation du modèle de Cassie est décrite dans l'équation suivante :

$$\frac{1}{g}\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}\left(\frac{u^2}{U_0^2} - 1\right) \qquad (2)$$

Où :

- u est la tension d'arc
- U_0 est une constante de la tension d'arc
- τ est la constante du temps de l'arc
- g est la conductance de l'arc

1.7.2 Modèles à diodes

Ces modèles présentés par plusieurs auteurs sont basés sur l'analyse électrique et principalement la signature du courant et la tension d'arc [20, 27, 28, 34].

Le modèle de défaut haute impédance (HIF) est largement utilisé pour la modélisation d'un arc dans les systèmes électriques de moyenne et haute tension. Les types de défaut HIF se produisent quand un conducteur électrique sous tension est amené à être en contact avec un objet quasi isolant (arbre, sol ou autres surfaces). Ce contact limité permet d'obtenir des courants de défauts pour des valeurs de courant comprises entre quelques milliampères jusqu'à plusieurs ampères [34].

La plupart des modèles d'arc se basent sur les deux hypothèses suivantes :

- Le départ du défaut est dû à l'amorçage de l'arc.
- L'impédance de l'isolant entre les deux surfaces de contact est constante.

Le modèle HIF de base est constitué par deux diodes et deux sources de tension DC (positive Vp et négative Vn) connectées selon le schéma de la Figure 1.18. Notons toutefois que ces hypothèses ne permettent pas de prendre en compte le caractère aléatoire et chaotique de l'arc au cours du temps.

Emanuel et al en 1990 [20] présentent une étude sur les arcs haute impédance sur un sol sableux pour une tension de l'ordre de 15 kV. À partir de ces résultats Emanuel propose un modèle d'arc contenant deux sources continues (V_P et V_N représentant les tensions d'arc maximales obtenues). Le signal d'arc obtenu lors des alternances positive et négative est représenté par un signal carré. Le modèle est basé sur l'analyse des caractéristiques v-i de l'arc (Figure 1.17).

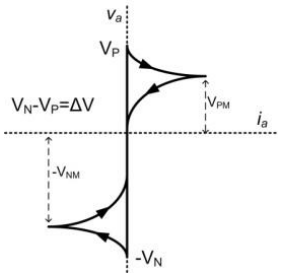


Figure 1.17. Caractéristiques tension courant de l'arc

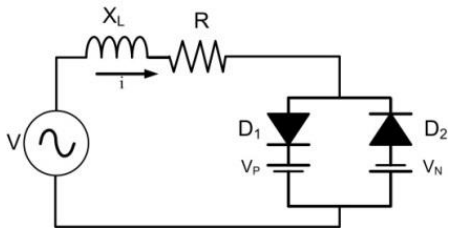


Figure 1.18. Modèle d'arc, circuit HIF [20]

La Figure 1.19 représente les signaux du courant et de tension d'arc obtenus avec le modèle sur une charge résistive.

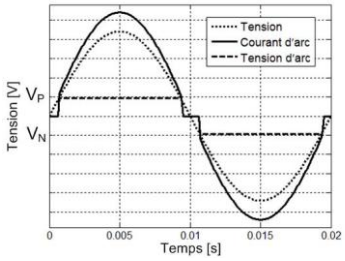


Figure 1.19. Courant d'arc, tension d'arc et tension de ligne [20]

Lorsque la tension de ligne (V) dépasse la tension positive (V_P), la création d'un arc électrique permet le passage du courant d'arc. Dès que cette tension est inférieure à V_P l'arc s'éteint et le courant passe à une valeur nulle. Pour l'alternance négative, on observe le même phénomène avec la tension seuil V_N. Ainsi lorsque la tension de ligne a une valeur comprise entre V_P et V_N, le courant de défaut est nul.

Etemadi et al [27] proposent également un modèle HIF dans lequel deux résistances de défaut variables R_P et R_N ont été insérées (Figure 1.20). Les valeurs différentes des résistances R_P et R_N permettent d'obtenir une modélisation asymétrique du courant d'arc.

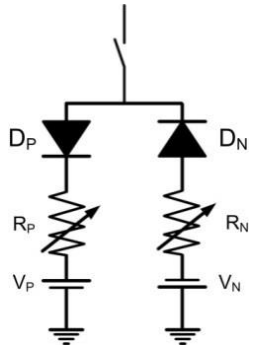


Figure 1.20. Model HIF et signature d'arc [27]

Zaman et al [28, 29] proposent un modèle HIF non-linéaire et asymétrique avec un comportement quasi aléatoire de l'arc. Deux inductances L_P et L_N, ajoutées au modèle précédent, permettent d'obtenir une forme d'onde asymétrique du courant (Figure 1.21).

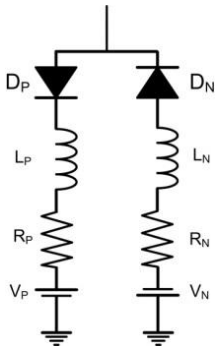


Figure 1.21. Modèle de Zaman et al.

Ces modèles de base nous servirons pour modéliser l'arc sur une ligne électrique domestique qui sera présenté dans le chapitre II.

1.8 Arcs électriques et habitat – Aspects normatifs

Dans les installations électriques, les deux configurations d'arc pouvant apparaître dans un circuit sont l'arc série et l'arc parallèle [4].

1.8.1 Arc électrique série.

La production d'un défaut de ce type d'arc est liée à :

- La mauvaise connexion des connecteurs dans une prise électrique,
- La mauvaise connexion entre un connecteur et la charge,
- La rupture d'un conducteur du câble,

L'arc série (Figure 1.22) se produit dans une ligne et en série avec la charge.

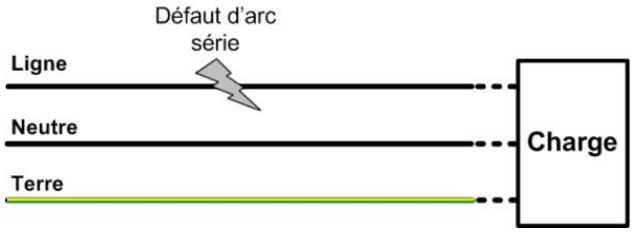
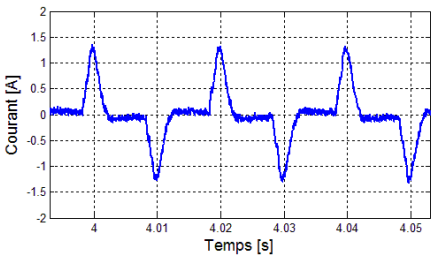
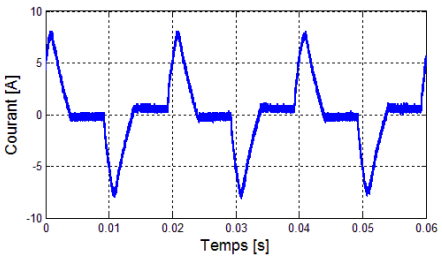


Figure 1.22. Arc électrique série

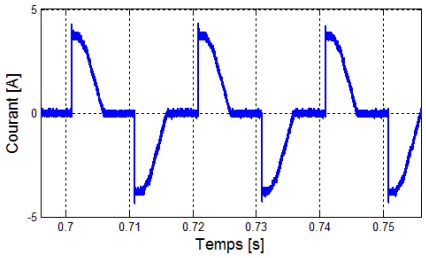
La valeur du courant d'un arc série dépend du courant consommé par la charge et de l'impédance de l'arc, elle est donc faible par rapport à celle du courant d'un arc. Si l'arc se maintient pendant un temps suffisamment long, l'arc série peut libérer une grande quantité d'énergie. La température aux bornes de l'arc peut atteindre environ 5000 C [5] générant la carbonisation du câble et le démarrage d'un incendie. La détection d'un tel phénomène est primordiale dans un système électrique domestique.



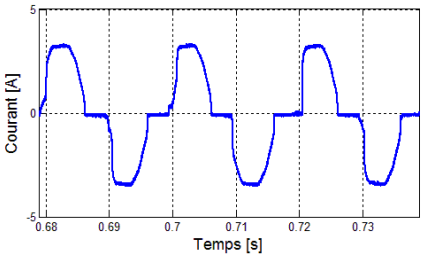
Perceuse



Aspirateur



Gradateur



Charge résistive avec défaut d'arc

Figure 1.23. Signatures du courant pour différents charges

Néanmoins il existe des configurations pour lesquelles la présence d'un arc n'est pas dangereuse. C'est le cas des charges domestiques pour lesquelles un arc est produit lors du fonctionnement normal de l'appareil. Pour des charges à base de moteur universel (perceuse, aspirateur…) la connexion entre la partie fixe (stator) et la partie mobile (rotor) est assurée par les balais où vont se créer des arcs lors du passage de courant entre ces deux parties.

La Figure 1.23 présente les signatures de trois charges domestiques (perceuse, aspirateur et gradateur) en fonctionnement normal ainsi que la signature du courant obtenu sur une ligne électrique pour un arc en série avec une résistance.

La détection d'un arc série est difficile à réaliser pour un disjoncteur magnétothermique classique car les valeurs du courant d'arcs se trouvent souvent en dessous de la valeur du courant nominal de déclenchement. D'autre part certaines charges telles que la perceuse, l'aspirateur, le gradateur… ont aussi une signature du courant qui ressemble à celle d'un arc électrique.

1.8.2 Arc électrique parallèle

Dans ce cas, l'arc apparait en parallèle avec la charge. Deux configurations distinctes peuvent être considérées (Figure 1.24) :

- L'arc peut apparaitre entre deux lignes électriques différentes (par exemple entre la phase et le neutre) : Ligne à ligne ou « Line to line ».
- L'arc peut également se produire entre la ligne et la terre : ligne à terre ou « line to ground ».

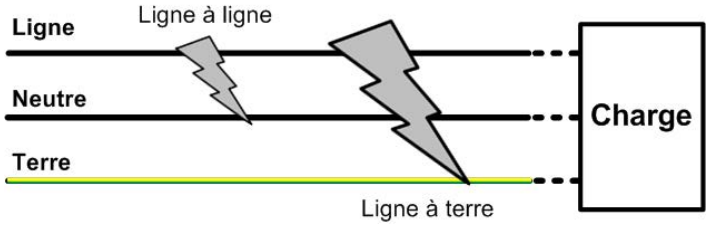


Figure 1.24. L'arc électrique parallèle entre la phase et la terre.

Un arc parallèle produit un courant important qui dépend de l'impédance de la ligne et des caractéristiques du défaut d'arc (impédance d'arc).

- Dans le cas d'un contact direct entre deux fils (ligne à ligne), ce défaut correspond à un court-circuit. Le disjoncteur magnétothermique de protection détectera rapidement le défaut.
- Dans le cas d'un contact direct entre deux fils (ligne à terre), ce défaut correspond à un défaut dit « différentiel ». Le produit différentiel détectera rapidement le défaut.
- Par contre, si le défaut d'arc (ligne à ligne ou ligne à terre) correspond à un contact sporadique, le courant généré est aléatoire.

Si la détection de ce défaut n'est pas réalisée par le disjoncteur, l'arc qui apparait de façon aléatoire peut déclencher un incendie.

1.8.3 Causes d'apparition des défauts d'arcs électriques

Plusieurs causes, liées principalement à l'état du réseau électrique, sont responsables du déclenchement d'un défaut d'arc électrique [23] :

- Carbonisation de l'isolement.
- Ionisation de l'air induit par un facteur externe (crée par des flammes ou un arc proche).
- Court-circuit.
- Fil endommagé où l'isolation électrique est mauvaise.
- Connexions défectueuses.
- Perforation accidentelle du câble électrique.
- Câble électrique trop serré.
- Vieillissement naturel et/ou l'exposition du câble à la chaleur, la lumière du soleil.
- Câble endommagé dû au piétinement.
- Vibrations dans les connexions qui peuvent générer des arcs série.

Les figures 1.25, 1.26, 1.27 et 1.28 représentent les causes possibles de production d'un défaut d'arc dans une installation électrique domestique [35, 36].

La Figure 1.25 présente deux cas de mauvais contacts ou avec une connexion intermittente, lesquelles peuvent aussi produire un phénomène appelé « glowing connection ». Ce phénomène produit l'échauffement du conducteur aux points de connexion et fait que les métaux commencent à s'oxyder. Cette formation d'oxyde peut conduire à une surchauffe résistive qui peut éventuellement former un pont en fusion de cuivre et d'oxyde de cuivre à une température d'au moins 1235 °C. Cette connexion peut prendre des heures, des jours ou des années à se produire. La formation d'un pont résistif dans la connexion est difficile à détecter. Néanmoins, des défauts d'arcs séries peuvent être amorcés par la rupture d'un contact chauffant (glowing connection) [37].



Figure 1.25. Mauvais contacts ou un couple faible de connexion [35, 36].



Figure 1.26. Câble ou isolement endommagé dû à une mauvaise installation [35, 36]



Figure 1.27. Isolement du câble endommagé par perforation [35, 36]



Figure 1.28. Isolement du câble endommagé par le dispositif de serrage [35, 36]

1.8.4 Systèmes de disjonction pour la détection des défauts d'arcs

Les disjoncteurs de type AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter aux États-Unis) [1] et AFDD (Arc Fault Detection Device en Europe) [2] sont deux dispositifs de disjonction qui assurent la protection contre les défauts d'arc électrique dans une installation résidentielle.

Le standard American NEC (National Electrical) exige l'installation de tels dispositifs dans les installations résidentielles. La norme UL1699, quant à elle, prévoit les caractéristiques techniques de fonctionnement nécessaires pour ce type de produit. Les deux types principaux d'AFCI sont :

- AFCI de type « Branch/Feeder » qui est conçu pour détecter les défauts d'arc parallèle. Le déclenchement du disjoncteur s'effectue lorsque le courant en présence d'un arc atteint une valeur de 75 ampères.
- AFCI de type « Combination » qui est conçu pour détecter les défauts d'arc série et parallèle. Le courant minimal de détection est fixé à 5 ampères.

En Europe, la norme IEC 62606 [2] (basée sur la norme américaine UL1699) décrit les essais à mettre en œuvre incluant les charges domestique à tester ainsi que les procédures de test des dispositifs de détection de défaut d'arcs.

Cette norme indique qu'un dispositif de type AFDD doit assurer aussi bien la détection des défauts des arcs série que parallèle. En Europe, la réglementation pour l'installation de dispositifs de détection de défaut d'arc dans le tableau de distribution électrique domestique n'est pas obligatoire actuellement mais sera appliquée dans les prochaines années (probablement début 2017).

1.8.5 Temps de déclenchement d'un détecteur des défauts d'arcs

La Figure 1.29 présente la courbe de disjonction d'un disjoncteur électromagnétique (en bleu) prévue pour la détection d'un court-circuit et des surcharges du courant électrique. Pour les systèmes de disjonction de type AFDD la courbe de disjonction a été élargie (zone verte) afin de prendre en compte des défauts d'arc à partir de 2.5 A [4].

La norme IEC62606 indique les différents temps de déclenchement du disjoncteur en fonction du courant et la tension de ligne. Selon la norme, ces temps sont calculés en fonction de l'énergie nécessaire pour enflammer un coton (fixé par la norme à 100 joules).

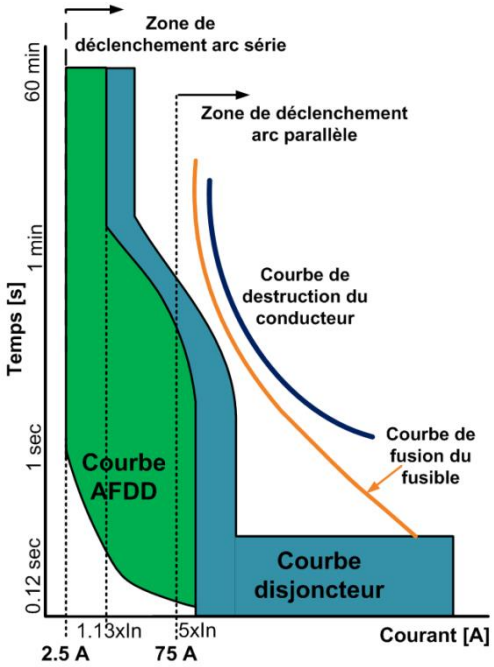


Figure 1.29. Courbe caractéristique d'un détecteur de défaut d'arc

Pour un arc série et une tension d'alimentation de 230 V. La norme impose les temps de déclenchement présentés dans le Tableau 1.3:

Courant d'arc (rms)	2.5 A	5 A	10 A	16 A	32 A
Temps de coupure maximal	1 s	0.5 s	0.25 s	0.15 s	0.12 s

Tableau 1.3. Temps de détection pour une alimentation alternative de 230 V.

Pour un arc série et une tension d'alimentation de 120 V, la norme impose les temps de déclenchement du Tableau 1.4:

Courant d'arc (rms)	5 A	10 A	16 A	32 A
Temps de coupure maximal	1 s	0.4 s	0.28 s	0.14 s

Tableau 1.4. Temps de détection pour une alimentation alternative de 120 V.

Pour les arcs parallèles, le Tableau 1.5 donne les temps de détection en fonction du nombre de demi-cycles où l'arc est apparu pour une fenêtre d'analyse de 0.5 seconde et des tensions d'alimentation comprises entre 120 V et 230 V.

Courant d'arc [1]	75 A	100 A	150 A	200 A	300 A	500 A
N [2]	12	10	8	8	8	8
[1] Courant de ligne avant la production d'un arc électrique dans le circuit.						
[2] N est le nombre de demi-périodes où l'arc est apparu						

Tableau 1.5. Temps de détection pour des arcs parallèles.

1.8.6 Tests exigés par la norme IEC62606

La section 9.9.4.1 de la norme européenne IEC 62606 décrit les essais pour la vérification du bon fonctionnement des dispositifs de détection de type AFDD. Ces essais sont réalisés selon différentes configurations de charges et pour différentes techniques d'amorçage de défaut d'arc.

L'existence de plusieurs charges domestiques avec des signatures semblables à la signature du courant d'arc dangereux (Figure 1.23) rend difficile la discrimination entre les défauts d'arcs dangereux et le fonctionnement normal d'une charge. Le dispositif détecteur doit pouvoir détecter des arcs suivant les charges électriques spécifiées dans la norme et également éviter de fausses détections d'arcs.

D'autre part, pour plusieurs charges connectées en parallèle et lors de la production des arcs dans une des branches, il se produit le masquage de l'arc, qui rend encore plus difficile sa détection. Des essais en régime transitoire et permanent doivent aussi également être réalisés.

Les principales charges imposées par la norme sont :

- CH 01 : Charge résistive.
- CH 02 : Aspirateur : puissance minimale de 1250 W.
- CH 03 : Alimentation à découpage : puissance minimale de 750 W.
- CH 04 : Gradateur à thyristor : puissance minimale de 600 W
- CH 05 : Deux lampes fluorescentes (40 W) connectées en parallèle.
- CH 06 : Outillage à main (perceuse) : puissance minimale de 600 W.
- CH 07 : Deux lampes halogènes de 12V alimentées par un transformateur avec une puissance totale de 300 W.
- CH 08 : Compresseur avec un courant d'appel de 65A.

La norme IEC62606 impose des essais avec l'ensemble de ces charges simples (Figure 1.30) selon les configurations suivantes :

- Test 01 : Régime établi
- Test 02 : Régime transitoire

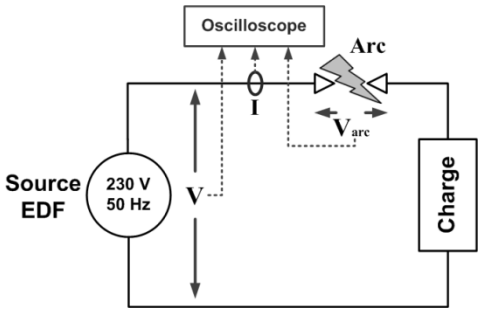


Figure 1.30. Montage expérimental pour les différents tests

La norme impose également des essais en présence de charges de masquage. Ces essais sont décrits dans les tests suivants :

- Test 03 : La Figure 1.31 donne le schéma de principe du branchement des différentes charges. La charge 1 représente une de huit charges domestiques citées précédemment en parallèle avec une résistance (charge 2) placée en série avec un arc.

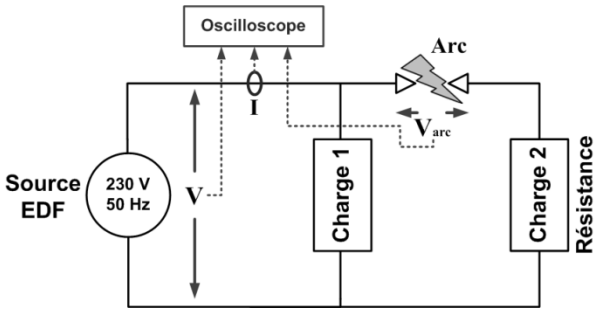


Figure 1.31. Charge de masquage test 03

- Test 04 : Dans cette configuration, la charge 1 est constituée par une résistance de telle sorte que le courant traversant soit égal à 2.5 A. La charge 2 placée en série avec un arc est l'une des huit charges domestiques considérées par la norme (Figure 1.32).

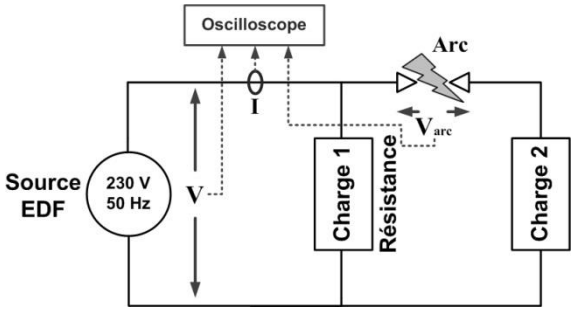


Figure 1.32. Charge de masquage test 04

- Test 05 : Le défaut d'arc électrique série est placé en amont des deux charges connectées en parallèle (Figure 1.33). La charge 1 est l'une des huit charges domestiques et la charge 2 est une résistance parcourue par un courant de 2.5 A.

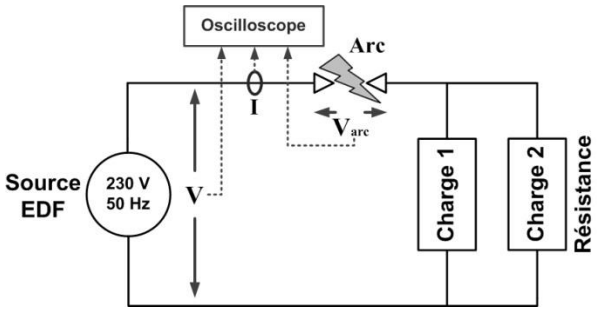


Figure 1.33. Charge de masquage test 05

L'ensemble de ces tests seront mis en œuvre pour tester la fiabilité des méthodes de détection de défauts d'arc développées. Dans le cadre de cette thèse, les essais sont effectués uniquement en régime permanent.

1.9 Génération d'un défaut d'arc électrique

1.9.1 Arc électrique amorcé par surtension

Le dispositif GDARC (Générateur de Défaut d'Arc Reproductible et Calibré) développé par Andrea et al au sein du laboratoire MAE406 - IJL [38] permet de produire des arcs calibrés et reproductibles (en durée et en courant), pour les lequels l'amorçage d'un arc électrique est réalisé par surtension. La surtension générée va modifier les caractéristiques du milieu isolant afin de créer une décharge entre les électrodes. Le schéma de générateur (GDARC) est représenté sur la Figure 1.34. Le générateur comporte deux parties :

- La partie amorçage est constituée par une alimentation continue de 60 V connectée au primaire d'un transformateur haute tension. L'ouverture et la fermeture du circuit primaire sont réalisées par un montage driver contrôlant un transistor de type Mosfet.
- Le secondaire du transformateur haute tension est inséré dans la ligne électrique en série avec l'alimentation alternative AC ou continue DC, la charge de test (Z) et les électrodes.

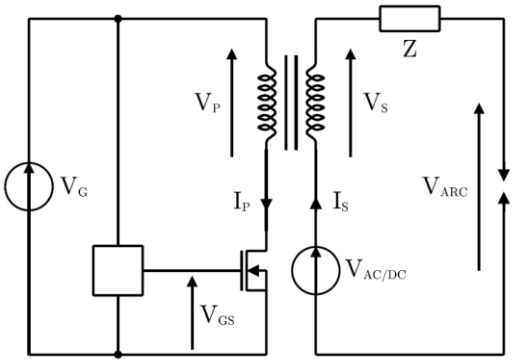


Figure 1.34. Générateur de défaut d'arc par surtension GDARC

Le générateur nous permet de générer les types d'arcs suivants :

- Des arcs électriques maintenus.
- Des arcs électriques durant l'alternance positive ou négative de la sinusoïde AC.

La Figure 1.35 montre la tension et le courant d'arc obtenues entre les électrodes de cuivre. La tension d'alimentation est de 230 V avec une charge résistive de 64 Ω.

Arc durant les alternances positives	Arc durant les alternances négatives	Arc maintenu

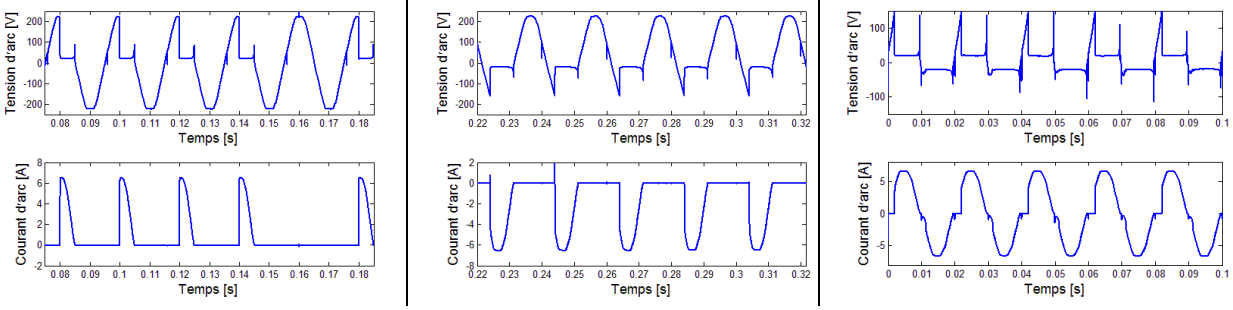


Figure 1.35. Courant et tension d'arc pour différentes configurations

1.9.2 Amorçage par ouverture de contacts

La norme IEC62606 (paragraphe 9.9.2.7) donne la procédure et les matériaux nécessaires à la réalisation des tests de défauts d'arc séries avec un générateur d'arc par ouverture de contacts. Le dispositif de test comprend notamment une électrode fixe et une électrode mobile permettant l'amorçage de l'arc. La séparation des électrodes en charge à une distance appropriée doit favoriser la formation d'un arc électrique. La Figure 1.36 représente le schéma du générateur.

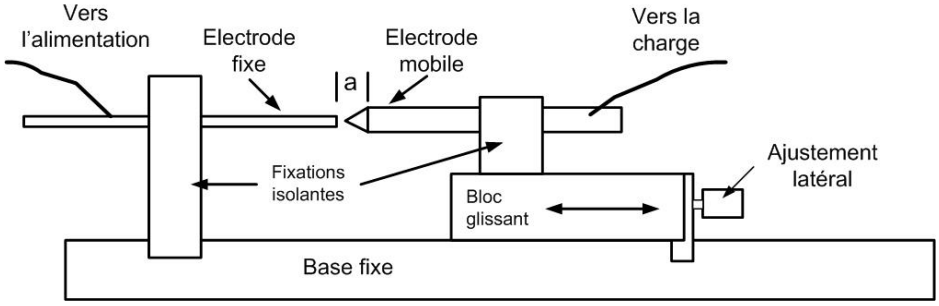


Figure 1.36. Générateur d'arc par rupture de contactes

Selon la norme IEC62606, les caractéristiques des électrodes (Figure 1.37) sont :

- Tige en graphite de 6 +/- 0.5 mm de diamètre.
- Tige en cuivre

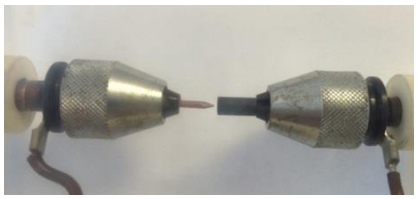


Figure 1.37. Électrodes du générateur de défaut d'arc par ouverture de contacts

Les figures 1.38, 1.39 et 1.40 montrent la tension de ligne, le courant d'arc et la tension d'arc obtenus par ouverture de contacts (distance d'écartement de 0.053 mm) sur une charge résistive de 30 Ω.

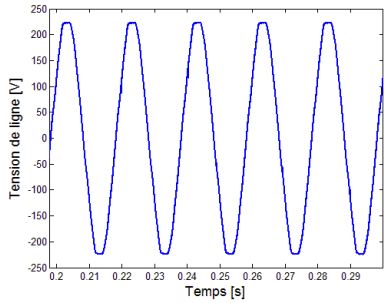


Figure 1.38. Tension de ligne

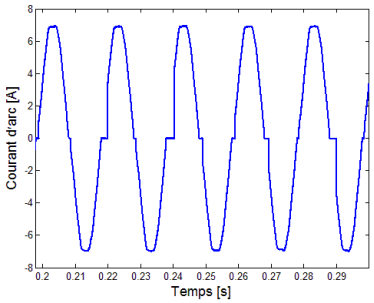


Figure 1.39. Courant d'arc

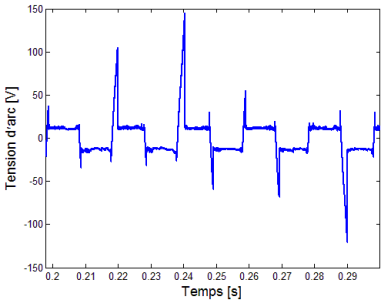


Figure 1.40. Tension d'arc

1.9.3 Test du chemin carboné

Le second test proposé par la norme IEC62606 pour la génération de défaut d'arc correspond au test du chemin carboné. Un arc est amorcé entre deux câbles placés côte à côte, entaillés et entourés d'un ruban en PVC comme le montre la Figure 1.41.

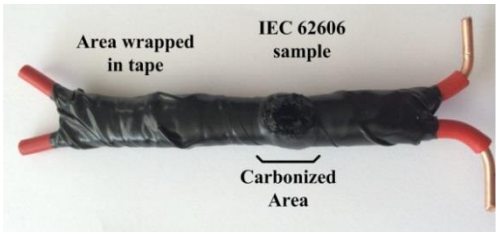


Figure 1.41. Chemin carboné

Selon la norme IEC62606, l'énergie fournie lors de la production d'arc électrique par la technique du chemin carboné est environ 2,5 fois supérieure à celle fournie lors de l'essai par ouverture de contacts. La Figure 1.42 montre le circuit d'essai selon la norme.

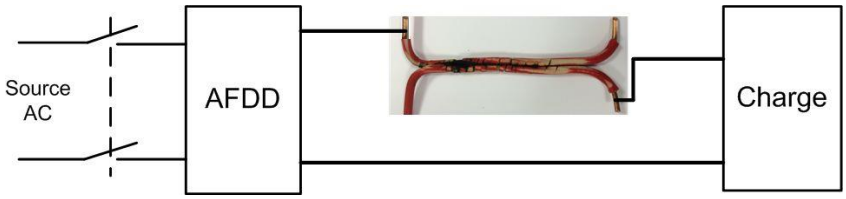


Figure 1.42. Circuit d'essais de défaut d'arc en série

La norme suggère la procédure suivante de préparation des échantillons (câbles conducteurs de section 1,5 mm^2 ou AWG 16):

- Les échantillons de câbles ont une longueur d'au moins 20 cm.
- Les échantillons seront entaillés sur une distance de 50 mm et à une profondeur suffisante sans détériorer les fils de cuivre.
- L'échantillon sera recouvert d'un ruban en PVC puis d'une double couche de ruban en fibre de verre.

Les échantillons de câbles seront ensuite soumis à une haute tension pour créer une voie conductrice carbonisée dans l'isolation. La procédure est la suivante:

- L'échantillon sera exposé à une tension de 7 kV avec un courant de 30 mA pendant un temps maximum de 10 secondes ou un temps inferieur si de la fumée s'échappe de l'échantillon.
- L'échantillon sera exposé à une tension de 2 kV avec un courant de 300 mA pendant un temps maximum de 60 secondes ou un temps inferieur si de la fumée s'échappe de l'échantillon.
- Puis, afin de tester le chemin carboné, l'échantillon sera inséré dans un circuit constitué par une alimentation de 230 V alternative et une charge (lampe incandescence de 100 W ou une résistance) parcourue par un courant de 0.15 A. L'échantillon est considéré comme opérationnel si le courant circule dans le circuit.

Les figures 1.43, 1.44 et 1.45 montrent la tension de ligne, le courant d'arc et la tension d'arc lors d'un essai de génération d'arc par chemin carboné sur une charge résistive (alimentation 230V - 50 Hz).

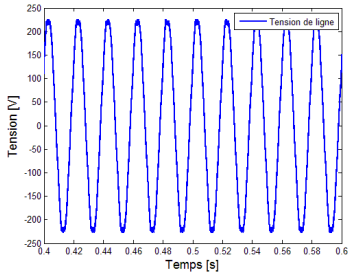


Figure 1.43. Tension de ligne

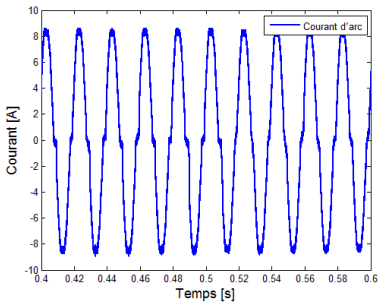


Figure 1.44. Courant d'arc

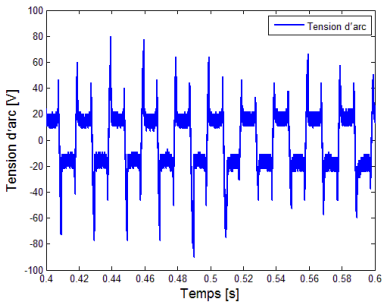


Figure 1.45. Tension d'arc

Nous avons ensuite cherché à comparer les signatures du courant par ouverture de contacts et par chemin carboné.

La Figure 1.46 présente les courants d'arc obtenus grâce aux deux systèmes de génération d'arcs. Pour le test du chemin carboné, la forme d'onde varie de façon plus

significative entre chaque période et une distorsion du signal apparait lors de chaque passage par zéro du courant. Cette forme aléatoire est due aux effets résistifs et inductifs du chemin carboné dans le câble lors de l'amorçage de l'arc. Pour le test par ouverture de contacts, on observe une variation franche du courant (conduction du courant dès le moment où la tension atteint la tension de claquage d'arc).

La Figure 1.47 présente les tensions d'arcs. Celle obtenue pour un chemin carboné a une valeur plus élevée et moins stable par rapport à celle obtenue lors du test par ouverture de contacts.

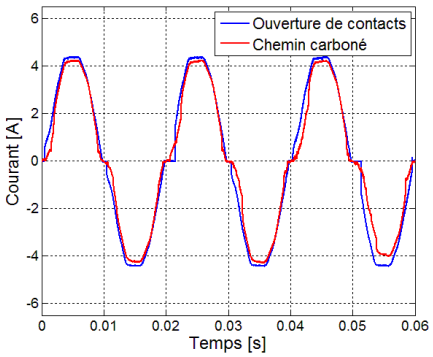


Figure 1.46. Courant d'arc

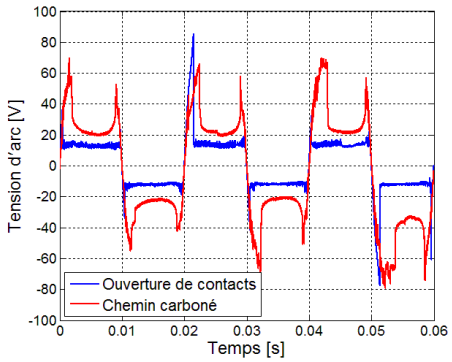


Figure 1.47. Tension d'arc

La Figure 1.48 présente l'évolution de l'énergie produite par l'arc sur 3 demi-périodes lors des deux tests sur charge résistive (80 Ω). On observe que la valeur de l'énergie pour le test du chemin carboné est quasiment deux fois supérieure à celle produite par ouverture de contacts conformément à l'indication de la norme IEC62606.

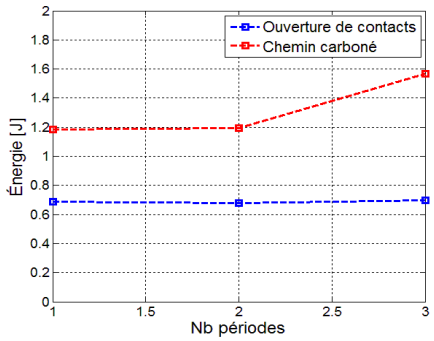


Figure 1.48. Énergie de l'arc

1.9.4 Système de génération d'arc parallèle

La guillotine est le dispositif de test imposé par la norme IEC62606 pour la génération de défauts d'arcs parallèles (Figure 1.49).

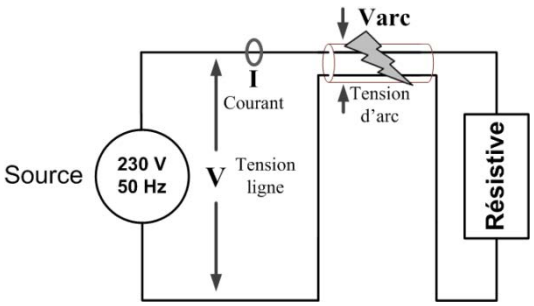


Figure 1.49. Circuit pour la génération d'un défaut d'arc parallèle

La Figure 1.50 montre la guillotine réalisée au laboratoire. Elle se compose d'une lame en acier fixée à un levier afin de maintenir un angle de coupe permettant de sectionner en partie le premier conducteur ; le contact avec le deuxième conducteur permet l'apparition d'un arc électrique. La norme impose que l'échantillon de test doit être composé par deux conducteurs de 1.2 m de longueur maximum, recouverts d'un ruban adhésif. Le courant d'arc est ajusté avec l'impédance de charge Z variable, selon la Figure 1.51.

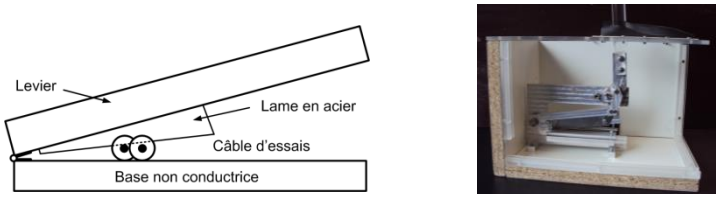


Figure 1.50. Test de la guillotine

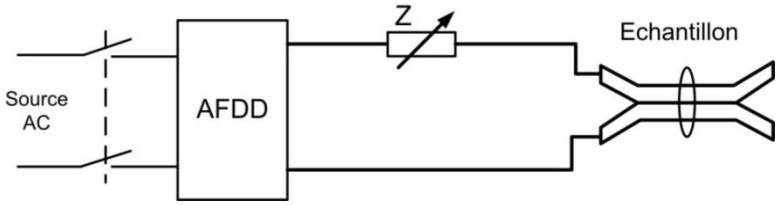


Figure 1.51. Circuit d'essai pour la production de défauts d'arcs parallèles

Les figures 1.52 et 1.53 montrent la tension de ligne et le courant d'arc obtenus lors d'un arc parallèle.

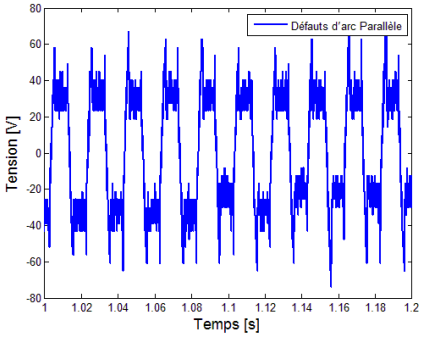


Figure 1.52. Tension de ligne pour un arc parallèle

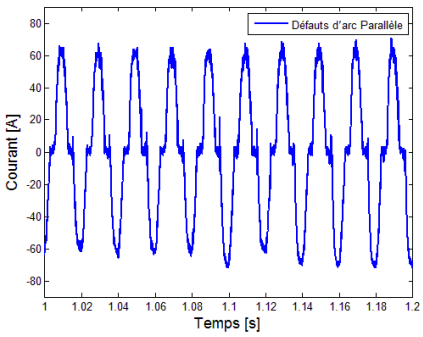


Figure 1.53. Courant de ligne pour un arc parallèle

Lors de l'apparition d'un arc parallèle, la tension de ligne sinusoïdale devient un signal quasiment carré comme le représente la Figure 1.52. De plus, le courant de ligne augmente

fortement. La détection d'un arc parallèle est facilement réalisable par un système de disjonction classique. Nous nous focaliserons dans la suite de ce travail sur la détection des arcs série.

1.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un résumé des problématiques principales de la détection de défauts d'arcs pour un système électrique domestique alternatif en basse tension.

Le disjoncteur AFDD (Arc Fault Detector Device) permettant de détecter la présence d'arcs est utilisé dans une ligne électrique 230V – 50Hz (en Europe), et l'AFCI (Arc Fault Circuit Interrupter) sous un système 120V – 60Hz (aux États unis).

Pour le choix des différents tests de détection et configurations de circuit dans la phase de mise au point d'un détecteur, nous nous sommes basés sur les indications données par la norme IEC62606. Nous avons retenu huit charges domestiques différentes (aspirateur, gradateur, lampe halogène, perceuse, compresseur, résistance, lampe fluorescente). Ces tests en présence de défauts d'arcs seront effectués pour les deux configurations suivantes : charges simples et charges de masquage. Dans ce travail de thèse, nous nous sommes focalisés principalement sur la détection de la présence d'arcs en régime permanent.

Trois façons de générer arcs ont été présentées : par surtension, par rupture de contacts entre deux électrodes et par création d'un chemin carboné dans un câble. Bien plus énergétique, le test du chemin carboné a été retenu pour l'ensemble des tests de production de défauts d'arcs en présence des charges domestiques.

Un autre critère à respecter selon la norme IEC62606 sera le temps de détection pouvant varier entre une seconde maximum pour un arc série d'une valeur de courant de 2.5 A et 0.12 seconde pour un arc de 32A.

Chapitre 2

2 Modélisation d'un réseau électrique

2.1 Introduction

La mise au point de détecteurs d'arcs basés le plus souvent sur la signature électrique du courant et de la tension de ligne, nécessite une base de signaux de tests importants reproduisant un grand nombre de situations différentes du nombre et du type de charges sur le réseau (charges simples, charges combinées, arc parallèle et série). Les essais sont reproduits pour plusieurs cas différents (selon la norme IEC62606) avec l'acquisition des grandeurs du courant et de la tension de ligne.

Afin de nous affranchir de ces essais souvent longs et parfois difficiles à mettre en œuvre, nous présentons dans ce travail notre approche reposant sur la mise en place d'une interface de simulation d'un réseau électrique domestique paramétrable.

L'objectif de cette modélisation est :

- D'obtenir les signatures électriques tension et courant unique et propre à chaque appareil.
- De tester et évaluer les algorithmes de détection pour plusieurs charges et plusieurs combinaisons de charges.
- De pouvoir effectuer des variations et connaitre leurs influences sur le réseau et sur les algorithmes de détection.

Les principales modélisations réalisées portent sur des charges domestiques : le réseau d'alimentation, les câbles, l'arc électrique et le bloc pour le test des algorithmes. Il est alors possible d'assembler ces blocs à souhait afin de constituer un réseau électrique virtuel que nous cherchons à étudier.

Ce réseau électrique domestique virtuel doit permettre de reproduire un grand nombre de tests dans différentes situations à la fois dans différentes combinaisons des charges sur la ligne (charges simples et combinées) et aussi lorsqu'un défaut d'arc se produit dans le réseau.

Le choix du logiciel de simulation de l'ensemble du réseau virtuel est primordial. Bien que l'ensemble des charges d'un réseau domestique soit principalement électrique (incluant des dispositifs de puissance), d'autres charges peuvent nécessiter la modélisation de dispositifs électromécaniques ou mécaniques. La plateforme de simulation doit également permettre la simulation mixte faisant cohabiter le système numérique de détection avec le réseau domestique modélisé.

L'ensemble de ces considérations nous a amené à choisir Matlab/Simulink comme plateforme de simulation.

Les outils de Matlab / Simulink fournissent une interface graphique pour le design et l'implémentation de modèles de dispositifs basés sur leurs principes physiques, électriques ou mécaniques. SimPowerSystems toolbox fournit des outils et librairies de composants pour la modélisation et la simulation de systèmes comportant de l'électronique de puissance. Un autre

avantage est la possibilité d'intégrer dans le réseau virtuel des charges modélisées avec d'autres logiciels (Pspice, Psim, ….).

Le réseau virtuel (Figure 2.1) est constitué d'une source d'alimentation générale modélisée sous SimPowerSystems en parallèle avec les charges domestiques modélisées sous Simulink, SimPowerSystems ou une combinaison des deux toolbox : Simulink et SimPowerSystems.

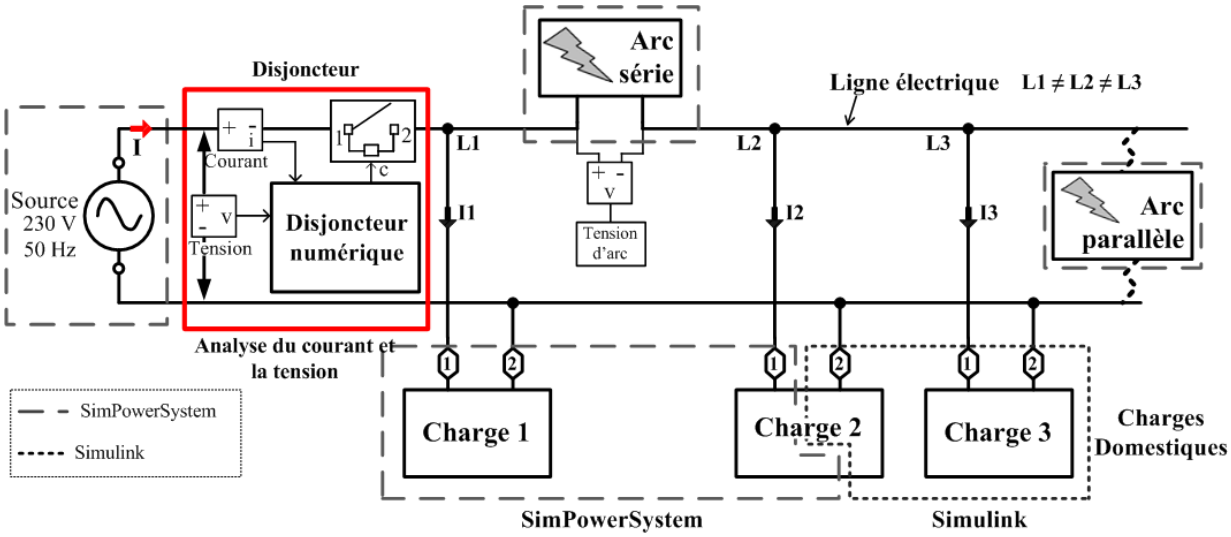


Figure 2.1. Réseau domestique virtuel

Dans la littérature, les principales modélisations portent sur des charges linéaires et non linéaires largement utilisées pour des applications domestiques. Plusieurs modèles de charges domestiques et industrielles ont été développés telles que l'ordinateur [39, 40], la lampe fluorescente [40-42], les variateurs de vitesse réglable [40], le moteur universel [43-45]. Ces modèles ont été développés sous différentes plateformes comme par exemple Matlab – Simulink, des logiciels utilisant les éléments finis, des logiciels de calcul mathématique etc… Les modèles de la littérature ont différents objectifs comme par exemple :

- Les modèles qui s'intéressent seulement à la réponse du système,
- Les modèles qui décrivent le comportement physique et mathématique de la charge,
- Les modèles qui font une évaluation théorique pour l'amélioration de l'efficience ou de certains paramètres du système,
- Les modèles qui font une analyse des harmoniques du courant de la charge.

Toutefois, dans la modélisation nous nous intéressons de manière plus importante à la consommation électrique (le courant et la tension de ligne).

Les résultats de ces modèles seront validés par comparaison entre le signal du courant enregistré (courant mesuré) et le signal obtenu lors de la simulation (courant simulé). Deux critères de comparaison pour la validation seront utilisés : d'une part l'évaluation de la réponse fréquentielle, une analyse des harmoniques sera effectuée avec le taux de distorsion harmonique et d'autre part l'évaluation de la réponse temporelle, l'évaluation de la similarité entre la forme d'onde des courants mesuré et simulé avec l'indice de confiance (index of agreement [46]).

Les résultats de la simulation, signaux de courant et tension, seront utilisés pour le test et les évaluations des méthodes de détection sous la plateforme Matlab – Simulink.

2.2 Classification des charges domestiques

Liang [47] définit la signature de charge comme le comportement électrique d'un appareil quand il est en fonctionnement. Chaque dispositif possède des caractéristiques propres en fonction de sa consommation (courant et tension). Donc, le courant peut prendre différentes formes d'onde.

La Figure 2.2 montre un appartement typique composé de différents appareils domestiques placés sur un ou plusieurs circuits électriques.

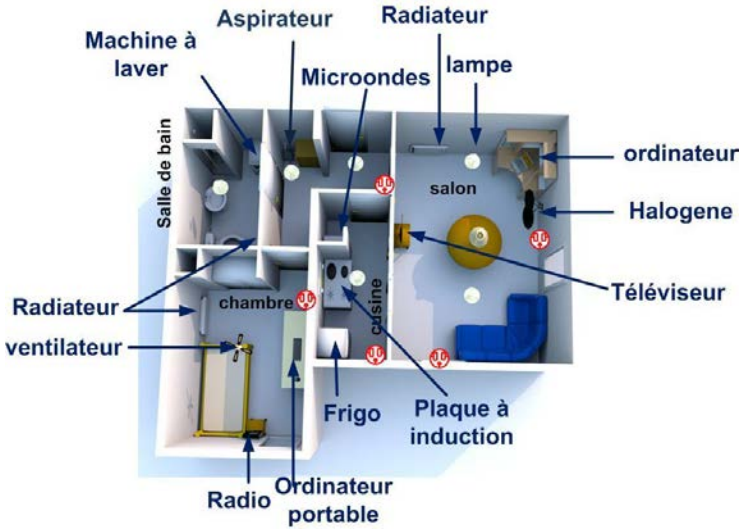


Figure 2.2. Appartement typique

Les charges domestiques peuvent être classifiées en différents groupes selon différents critères tels que:

- La consommation en puissance, la composition interne [47-49],
- La signature du courant [47, 50, 51],
- La forme de la trajectoire courant - tension (I-V) [48],
- Le comportement électrique [52], etc…

La classification présentée par H.H. Ting et al [48] prend en compte le comportement électrique de la charge. Quatre groupes différents peuvent être distingués (Figure 2.3) :

- Charge résistive (bouilloire, radiateur, fer à repasser…) : Ces charges ne consomment que de la puissance active et présentent un régime transitoire court.
- Charge inductive : Ballast pour une lampe fluorescente,…
- Charge de type redresseur (ordinateur, ordinateur portable, gradateur, ampoule à économie d'énergie,…) : Ce groupe est constitué de dispositifs à faible consommation d'énergie composé principalement par une alimentation à découpage. Ces types de charges présentent une grande quantité d'harmoniques en régime établi et courant important au démarrage.
- Charge de type moteur (aspirateur, perceuse, robot ménager,…) : Ces dispositifs comportant un moteur électrique possèdent un fort courant de démarrage dont

l'enveloppe décroit lentement jusqu'à un état d'équilibre. La valeur du courant du moteur dépend de la charge (couple) du moteur et aussi de sa vitesse.

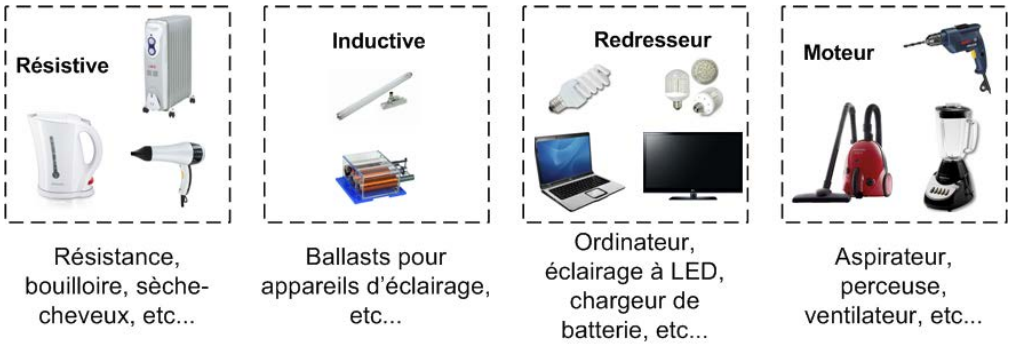


Figure 2.3. Classification des charges selon Ting [48]

2.3 Configurations étudiées et paramètres de validation

La Figure 2.4 montre la composition d'un réseau électrique dans le cas de plusieurs charges en parallèle. Trois types de configuration de charges peuvent être différenciés :

- Charge simple
- Charges combinée
- Charge de masquage : la charge en série avec un défaut d'arc.

Dans le cas de la modélisation d'une charge simple, les différents blocs qui composent le réseau électrique seront modélisés.

- La source de tension EDF 230 Volts, 50 hertz
- Le câble de distribution,
- Les différentes charges électriques d'un appartement typique ;
  - Charge résistive et charge inductive,
  - Charge de type redresseur,
  - Charge de type moteur.
- Défaut d'arc électrique,
- Disjoncteur numérique pour le test des méthodes de détection.

Les différentes méthodes de détection d'arc qui seront présentées dans le chapitre suivant, portent le plus souvent sur une analyse soit fréquentielle ou soit temporelle du courant d'arc. Les modèles mis au point doivent donc avoir un contenu spectral et une forme temporelle très proche des signaux réels mesurés. Afin de vérifier le degré de similitude des caractéristiques temporelles (forme de courant) et fréquentielles, deux critères sont évalués :

- Taux de distorsion harmonique (THD).
- Indice de confiance (Index of agreement) [46].

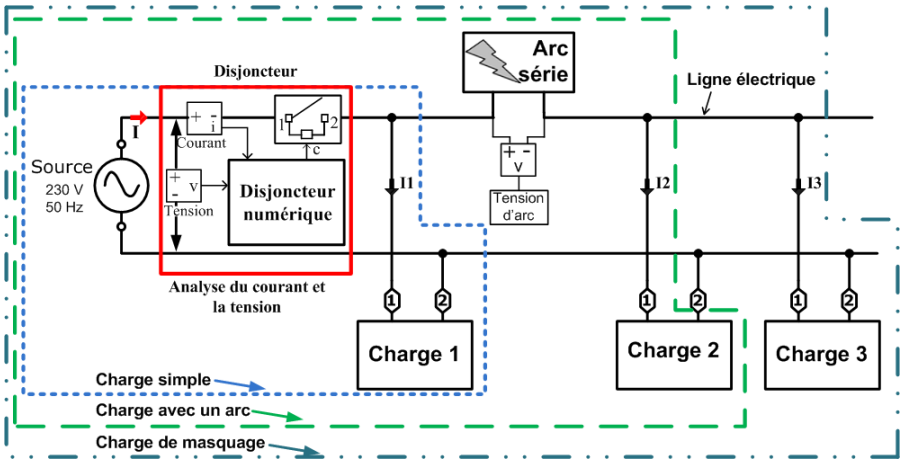


Figure 2.4. Configuration des circuits

2.3.1 Le taux de distorsion harmonique (THD)

Les courants harmoniques sont générés par les charges non linéaires qui sont alimentées par une tension sinusoïdale. Ils ont des fréquences qui sont multiples de la fréquence fondamentale, soit 100, 150, 200, 250, 300… n*50 (fondamentale) Hz.

Les harmoniques sont produites par de nombreux appareils domestiques tels que ordinateur, lampe d'éclairage, variateur de vitesse, appareils électroniques, onduleur, etc.

Le taux de distorsion harmonique « THD Total Harmonic Distorsion » est défini comme le rapport entre les valeurs efficaces ou rms (root mean square) de l'amplitude des harmoniques et l'amplitude de la composante fondamentale. Ce coefficient mesure la qualité de la forme d'onde d'une signature et caractérise également le niveau de pollution du réseau. Le THD obtenu par l'équation ci-dessous va permettre de vérifier le bon comportement fréquentiel du modèle par rapport à une charge réelle.

$$\mathrm{THD\%} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2,3,4\ldots}^{\infty} h_n^2}}{h_1} \mathrm{x100\%} \qquad (1)$$

Où :

- h_n représente les harmoniques (de range 2 à n)
- h_1 représente la composante fondamentale.

2.3.2 Indice de confiance (Index of agreement « d »)

Willmott [46] a proposé un paramètre pour la validation temporelle de modèles dans le domaine de la géologie qui prend en compte comme variables les valeurs observées (O) (mesurées) et les valeurs prédites (P) (simulées).

Ce paramètre statistique fournit une valeur qui indique le degré de ressemblance temporelle de la forme d'onde entre le signal mesuré et le signal simulé. Il prend en compte le degré dans laquelle la variable observée est estimée avec précision par la variable simulée.

L'indice de confiance (index of agreement) « d » est une mesure standard dont la valeur varie entre 0.0 et 1.0. Une valeur de « d » égale à 1.0 indique une parfaite concordance entre la valeur observée et la valeur simulée et de « d » égale à 0.0 dans le cas contraire. Le calcul de l'indice de confiance est réalisé en utilisant la formule suivante :

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}[|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|]^2} * 100\% \qquad (2)$$

Où :

- P est la variable simulée,
- O est la variable observée (mesurée)

La Figure 2.5 montre le courant mesuré et simulé pour une charge domestique de type aspirateur.

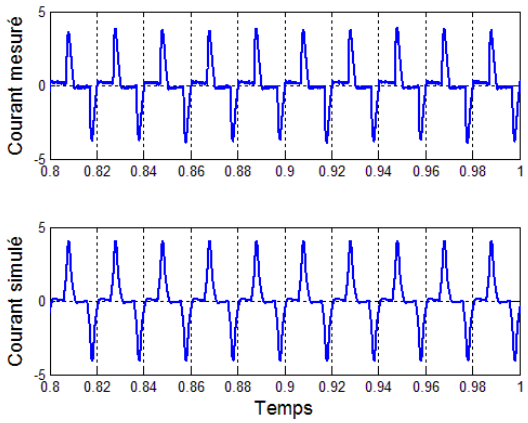


Figure 2.5. Signatures du courant mesuré et simulé pour un aspirateur

La Figure 2.6 montre l'évolution des résultats du calcul de la valeur « d » (courbe rouge) entre le courant mesuré et simulé de la Figure 2.5. Le calcul est effectué pour chaque demi-période sur un nombre total de 230 demi-périodes.

L'indice de confiance donne une valeur très proche de la valeur idéale, ce paramètre est plus stable aux variations des signaux pour chaque demi-période.

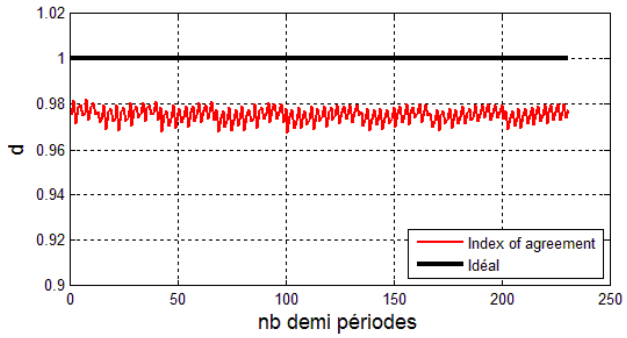


Figure 2.6. Indice de confiance

2.4 Modélisation d'un arc électrique alternatif

Quelques auteurs ont proposé différents modèles Haute Impédance HIF (high impedance fault) pour représenter un défaut d'arc en courant alternatif (chapitre 1.7.2). Ce modèle prend en compte la tension d'arc pour chaque demi-période [20, 27-31, 53]

Nous nous basons dans ce travail sur le modèle de Zaman [28, 29] en ajoutant un interrupteur d'ouverture et fermeture pour générer la tension d'amorçage de l'arc. Lorsque la tension atteint la tension d'amorçage (Vr), l'interrupteur est fermé donc le courant circule à travers l'une des diodes (en fonction de la polarité de la tension positive ou négative). L'interrupteur est ouvert à chaque passage par zéro du courant.

La Figure 2.7 montre le circuit électrique du modèle d'arc développé sous Matlab Simulink – SimPowerSystems.

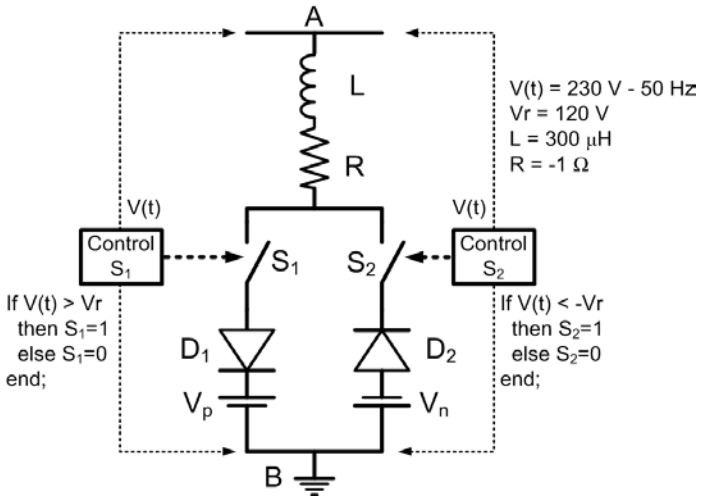


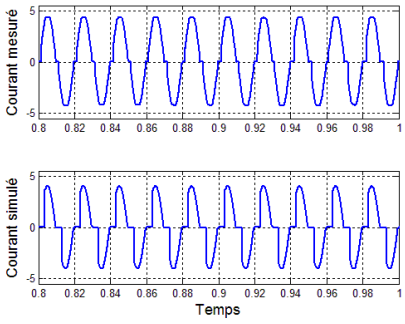
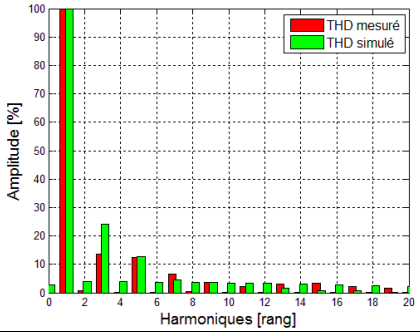
Figure 2.7. Modèle de défaut d'arc électrique

Un défaut d'arc série est généré en utilisant le chemin carboné selon la norme IEC62606 [2], dans un circuit alimenté sous 230 V, fréquence 50 Hz sur une résistance de 69 Ω (Le résultat est montré dans le Tableau 2.1).

Les tensions d'arc V_n et V_p (Figure 2.7) sont fixés à 25 Volts. La tension de réamorçage (Vr) peut être réglée différemment suivant l'alternance positive ou négative. Dans notre cas elle est fixée à 120 V max.

Le Tableau 2.1 montre les résultats de mesure et simulation pour une charge résistive de 48 Ω. Les deux signatures du courant présentent une grande similitude comme le confirme la valeur obtenue par d supérieure à 85%.

Les résultats montrent également que le contenu harmonique des signaux mesuré et simulé sont du même ordre (THD mesuré = 20.7 % et THD simulé = 30.1 %).

Courant	Harmoniques
	

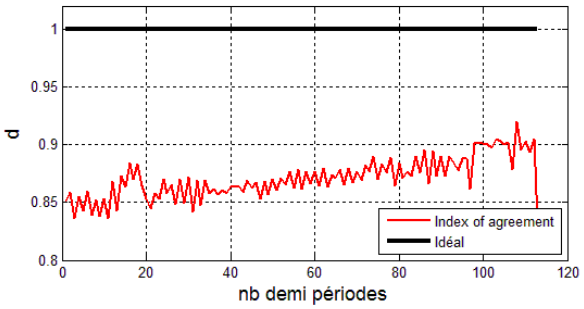


Tableau 2.1. Comparaison des résultats simulés et mesurés

Dans les deux cas, les amplitudes des harmoniques de rang 1, 3 et 5 sont majoritaires. Les harmoniques pairs sont très faibles, aussi bien pour le signal mesuré et pour celui modélisé. Dans la modélisation, le signal de courant étant parfaitement symétrique, les harmoniques paires sont quasiment nulles.

Les différences entre modèle et mesure sont dues au comportement chaotique de la signature de l'arc lequel n'est pas pris en compte dans ce modèle.

2.5 Modèle de la source de tension

En Europe, la tension électrique alternative est fixée à 230 V (+/-10%) et une fréquence de 50 Hz.

Selon la norme électrique européenne IEC 61000-3-2, le taux de distorsion harmonique (THD) de la source de tension doit être inférieur à 8%. Cette norme fournit également les valeurs maximales des harmoniques du 2ème jusqu'à 40ème ordre. Le modèle de la source de tension EDF [54] va prendre en compte les premiers 21 harmoniques parce que les valeurs supérieures à l'ordre 21 sont très faibles.

La tension v(t) fournie par le modèle d'alimentation AC correspond à l'équation ci-dessous :

$$v(t) = 230 * \sqrt{2} * A\left[\sin(2\pi f_0 t) + \sum_{2}^{k} a_k * \sin(2\pi k f_0 t)\right] \qquad (3)$$

Où :

- A : représente la plage de fluctuation de la tension ±2.0%, sa valeur est comprise entre 0.98 et 1.02 selon la norme IEC 61000-3-2 annexe A [55].
- f_0 : est la fréquence fondamentale,
- a_k : sont les valeurs correspondant aux harmoniques d'ordres 2 à 21.

La Figure 2.8 montre la tension modélisée pour une valeur de THD égale à 8%.

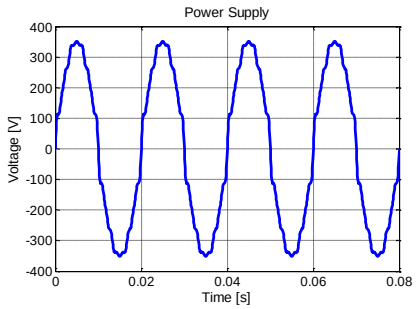


Figure 2.8. Tension d'alimentation avec un THD égale à 8%

La Figure 2.9 montre le modèle de la source de tension EDF développée sous Matlab – Simulink avec trois valeurs de tension : une valeur fixe nominale et deux valeurs (+10% et -10% de la valeur nominale), afin de représenter les possibles variations de tension dans une ligne électrique.

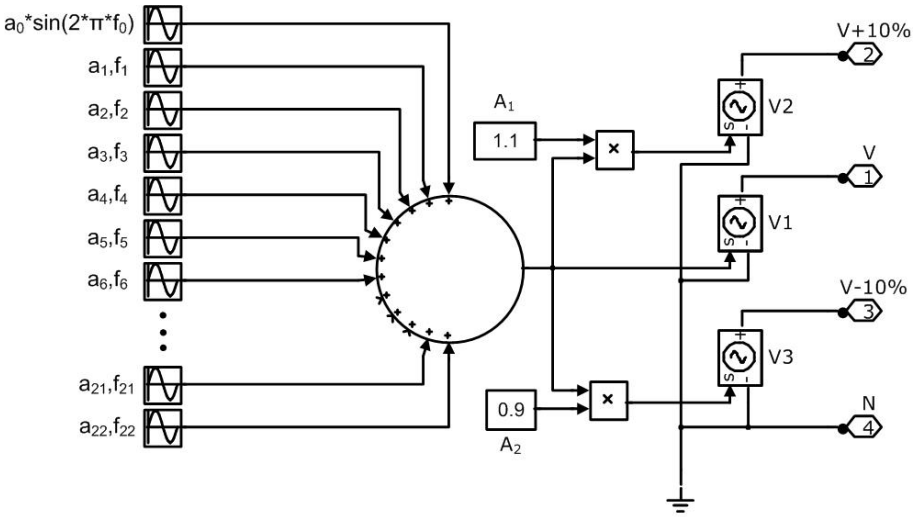


Figure 2.9. Modèle de la source EDF sous Matlab/Simulink

2.6 Modélisation de charges domestiques

Certains auteurs ont développé des modèles de charges domestiques. Venkatesh [40] a présenté différents modèles de charges non-linéaires : alimentation à découpage pour un ordinateur, lampe fluorescente et ASD (ajustable speed drives). Les modèles ont été validés par comparaison entre les harmoniques des courants mesuré et simulé. Cependant, la forme d'onde et les harmoniques du courant simulés n'ont pas les mêmes caractéristiques que le signal du courant mesuré.

Rao [41] présente les modèles de différentes charges domestiques : télévision, écran PC et chargeur de batterie. Ces modèles sont basés sur une alimentation à découpage. Cet article présente une analyse d'harmonique du courant acquis. Mais il ne montre pas obligatoirement les signatures des courants simulés.

Loo [42] propose un modèle de lampe fluorescente avec un ballast électronique ; les caractéristiques physiques sont prises en compte pour élaborer le modèle de la lampe basé sur la conductance. Ribarich [56] a aussi proposé un modèle de lampe fluorescente basé sur les caractéristiques non linéaires de sa résistance en haute fréquence.

D'autres modèles comme l'aspirateur et la perceuse sont basés sur l'utilisation du modèle de base d'un moteur universel. Di Gerlando et al [44, 45] ont présenté le modèle d'un moteur universel, qui prend en compte les influences de saturation des inductances, le couple ainsi que la régulation de puissance du moteur.

Tuncay [43] présente un modèle de moteur universel pour un aspirateur pour lequel il utilise la simulation par éléments finis basé sur les équations caractéristiques d'un circuit équivalent (partie électrique et mécanique).

2.6.1 Modélisation des charges résistive et inductive

Pour la charge linéaire (résistive), la valeur de courant est directement proportionnelle à la tension. La caractéristique principale de ce type de charge est de ne pas présenter d'harmoniques.

Les modèles pour ces charges seront implémentés avec une résistance proportionnelle à la valeur de consommation de puissance de l'appareil.

Une charge inductive (transformateur, lampes fluorescentes avec un ballast magnétique) se caractérise en plus par le déphasage présent entre la tension et le courant.

2.6.2 Modélisation d'une lampe fluorescente avec ballast électromagnétique.

Une charge de ce type est normalement constituée par un ballast électromagnétique, la lampe fluorescente et un starter [42, 57-59]. La Figure 2.10 montre la représentation du circuit électrique d'une lampe et son ballast magnétique.

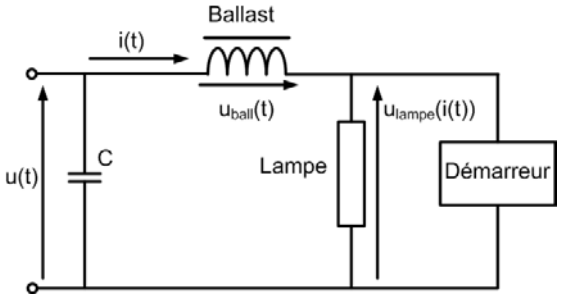


Figure 2.10. Circuit électrique typique pour une lampe fluorescente avec un ballast magnétique

Parmi l'ensemble des modèles de lampes présentés dans la littérature, Koprnicky [57] a mené des études en prenant en compte la composition chimique du gaz et des électrodes. Donc, une lampe fluorescente (Figure 2.11) est composée par [42, 57-59] :

- Une enceinte de verre recouverte de phosphores et contenant le gaz de remplissage.
- Des électrodes qui vont relier la lampe au circuit extérieur.

Les électrons émis par la cathode sont accélérés par le champ électrique auxquels ils sont soumis et vont effectuer des collisions au sein d'un mélange gazeux constitué de mercure et de gaz rares. Ils vont exciter les atomes de mercure qui vont émettre un rayonnement dans l'ultra-violet. Par la suite le rayonnement UV émis sera converti en rayonnement visible par le biais du revêtement de phosphore recouvrant la paroi interne du tube à décharge.

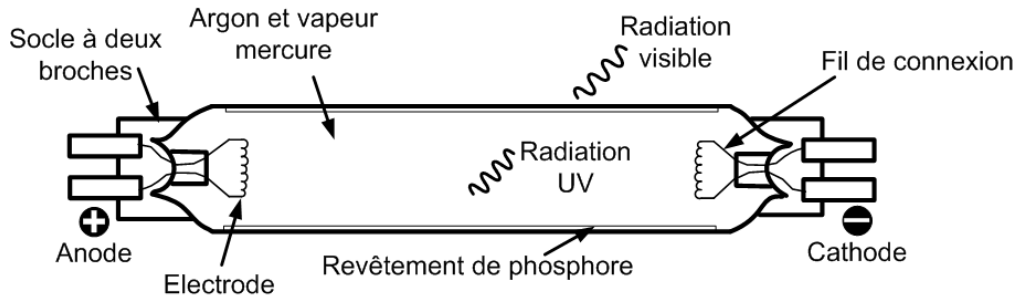


Figure 2.11. Lampe fluorescente

Le modèle de la lampe est décrit par l'équation suivante [57] :

$$u_{lamp}(t) = \frac{i_{lamp}(t)}{G(t)} \qquad (4)$$

Où G(t) est décrit par l'équation suivante (pour le cas d'une lampe fluorescente d'une puissance de 58W [57]):

$$\frac{dG(t)}{dt} = a_2(i(t))^2 - [b_2 G^2(t) + b_1 G(t)] \qquad (5)$$

Où : $a_2 = 67$; $b_1 = 1x10^3$; $b_2 = 6.3x10^5$;

Pour provoquer une décharge dans une enceinte gazeuse, il faut appliquer au gaz une surtension suffisante pour initialiser une avalanche électronique qui va permettre de rendre le milieu conducteur. Cette opération est réalisée par un ballast qui est construit par composant passif (résistance et inductance) ou par semi-conducteurs (ballast électronique).

Cette surtension est directement appliquée aux bornes du tube, et la décharge s'amorce si les électrodes sont suffisamment chaudes. Une fois amorcée, l'inductance limite le courant de décharge à son niveau nominal. Le facteur de puissance de l'ensemble est contrôlé par un condensateur.

Dans le marché, on trouve traditionnellement deux types de ballast :

- Le ballast ferromagnétique (passif) qui fonctionne à la fréquence du réseau (50 Hz ou 60 Hz).
- Le ballast électronique (actif) qui fonctionne à des fréquences plus élevées (20 kHz - 50 kHz).

Les fonctions principales d'un ballast sont :

- Amorcer la décharge de la lampe.
- Ré allumer la lampe pour chaque demi – cycle.

Le modèle du système (lampe et ballast) est décrit par l'équation suivante [57] :

$$u(t) = R_{ball}i(t) + L_{ball}\frac{di(t)}{dt} + u_{lamp}(t) \qquad (6)$$

La Figure 2.12 représente le diagramme du modèle sous Matlab/ Simulink.

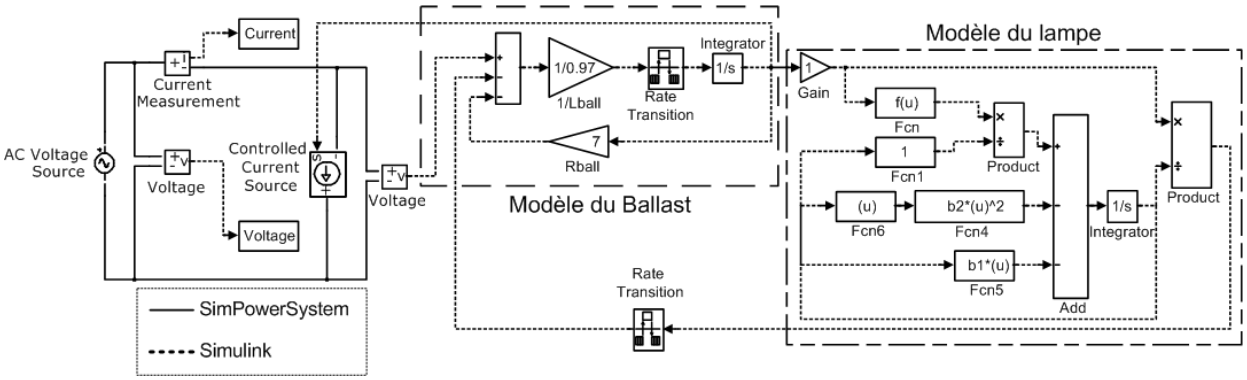
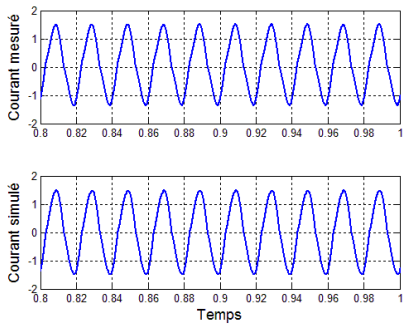
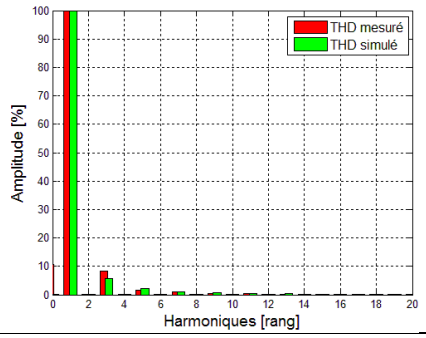


Figure 2.12. Modèle de la lampe fluorescent.

D'après les résultats présentés dans le Tableau 2.2, les signatures des courants mesurés et simulés ont une bonne concordance (d = 98.2%).

Courant	Harmoniques
	

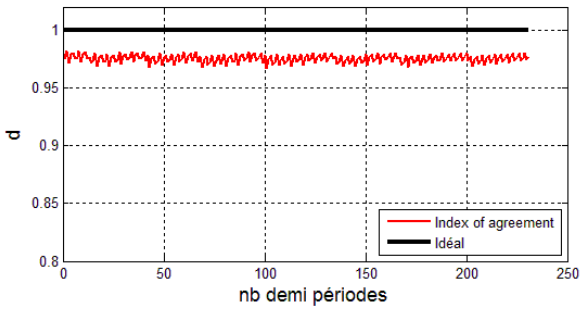


Tableau 2.2. Comparaison des résultats simulés et mesurés

Le calcul de la distorsion globale donne des valeurs très proches (THD mesuré = 8.6 % et THD simulé = 6.3 %). L'amplitude des harmoniques d'ordre 3 et 5 des signaux mesuré et simulé sont légèrement différentes (moins de 2% d'écart). Les harmoniques d'ordre pair sont négligeables.

2.7 Modélisation d'un moteur

2.7.1 Description d'un moteur universel

Dans la majorité des cas, les charges domestiques telles que perceuse, aspirateur, machine à laver, mixer, etc. contiennent un moteur universel (UM) appelé également moteur série. Pour ce type de moteur, l'enroulement d'excitation est connecté en série avec l'enroulement du rotor [43-45, 60].

Ce type de moteur peut travailler aussi bien avec un courant alternatif (AC) ou un courant continu (DC). La tension de travail varie entre 32 et 250 volts avec une fréquence évoluant entre 0 et 60 Hz. La vitesse d'un moteur universel peut-être très élevée, typiquement dans une plage entre 5000 et 20 000 tours par minute. La vitesse dépend du couple de la charge et de la tension d'entrée. Un couple de valeur nulle entraîne des valeurs de vitesse inhabituelles.

Les composants du moteur universel sont le stator et le rotor connectés en série (Figure 2.13).

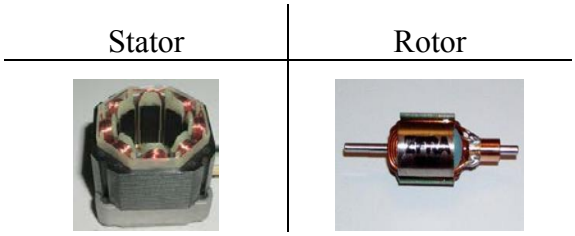


Figure 2.13. Stator et rotor du moteur

- **Stator :** L'enroulement du stator produit le flux de magnétisation (Figure 2.13).
- **Rotor :** Le courant dans l'enroulement du rotor produit le couple électromagnétique lors de l'interaction avec le flux de magnétisation. Le courant dans l'enroulement d'induit est alimenté par un système de brosses collectrices (Figure 2.13).

La Figure 2.14 montre le circuit équivalent d'un moteur universel. À partir de ce circuit, nous pouvons déduire deux équations eq.(7) et eq.(11) qui gouvernent le comportement du moteur universel. La première est relative à la partie électrique et la seconde concerne la partie mécanique et les équations du couple.

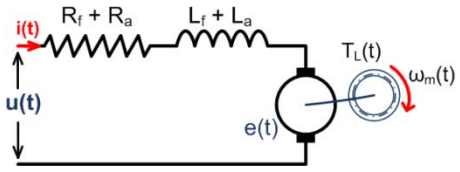


Figure 2.14. Circuit équivalent d'un moteur universel

Où :

- R_a : la résistance de l'enroulement du rotor.
- R_f : La résistance de l'enroulement du stator.
- L_a : L'inductance de l'enroulement du rotor.
- L_f : L'inductance de l'enroulement du stator.
- e(t) : Force contre électromotrice.
- i(t) : Courant
- T_L : Couple de charge.
- $\omega_m(t)$: vitesse angulaire.
- u(t) : Tension d'entrée.

- **Partie électrique.**

Appliquant la loi de Kirchhoff à partir du circuit équivalent de la Figure 2.14, il est possible d'obtenir l'équation ci-dessous:

$$u(t) - \left(L_a + L_f\right)\frac{d}{dt}i(t) - e(t) = \left(R_a + R_f\right)i(t) \qquad (7)$$

La force contre-électromotrice e(t) est induite dans les N spires de l'enroulement du rotor et dépend de la vitesse angulaire. Elle est calculée à partir des équations (8) et (9):

$$e = \frac{N}{a}\frac{p}{\pi c}\omega_m\psi_n = K_a\omega_m\psi_n \ [V] \qquad (8)$$

$$e = K_aK_\psi\omega_mI_a \ [V] \qquad (9)$$

Où :

- K_ψ : Constante de flux.
- K_a : Constante du rotor.
- I_a : Courant.
- ω_m: vitesse angulaire.

L'équation 7 devient :

$$u(t) - \left(L_a + L_f\right)\frac{d}{dt}i(t) - \omega_m(t) * K_aK_\psi * i(t) = \left(R_a + R_f\right)i(t) \qquad (10)$$

- **Partie mécanique.**

Le comportement mécanique du moteur est décrit dans l'équation suivante.

$$T_e(t) = T_L + D.\omega_m(t) + J\frac{d}{dt}\omega_m(t) \quad (11)$$

Où :

- $T_e(t)$: Couple électromagnétique.
- D : Constante de friction.
- T_L : couple de la charge
- J : moment d'inertie

Selon Grop [61] le couple électromagnétique total devient :

$$T_e = \frac{Np}{\pi ac} I_a \psi_n = K_a I_a \psi_n \quad (12)$$

Comme le flux ψ_n est directement proportionnel au courant. L'équation du couple électromagnétique peut-être représentée par :

$$T_e = K_a K_\psi I_a^2 \quad (13)$$

Où: K_a et K_ψ sont constantes.

2.7.2 Modélisation d'un appareil électrique contenant un moteur universel

Le modèle de la littérature du moteur universel repose généralement sur les deux blocs principaux que sont la partie électrique et la partie mécanique.

Afin d'améliorer les performances de la modélisation nous avons choisi de prendre en compte :

- Les variations du courant en fonction de celles du couple électromagnétique (couple de la charge) [43-45, 54] et donc du courant consommé par l'appareil.
- Les variations de puissance disponibles sur chaque appareil domestique.

Le modèle complet d'une charge domestique contenant un moteur universel est représenté sur la Figure 2.15 et se compose des blocs suivants :

- Modèle du moteur universel
- Modèle du contrôle de la puissance
- Modèle du couple de la charge

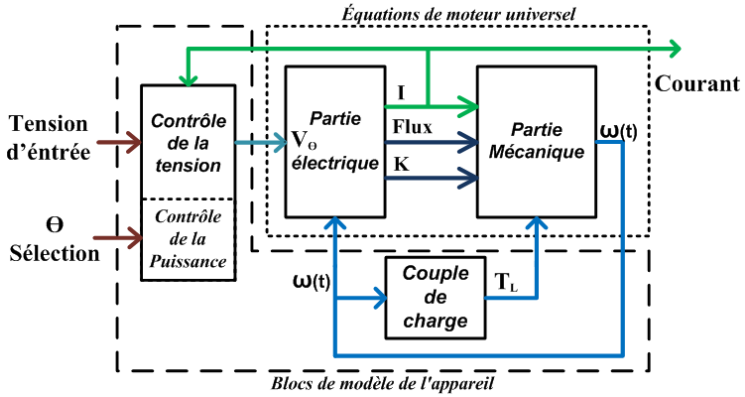


Figure 2.15. Modèle complet d'un appareil domestique

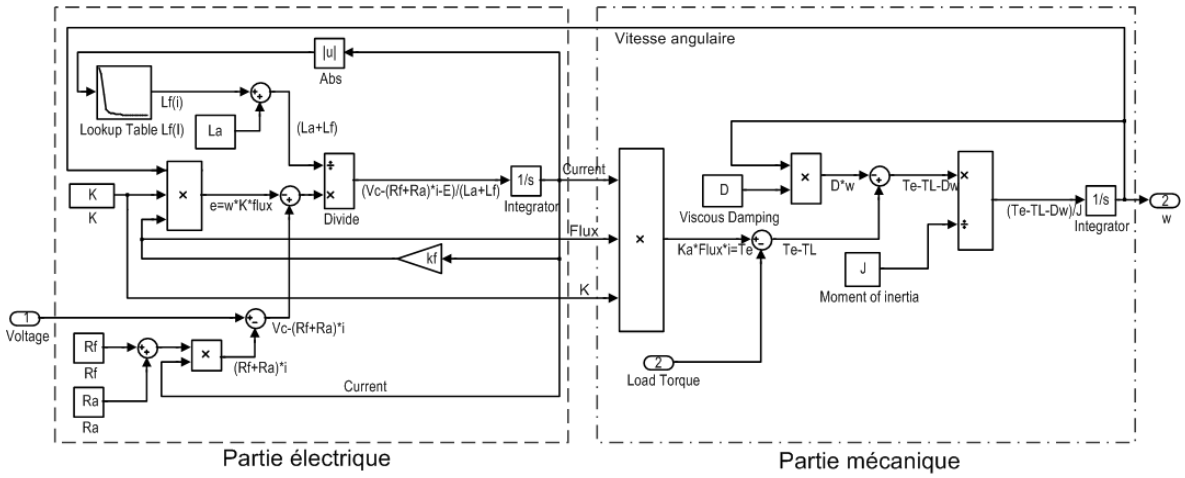


Figure 2.16. Modèle du moteur universel développé sous Matlab – Simulink

La Figure 2.16 représente le modèle du moteur universel développé sous Matlab – Simulink à partir des deux équations du moteur eq.(10) et eq.(11).

2.7.3 Bloc de contrôle de puissance.

Afin d'améliorer les performances du modèle nous avons ajouté le bloc contrôle de puissance qui a pour fonction l'ouverture et la fermeture d'un dispositif de puissance (triac) pour la conduction ou non du courant. Un contrôle d'angle commande l'ouverture ou fermeture du triac pour chaque demi-période [45] (Figure 2.17).

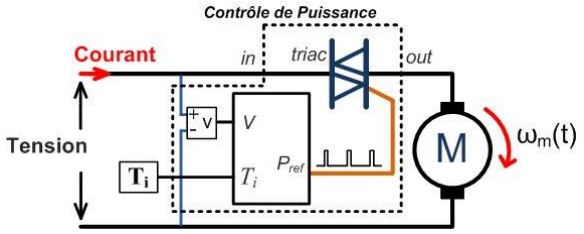


Figure 2.17. Système de contrôle de puissance

Dans la modélisation (Figure 2.18) le triac est remplacé par deux thyristors commandés afin de simuler le réglage de la puissance d'un appareil. Le système de contrôle d'angle est

composé par un générateur d'impulsions, dont l'instant de déclenchement varie en fonction de la puissance souhaitée. Sur le diagramme développé sous Simulink de la Figure 2.18, nous avons retenu 6 valeurs d'angle de conduction (instant de déclenchement) (Tableau 2.3).

T_i	1ms	2ms	3ms	4ms	5ms	6ms
Puissance	90%	80%	70%	60%	50%	40%

Tableau 2.3. Réglage de la puissance.

L'évolution du signal de sortie V_{out} suivant les six valeurs que peut prendre Ti est représentée sur la Figure 2.18. La fermeture des thyristors est systématiquement réalisée après le passage par zéro de la tension de ligne. La présence de ce bloc induit des harmoniques dans l'alimentation du moteur qui ont pour effet de réduire le rendement et d'augmenter le bruit.

Un bloc de détection de passage par zéro de la Figure 2.18 est implémenté pour synchroniser le signal de commande.

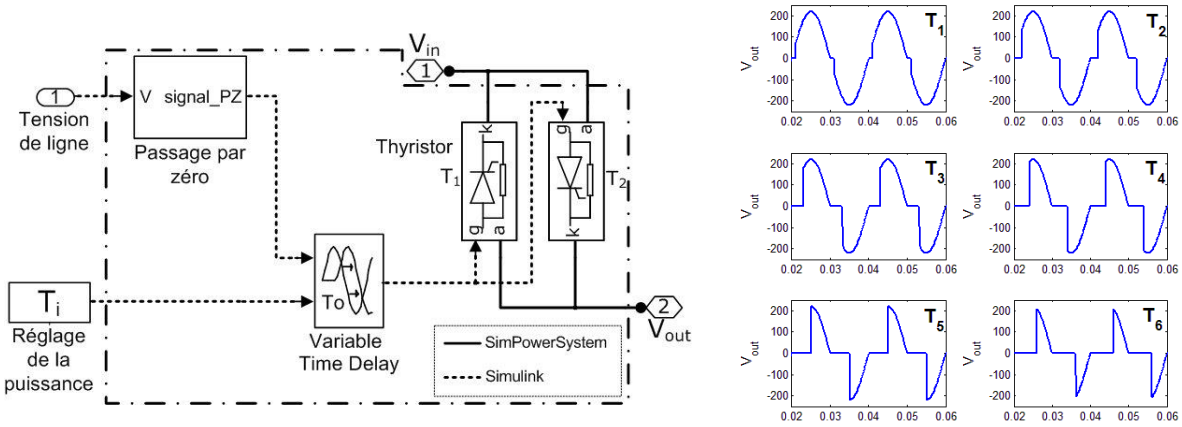


Figure 2.18. Diagramme du bloc du module contrôle de puissance sous Matlab Simulink

2.7.4 Couple de charge.

Le couple d'un appareil dépend des différentes applications du moteur (perceuse, aspirateur, etc).

2.7.4.1 Couple d'un aspirateur.

Pour un aspirateur, appareil le plus utilisé dans l'habitat, le couple de la charge est amené à évoluer lors de son utilisation (variation des forces lors de l'aspiration).

Dans ses travaux, Di Geraldo [45] fait varier le couple d'un aspirateur proportionnellement au carré de la vitesse angulaire suivant l'éq.(14). En effet, si le couple augmente en fonction de l'aspiration, la vitesse du moteur va augmenter afin de pouvoir compenser cette variation.

La Figure 2.19 représente la courbe de variation du couple en fonction de la vitesse ainsi que le bloc implémenté sous Simulink.

$$T_L = T_{L0} + K_{T_L}\omega_m^2(t) \quad (14)$$

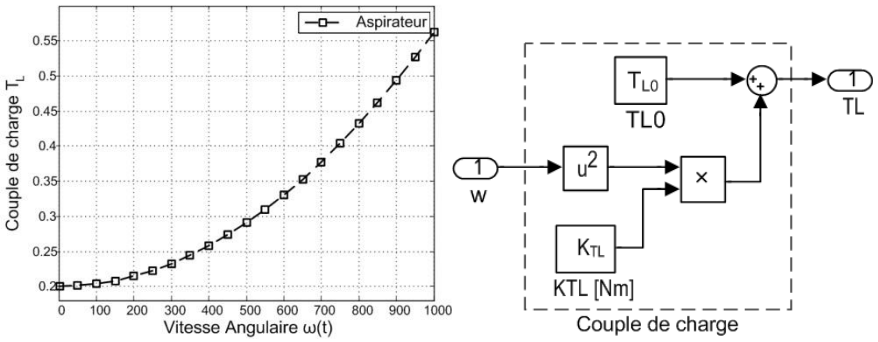


Figure 2.19. Couple de charge d'un aspirateur

2.7.4.2 Couple d'une perceuse.

La plage de puissance des perceuses domestiques est comprise entre 500 et 1000 W.

La perceuse est composée de deux sous-systèmes :

- Module mécanique, du train d'engrenages servant à augmenter le couple de sortie par rapport au couple d'entrée.
- Module électrique, qui a pour fonction de réguler la vitesse en réglant la tension d'alimentation avec la commande de puissance. Il est composé également d'un moteur universel.

Le couple d'une perceuse varie de manière inverse à la vitesse angulaire, selon l'éq. (15). En effet, pendant l'utilisation de la perceuse et lors de la phase de perçage d'un matériau compact notamment, le couple va augmenter entrainant la diminution de la vitesse. L'évolution du couple en fonction de la vitesse est représentée sur la Figure 2.20.

$$T_L = T_{L0} + K_{T_L}\frac{1}{\omega_m(t)} \quad (15)$$

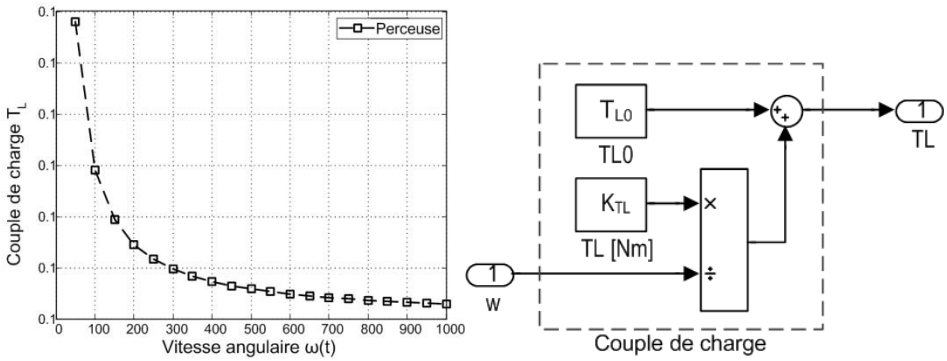


Figure 2.20. Couple de charge d'une perceuse

2.7.5 Modèle complet d'une charge domestique à base du moteur

La modélisation d'une charge électrique est réalisée sous Simulink et SimPowerSystems (Matlab®).

SimPowerSystems nous permet de modéliser et de simuler le système d'alimentation électrique, machines électriques (monophasé et triphasés), composants électriques, des modules de commande électrique, etc...

Simulink nous permet de modéliser et simuler différents systèmes en utilisant différents blocs analogiques, numériques, système de commande, de traitement de données, graphique, etc…

Dans notre cas, nous utilisons SimPowerSystems pour modéliser le réseau électrique comme la source de tension, le contrôle de puissance de l'appareil, la mesure du courant de ligne et la mesure de la tension. Le modèle du moteur universel est réalisé en utilisant les blocs de Simulink.

La Figure 2.21 représente le schéma bloc d'une charge simple (aspirateur ou perceuse) ainsi obtenu.

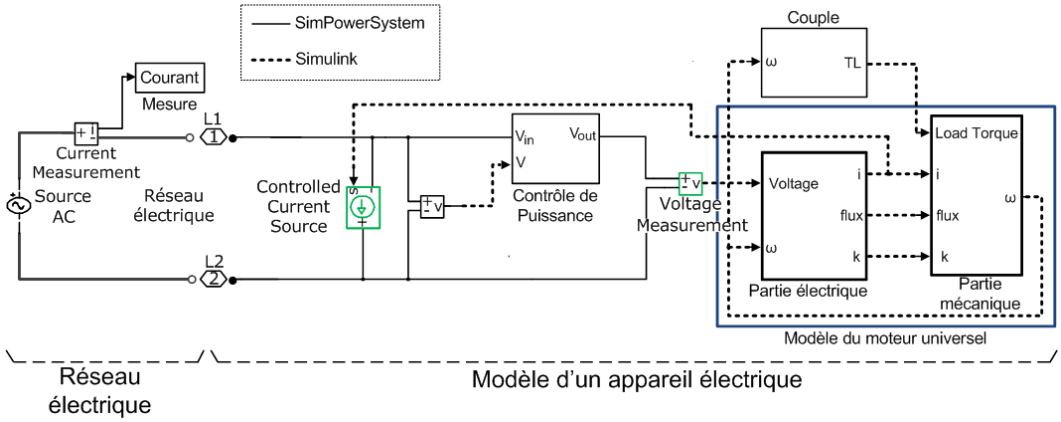


Figure 2.21. Modèle d'un appareil électrique à moteur universel

D'après la Figure 2.21 le modèle du moteur est raccordé au réseau électrique par l'intermédiaire de deux blocs :

- Le bloc « mesure de la tension » ou « voltage Measurement ».
- Le bloc « source du courant contrôlé » ou « Controlled Current Source ».

L'entrée du modèle du moteur universel est ainsi liée au réseau électrique par le bloc « mesure de la tension » et le courant produit par le modèle de la charge électrique (modèle du moteur universel avec le couple de charge) modélisé sous Simulink est lié à la ligne électrique modélisé sous SimPowerSystems à travers le bloc « source de courant contrôlée ».

Pour plusieurs charges connectées en parallèle sur la ligne du réseau électrique (modélisé sous SimPowerSystems), la mesure générale du courant doit être égale à l'addition du courant consommé par chaque charge connectée. Toutefois, le courant consommé par une charge modélisée sous Simulink ne sera pas directement pris en compte sur la ligne électrique. Il est donc nécessaire d'injecter le courant consommé sur la ligne, cette opération est réalisée grâce au bloc source de courant contrôlé.

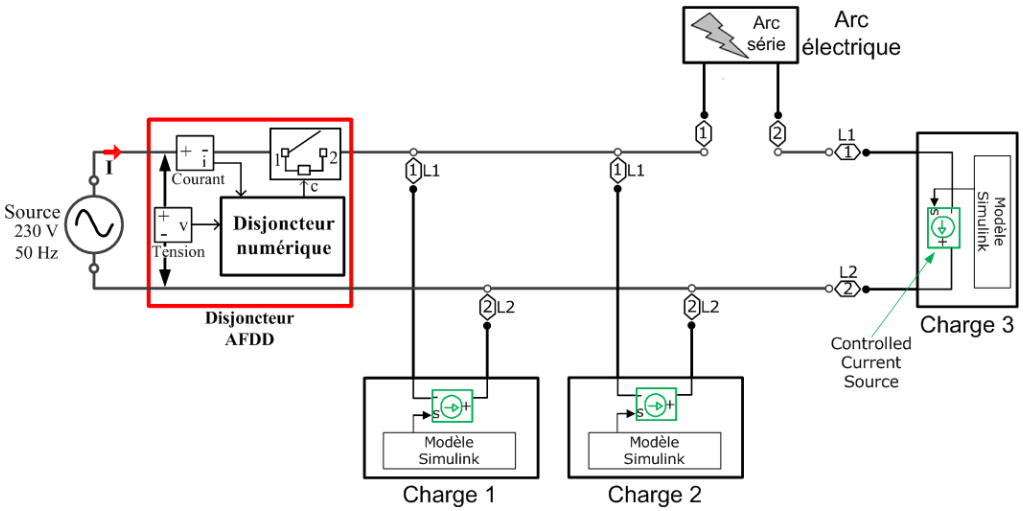


Figure 2.22. Association de plusieurs charges en parallèle

2.8 Résultats de modélisation de charges simples

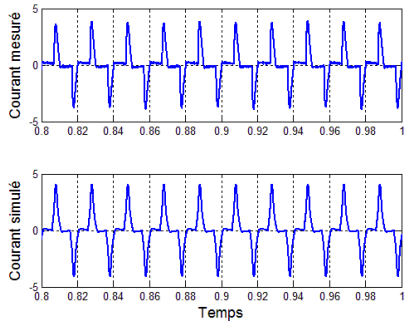
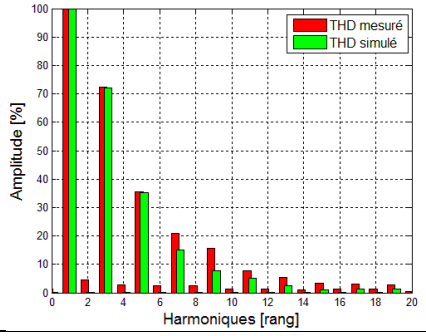
2.8.1 Résultats de simulation pour un aspirateur

L'aspirateur utilisé (Philips FC9302) est alimenté sous 230 V - 50 Hz et dispose d'une puissance de 1250 W.

Les paramètres électriques nécessaires à la modélisation de l'aspirateur sont:

- R_a = 1.651 ohm
- R_f = 1.164 ohm.
- L_a = 4.18 mH
- L_f = 24.7 mH.
- K = 0.45 s*V/rad/A.
- J=0.0001 kg*m^2
- Couple de charge : T_{L0}=0.22 N.m.
- Constante de torque K_{TL} = 0.0145*10^{-6} N*m*rpm

Le Tableau 2.4 présente les signatures des courants mesuré et simulé obtenues pour un aspirateur, l'analyse harmonique de ces courants ainsi que l'évaluation de l'indice de confiance sur 110 périodes.

Courant	Harmoniques
	

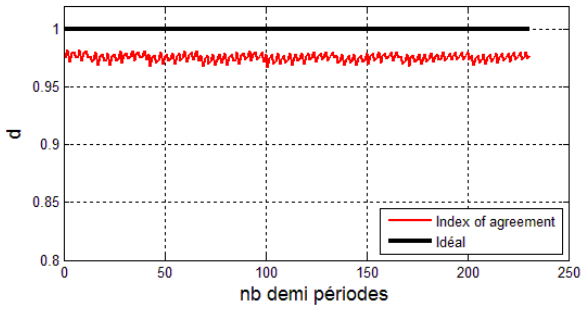


Tableau 2.4. Comparaison des résultats simulés et mesurés

À partir du Tableau 2.4, nous pouvons observer que les courants se ressemblent fortement. Les valeurs obtenues pour l'indice de confiance sont proche de d = 98 % est confirment cette observation.

L'analyse harmonique (rang 1 à 20) montre également une bonne similitude entre les deux signaux : THD mesuré = 85.11 % et THD simulé 82.19%.

Les amplitudes des harmoniques 3 et 5 pour les signaux simulé et mesuré sont identiques. Pour les harmoniques d'ordre supérieur, les amplitudes pour le modèle restent inférieures à celles de la mesure. Ces différences sont essentiellement dues à la non-linéarité du moteur et aux arcs produits entre les balais et le rotor, lesquels ne sont pas pris en compte dans le modèle.

L'amplitude des harmoniques de rang pair est proche de zéro pour l'ensemble des niveaux du signal courant simulé. La présence d'une tension d'offset liée à la sonde de mesure se traduit par une assez forte valeur de la composante continue. La courbe modélisée du courant étant parfaitement symétrique et dépourvue de tension d'offset, l'ensemble des amplitudes des harmoniques ont une valeur quasi nulle.

2.8.2 Résultats de simulation pour une perceuse

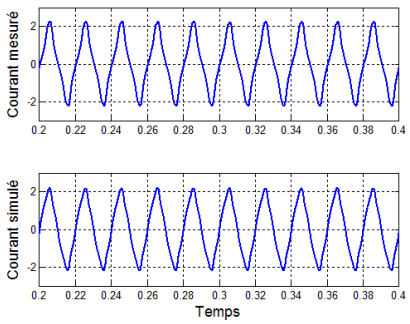
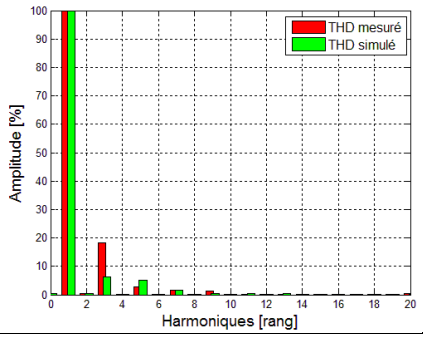
Les paramètres électriques de la perceuse, alimentée sous 230 V – 50 Hz, nécessaires à la modélisation sont les suivants:

- R_a = 2.1 ohm
- R_f = 3.6 ohm
- J=0.0001 Kg.m^2
- D = 0 N.m/(rad/s)

- L_a = 4.18 mH
- L_f = 24.7 mH
- K = 0.48 s.V/rad/A
- Couple de charge : T_{L0}=0.1 N.m.
- Constante du couple K_{TL} = 0.0145 10^{-6} N.m.rpm

Le Tableau 2.5 présente les résultats obtenus entre la signature du courant simulé et celui mesuré. Visuellement, les deux courants ont des allures très proches comme l'atteste l'indice de confiance supérieur à 96%.

L'analyse fréquentielle présente un écart dans les valeurs de THD mesuré = 18.69% et THD simulé = 8.29% lequel est dû principalement à la différence dans le troisième harmonique. Cette différence est due aux non-linéarités du moteur universel et peut-être aussi à l'usure des balais.

Courant	Harmoniques
	

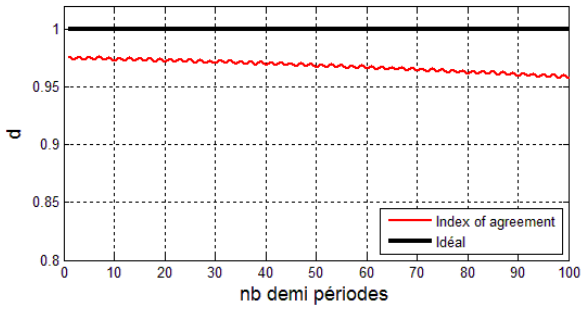


Tableau 2.5. Comparaison des résultats simulés et mesurés

2.9 Résultats de simulation pour des charges combinées

Dans une installation électrique domestique, l'ensemble des appareils électriques peuvent être connectés en parallèle. Dans notre modèle nous considérons quatre exemples de charges combinées :

- Aspirateur en parallèle avec une perceuse.
- Aspirateur en parallèle avec une bouilloire.
- Perceuse en présence d'un arc série
- Aspirateur connecté en parallèle avec un arc placé en série avec une bouilloire (charge de masquage).

2.9.1 Aspirateur en parallèle avec une perceuse

Cette configuration porte sur l'association en parallèle de deux charges distinctes : un aspirateur et une perceuse comme le montre la Figure 2.23.

Les paramètres électriques utilisés pour la simulation des deux charges domestiques sont :

- Aspirateur : Puissance à 60 % de 1250 W, couple 0.01N.m.
- Perceuse : Puissance 750 W, couple 0.1N.m.

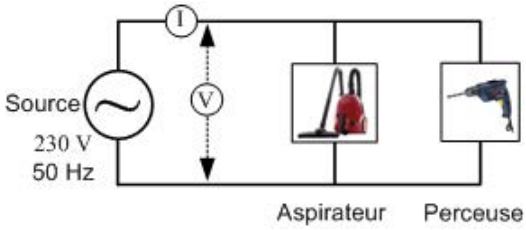
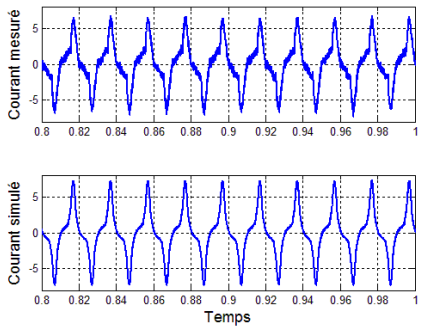
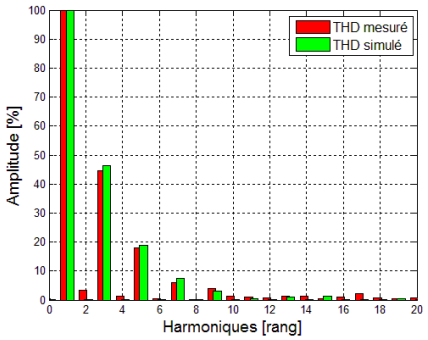


Figure 2.23. Aspirateur en parallèle avec la perceuse

Le Tableau 2.6 présente les résultats obtenus pour les courants de ligne simulé et mesuré pour ces deux charges placées en parallèle. L'indice de confiance supérieur à 97.74% montre une bonne concordance entre les signatures du courant simulé et mesuré.

L'écart de THD est faible et vaut environ 2 % (THD mesuré = 47.19 % THD simulé = 50.69 %).

Les harmoniques de rang pairs bien que d'amplitude très faible dans la mesure, ne sont pas présentes dans la modélisation (THD simulé =0.47% et THD mesuré = 3.47%). Ces harmoniques sont liés à la présence d'un arc électrique dans l'aspirateur non pris en compte dans la modélisation. La tension continue sur le courant mesuré est liée à la présence d'une tension d'offset (inférieure à 1 V) non stabilisée sur la sonde de mesure.

Courant	Harmoniques
	

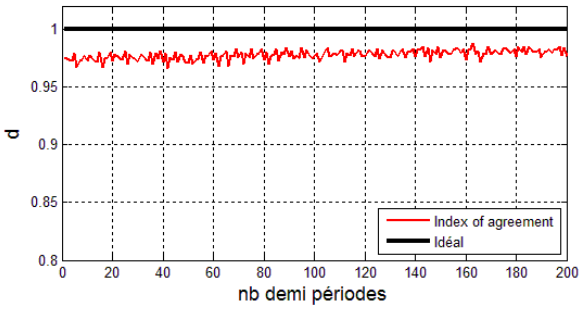


Tableau 2.6. Comparaison des résultats simulés et mesurés

2.9.2 Aspirateur en parallèle avec une bouilloire

La deuxième configuration comporte un aspirateur et une bouilloire placés en parallèle (Figure 2.24).

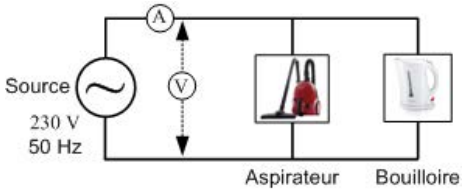
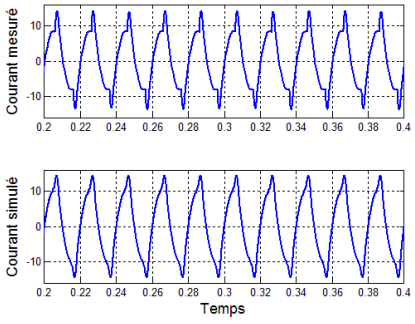
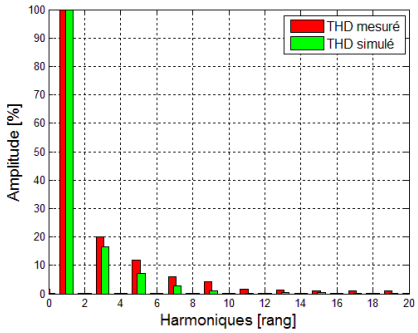


Figure 2.24. Aspirateur en parallèle avec une bouilloire

Les résultats de la modélisation et de la mesure sont montrés sur le Tableau 2.7.

Les courants simulé et mesuré ont une signature qui se rapproche, comme le montre l'indice de confiance dont la valeur est comprise entre 95% et 92 % sur la plage d'analyse.

L'analyse fréquentielle a permis d'obtenir les valeurs de THD mesuré = 24.55 % et THD simulé = THD 18.23 %.

Courant	Harmoniques
	

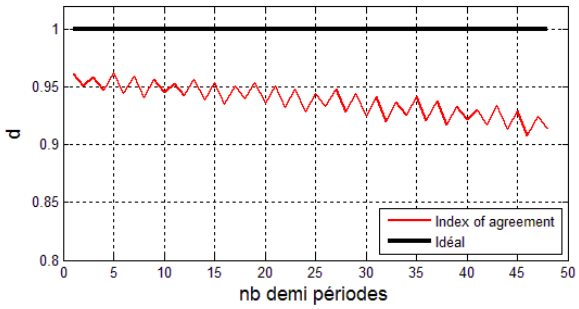


Tableau 2.7. Comparaison des résultats simulés et mesurés

2.9.3 Perceuse en présence d'un arc électrique série.

Dans cette configuration une perceuse est placée en série avec un arc électrique (Figure 2.25), l'ensemble est alimenté par la source 230 V – 50 Hz.

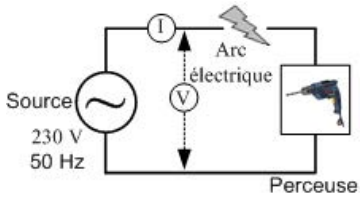


Figure 2.25. Perceuse avec un arc en série

La Figure 2.26 présente le modèle développé sous Matlab Simulink – SimPowerSystems pour un défaut d'arc en série avec la perceuse.

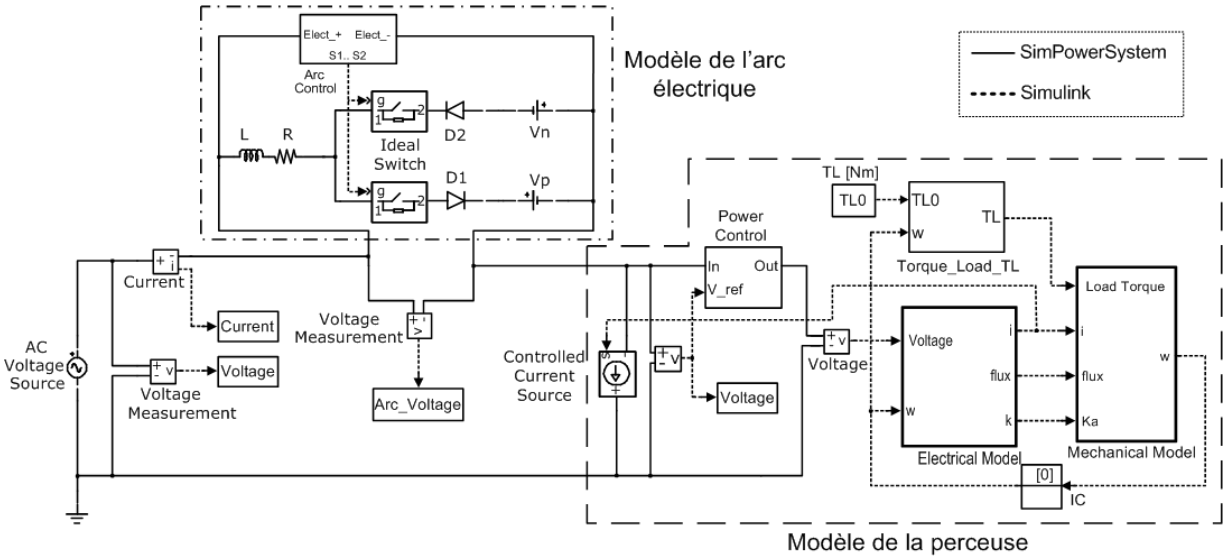


Figure 2.26. Modèle d'une perceuse en série avec un arc électrique

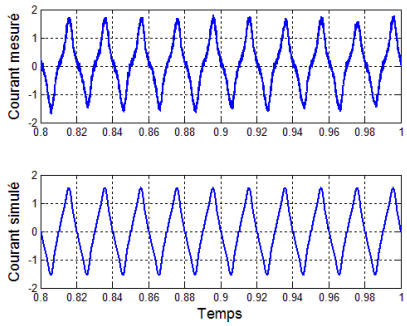
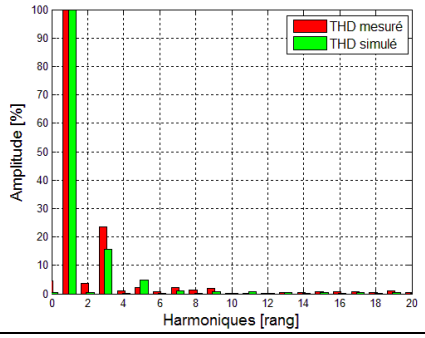
Les paramètres du modèle sont :

- Puissance de la perceuse : 750 W.
- Couple de charge de la perceuse : 0.1 N.m.

Le Tableau 2.8 montre une assez bonne concordance entre le tracé expérimental (mesuré) et celui simulé du courant, ce qui se traduit par une valeur assez élevée de l'indice de confiance entre 90% et 98%.

Les différences d'amplitude sur les harmoniques de rang 3, 5, 7 et 9 sont dues à certains paramètres qui n'ont pas été pris en compte dans le modèle du moteur (commutation entre le collecteur et le rotor) et l'état chaotique de l'arc. La comparaison du THD entre les deux signaux montre un écart de 8% (THD mesuré = 25%, THD simulé =17%).

L'apparition dans le modèle d'une tension égale à zéro lors du passage à zéro peut expliquer la différence relativement importante pour l'harmonique de rang 3 entre le modèle et la mesure.

Courant	Harmoniques
	

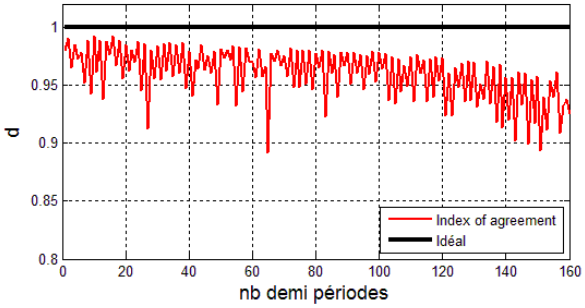


Tableau 2.8. Comparaison des résultats simulés et mesurés

2.9.4 Charge de masquage

L'association de plusieurs charges en parallèle avec un défaut d'arc électrique situé dans l'une des branches du circuit correspond à une charge de masquage.

Nous présentons un premier test qui comporte un aspirateur en parallèle avec un bouilloire placée en série avec un défaut d'arc (Figure 2.27).

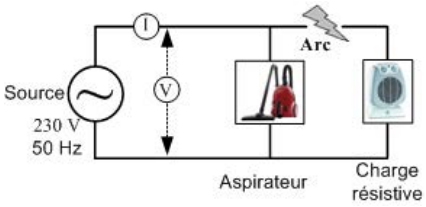
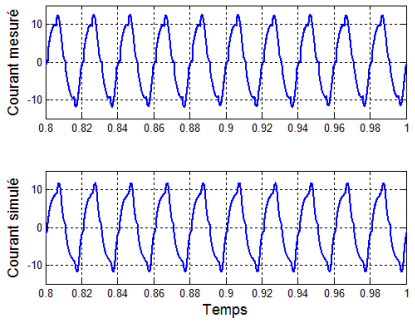
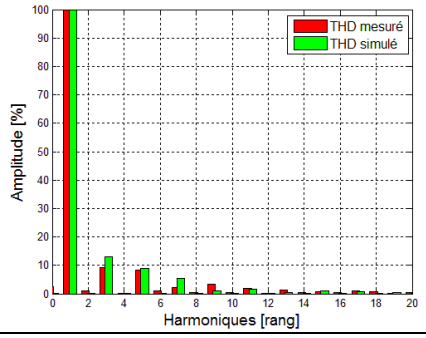


Figure 2.27. Charge de masquage

Paramètres de simulation:

- Tension de 230 V, fréquence 50 Hz.
- Aspirateur de 1250 W, couple de 0.5 N.m.
- Bouilloire de 1000 W

D'après le Tableau 2.9 les formes d'ondes simulés et mesurés se ressemblent fortement (indice de confiance approximatif de 98 %).

Courant	Harmoniques
	

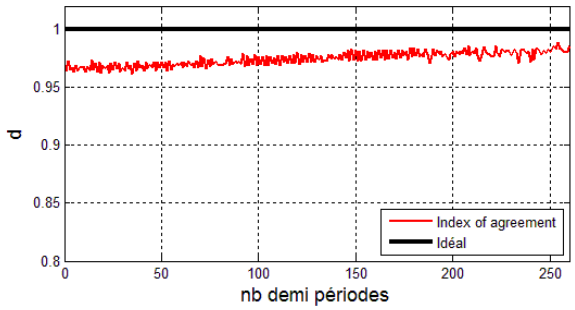


Tableau 2.9. Comparaison des résultats simulés et mesurés

En prenant en compte deux charges différentes sur la ligne et un défaut d'arc, les taux d'harmoniques globaux pour les mesures et le modèle résultant sont proches (THD mesuré = 15.29% THD simulé = 16.75%).

La différence la plus prononcée concerne l'harmonique de rang 7 et de rang 9. Pour les harmoniques de rangs impairs, le taux de distorsion restent toutefois assez proches (THD mesuré = 15.18%, THD simulé =16.75%).

Ces variations sont certainement liées à plusieurs facteurs de la modélisation tels que le couple du moteur, les variations de la source de tension et d'autres phénomènes du modèle d'arc qui ne sont pas pris en compte.

Pour les harmoniques de rang pair, les valeurs sont très faibles dans les deux cas (THD mesuré = 1.82%, THD simulé =0.23%).

2.10 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un ensemble de modèles électriques décrits sous Matlab/ Simulink – SimPowerSystems portant d'une part sur les principales charges domestiques telles que aspirateur, perceuse, bouilloire, éclairage fluorescente, et d'autre part sur le défaut d'arc électrique.

La validation des modèles est réalisée :

- Dans le domaine fréquentiel avec le calcul du taux de distorsion harmonique (THD) sur le courant
- Dans le domaine temporel à partir du calcul de l'indice de confiance (ou degré de similarité) entre les signatures des courants mesuré et simulé.

L'ensemble des résultats expérimentaux sont conformes avec les résultats de simulation aussi bien au niveau du comportement temporel que fréquentiel.

Les résultats de la modélisation montrent une bonne similarité entre les formes d'onde des courants, comme le montre la valeur de l'indice de confiance le plus souvent supérieur à 90%. L'analyse harmonique a montré une bonne concordance pour les harmoniques d'ordre impairs jusqu'au septième ordre. Pour les harmoniques d'ordre supérieur, les différences bien que négligeables sont dues aux phénomènes physiques qui ne sont pas pris en compte dans les modèles tels que les non-linéarités du moteur et les arcs produits par les balais du moteur.

Nous avons mis au point les premiers éléments d'une plateforme virtuelle de test : les différents modules (correspondants chacun à une charge domestique ou un arc) peuvent ainsi être assemblés selon les besoins des tests à réaliser (la norme IEC62606 donne la configuration de tests à mener pour la détection des arcs électriques avec des charges simples ou combinées avec charge de masquage).

Le principal avantage de cet outil est la possibilité de mettre au point et de tester rapidement des algorithmes de détection dans des conditions le plus proche possible de la réalité et suivant une multitude de configurations différentes (couple et puissance variable, longueur de fils différente, modification de l'emplacement de l'arc, associations variables de charges…). L'avantage de la modélisation est de pouvoir s'affranchir des manipulations et tests souvent longs et lourds à mettre en œuvre.

Chapitre 3

3 Analyse des principes de détection

3.1 Introduction

Les systèmes de protection électrique dans l'habitat sont très utilisés pour la sécurité des biens et des personnes. La plupart de ces systèmes sont basés sur la détection de courant de surcharge, les courants de court-circuit, des courants de fuites à la terre liés à un défaut d'isolement. Ces produits conventionnels (disjoncteurs magnétothermiques) ne permettent pas de protéger totalement une installation électrique contre l'ensemble des défauts pouvant apparaître sur une ligne électrique, c'est le cas des défauts d'arcs électriques. Dû à la valeur de courant d'un arc électrique qui peut être inférieure à la valeur limite de la zone de non-protection du disjoncteur.

Les caractéristiques principales lors de la production des défauts d'arcs sont :

- La valeur du courant de défaut est inférieure à la valeur nominale de détection des surcharges,
- L'apparition aléatoire d'un défaut d'arc dans le temps [24], etc.

Notamment, la détection des défauts d'arcs représente un problème important à résoudre dû à la difficulté de différenciation avec les signaux du courant en fonctionnement normal. Aussi il existe la possibilité d'apparition d'erreurs de détection qui peuvent provenir des bruits et variations provoquées par les différents dispositifs électriques (moteurs, gradateur, alimentation à découpage, etc.) [23] et également dues à la localisation du défaut (circuit de masquage) [62]. Toutefois, il existe des disjoncteurs AFCI (arc fault circuit interrupter) qui sont conçus pour être capables de détecter un défaut d'arc électrique dans un réseau domestique [1, 2, 63, 64].

Les arcs électriques peuvent se produire dans une installation électrique, et ont plusieurs causes : carbonisation de l'isolement (arc tracking), fils endommagés ou mauvaise isolation électrique, connexions défectueuses, perforation accidentelle du câble électrique, vieillissement naturel, etc.[23, 65, 66].

La détection d'un défaut d'arc a été abordée par plusieurs auteurs [29, 62, 67-80] ; ils ont publié différentes méthodes dans différentes revues, articles et aussi brevets. Ces méthodes sont basées sur plusieurs techniques utilisant le domaine temporel, fréquentiel et temps-fréquence.

Différentes techniques et concepts mathématiques peuvent être développés pour proposer de nouvelles méthodes de détection de défauts d'arcs. Les principales contraintes des méthodes sont : un fort taux de détection de défaut d'arc et un faible taux, de préférence zéro, de fausses détections. En même temps, ces méthodes doivent être testées avec plusieurs charges et suivant différentes configurations pour garantir une bonne performance des algorithmes aux variations et perturbations [1][2]. La plupart des algorithmes présentés dans la littérature sont testés avec une charge résistive, il est difficile de connaitre le comportement des algorithmes en présence d'une charge non linéaire (aspirateur, électronique de puissance de type alimentation à découpage, etc.) ou pour les configurations de masquage. Néanmoins,

Gregory et al [23] dans leur article présentent des signaux en présence de défauts d'arcs pour différentes charges.

Dans ce chapitre, nous présentons les différents algorithmes de la littérature proposés par les auteurs. Dans un premier temps, une recherche bibliographique a été faite afin de connaitre et classifier les différentes méthodes de détection et ensuite les tester avec les signaux réels.

3.2 Classification des techniques et méthodes de détection

Il existe un grand nombre de techniques et de méthodes de détection de défauts d'arcs électriques. Elles sont liées au type d'arc électrique (série ou parallèle) et à la nature du milieu de production de l'arc (réseau de transmission et distribution électrique, installation domestique, réseau de distribution DC,…).

La Figure 3.1 montre une classification généraliste des méthodes de détection selon Lopez [16, 81].

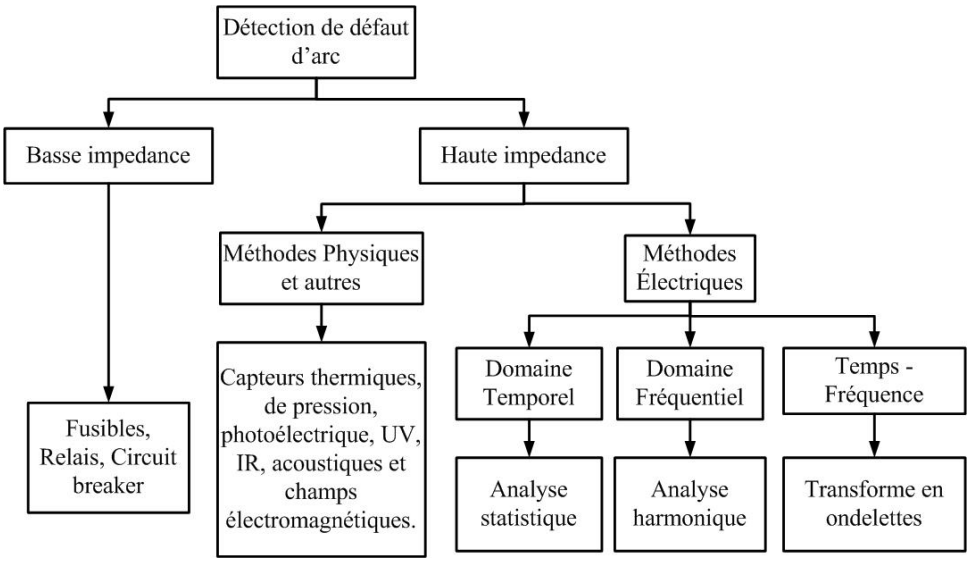


Figure 3.1. Classification des méthodes de détection

Selon D. Lopez [16] et Liu [81], les méthodes de détection de défauts d'arcs électriques peuvent être classées en fonction de deux types :

- Les défauts d'arcs à **basse impédance** sont caractérisés par une élévation importante du courant, cette caractéristique génère une action rapide du circuit de protection (disjoncteur, relais ou fusible).
- Les défauts **haute impédance** (High Impedance Fault - HIF) sont les plus difficiles à détecter. La détection peut être abordée selon deux approches : méthode électrique et méthode physique.

- **Méthodes physiques pour la détection HIF**

Les méthodes sont basées sur l'observation du défaut par des capteurs thermiques, de pression, photoélectrique, du champ électromagnétique et acoustique. Elles sont basées

davantage sur l'aspect physique et les phénomènes liés à la production de l'arc : plasma, bruit, etc…

- **Méthodes électriques pour la détection HIF**

Ces méthodes basées sur l'analyse de la signature du courant et de la tension, sont classées principalement en 3 groupes [62, 67-78] :

- Méthodes fréquentielles,
- Méthodes temporelles - statistiques
- Méthodes temps-fréquence.

Dans la suite nous nous limiterons à l'exploitation des signatures électriques de la tension et du courant. Ces signaux vont nous permettre d'analyser et d'interpréter les caractéristiques fréquentielles et temporelles des arcs électriques.

Plusieurs méthodes de détection de défaut d'arc présentées dans la littérature sont basées sur une analyse temporelle (dérivée du courant, analyse de la variance, courant pic, signature de l'arc…) [62, 75, 77, 80] et autres s'appuient sur une analyse fréquentielle et temps-fréquence (filtrage de basses et hautes fréquences, transformé en ondelette, etc.) [67-69, 71, 73, 75, 76, 78, 79].

Il est possible de classer les différentes méthodes de détection basées sur la signature électrique en 3 groupes :

- Analyse fréquentielle :
  - Bande passante :
  - Filtrage d'une bande de fréquence particulière 1 kHz, 10 kHz, 33 kHz…
  - Analyse du 5ème harmonique, etc…
- Analyse Temporelle :
  - Dérivée
  - Corrélation
  - Moment d'ordres 1, 2, 3 et 4
  - Analyse de la forme,…
- Analyse Temps-Fréquence
  - Transformée en ondelette

3.3 Banc de test de défauts d'arcs électriques

Les signatures du courant et de la tension sont mesurés en se basant sur des exigences décrites dans la norme Européen IEC 62606 [2] pour les tests et la validation d'un disjoncteur de défaut d'arc AFDD. Plusieurs enregistrements sont effectués pour des charges simples et pour des charges combinées en présence d'arcs (chapitre 1.8.6).

Au sein de l'équipe Mesure et Architecture Électronique MAE 406 de l'institut Jean Lamour, nous disposons d'un banc de génération de défauts d'arcs électriques.

Ce banc nous permet :

- De générer des défauts d'arcs électriques dans un endroit confiné dans lequel il est possible de faire varier la pression et la température.
- D'acquérir les données courant, tension de ligne et tension d'arc caractéristiques des défauts d'arcs.
- De tester les méthodes de détection en temps réel et avec un prototype de détection.
- De tester différents disjoncteurs d'arc.

Le banc de test comprend :

- Une source de tension alternative 230 V - 50 Hz, source de tension alternative entre 0 – 400 V, 10 – 400 Hz et une source de tension continue entre 0 – 400 V.
- Un générateur de défauts d'arcs électriques par surtension – GDARC [38].
- Un générateur de défauts d'arc électrique par rupture de contacts.
- Un dispositif de variation de la pression et de la température.
- Une source de haute tension pour la création de chemin carboné.
- D'un dispositif d'acquisition de données (oscilloscope et sondes de courant et tension).
- De charges résistives variables, capacitives variables et inductives variables.
- De charges domestiques (aspirateur, perceuse, gradateur, ordinateur, etc..).

La Figure 3.2 montre le banc de test du laboratoire

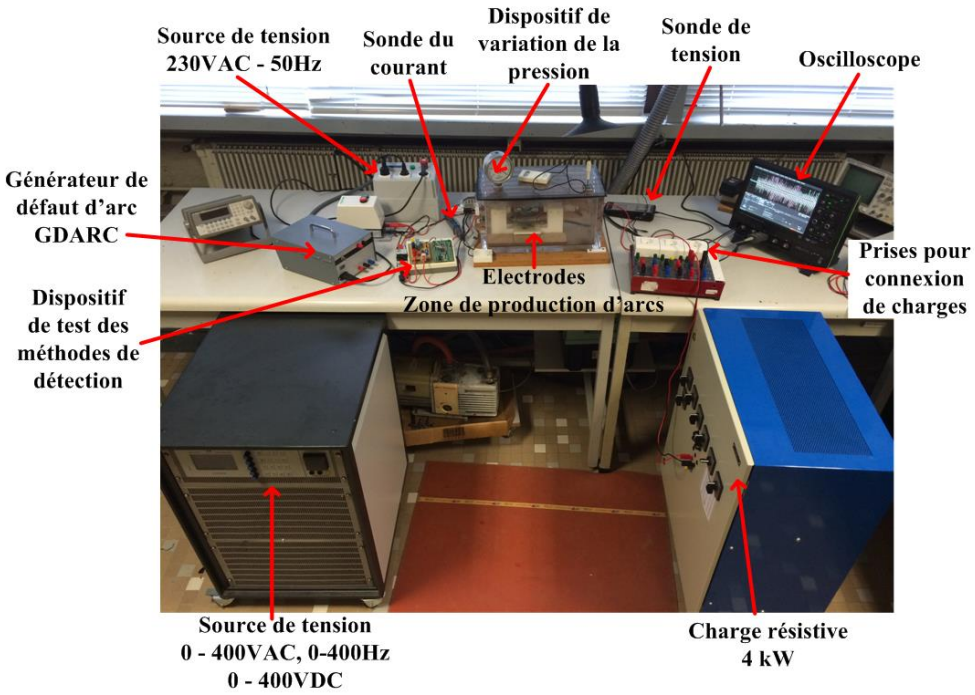


Figure 3.2. Banc de test de défauts d'arc électriques.

L'acquisition des signatures pour réaliser la base de données comprend les grandeurs électriques suivantes :

- Le courant d'alimentation
- La tension d'alimentation

– La tension aux bornes de l'arc

Les caractéristiques principales des sondes de mesure sont résumées dans le Tableau 3.1. Les sondes sont connectées à un oscilloscope Lecroy WavePro 950.

Sonde de tension d'alimentation	Sonde de tension d'arc	Sonde de courant
Sonde différentiel		Lecroy AP015
Testec TT-SI 9010		DC - 50 MHz
DC - 70 MHz, Max. Peak 7 kV		Max. Peak 50 A

Tableau 3.1. Sondes de mesures

3.4 Analyse fréquentielle

3.4.1 Présentation et classification des différentes méthodes

Les méthodes fréquentielle sont souvent basées sur l'analyse d'une ou plusieurs bandes de fréquence du courant. Selon les auteurs, quand un arc électrique est produit, les amplitudes d'harmoniques particulières ont tendance à augmenter. Ce phénomène est dû au changement de phase de certaines fréquences pour un courant avec défauts d'arcs.

Ces bandes de fréquence peuvent être classées en 4 groupes [79] :

– Bande de détection aux fréquences inférieures à 1 kHz [29, 69, 74, 78, 82-84].
– Bande de détection pour des fréquences comprises entre 1 kHz et 20 kHz [21, 82, 85-88].
– Bande de détection pour des fréquences comprises entre 20 kHz et 1 MHz [89-93].
– Bande de détection pour des fréquences supérieures à 1 MHz [62, 94-96].

La Figure 3.3 montre la classification des différentes bandes de fréquences utilisées pour la détection de défauts d'arcs électriques.

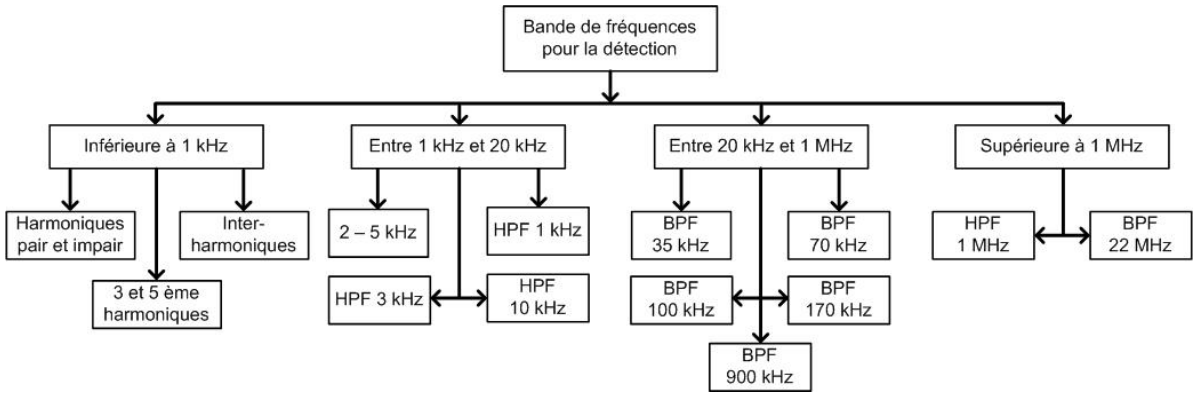


Figure 3.3. Classification de bande de fréquences pour la détection de défaut d'arc électrique basée sur l'analyse fréquentielle

- **Bande de détection pour fréquences inferieures à 1 kHz**

Différents auteurs ont observé une légère augmentation de l'amplitude des harmoniques du courant dans cette bande de fréquence avec l'apparition d'un arc sur la ligne. Zamanan [29] et Russell [82] ont retenu l'analyse des harmoniques impaires comme moyen de détection des défauts d'arcs. Hadziefendic [69], Muller et Yu [78] proposent l'analyse du troisième et cinquième harmonique. Patterson [83] et Cheng [84] présentent également une analyse effectuée sur des harmoniques d'ordre impair et pair, les résultats montrent une augmentation significative des harmoniques paires et impaires. De la même manière les amplitudes des fréquences intermédiaires (25, 75, 125,… etc) ont présenté une augmentation, ce principe a été présenté par Russel [82] et Patterson [83]. En même temps, Muller [74] a observé une élévation du spectre du courant jusqu'à 2 kHz au cours d'un défaut d'arc.

- **Bande de détection pour fréquences entre 1 kHz et 20 kHz**

Analyse du courant de ligne :

Hall [85] propose une méthode de détection basée sur l'analyse des fréquences supérieures à 1 kHz. Dae-won [86] et Kim [87] n'utilisent que la bande de fréquence supérieure à 3 kHz. Kim [21] a analysé le courant de défaut d'arc à l'aide d'un filtre passe-haut de 10 kHz. Russell [82] et Aucoin [88] quant à eux se sont limités à la bande de fréquence 2 - 10 kHz pour la détection de l'arc électrique.

Analyse de la tension ligne :

Kim [87] et Kim [21] ont observé une augmentation de l'amplitude des harmoniques pour un arc série pour les deux plages de fréquences [1- 3 kHz] et [20 - 30 kHz].

- **Bande de détection pour fréquences entre 20 kHz et 1 MHz**

Dans son brevet, Dvorak [89] analyse les harmoniques du courant pour certaines fréquences spécifiques (20 kHz, 33 kHz et 58 kHz) pour détecter les défauts d'arcs électriques. Zhang [90] propose une méthode basée sur le calcul de la transformée en ondelettes et également l'analyse du courant autour d'une fréquence de 115 kHz [90]. Ji et al [91] ont mis au point un filtre passe-haut de fréquence de coupure égale à 170 kHz pour détecter les fréquences générées par l'arc. Zhou et al [92] se sont limités à l'analyse de deux bandes de fréquences spécifiques (filtre passe-bande autour de 100 kHz et 900 kHz). Haun et al [93] réalisent la détection d'un arc série en utilisant deux filtres passe-bande l'un autour de 35 kHz et l'autre autour de 70 kHz.

- **Bande de détection pour fréquences supérieures à 1 MHz**

Restrepo [62, 97] et Martel [95] proposent l'analyse du courant en haute fréquence en utilisant un transformateur toroïdal à ferrite centré autour de la fréquence de 22 MHz.

3.4.2 Analyse fréquentielle du courant

L'objectif est d'analyser le courant dans les 4 bandes de fréquences citées précédemment en se basant sur un changement de l'amplitude du spectre de fréquence pour détecter la présence de défauts d'arcs. L'étude menée est réalisée en régime permanent.

Le Tableau 3.2 présente les principales caractéristiques de charges retenues pour cette analyse fréquentielle.

Charges	Spécification de charges 230V 50 Hz en régime permanent	
	Type	Puissance
Charge 1	Bouilloire	1000 W
Charge 2	Lampe avec un ballast magnétique	50 W
Charge 3	Aspirateur	1200 W
Charge 4	Perceuse + Bouilloire	750 W et 1000 W

Tableau 3.2. Types de charges utilisées

La fréquence d'échantillonnage du courant a été fixée à 100 MHz afin de pouvoir analyser le courant sur une large bande de fréquence.

Lors de l'ensemble de ces mesures nous avons jugé préférable de ne pas visualiser et enregistrer la tension au borne de l'arc électrique afin que l'effet capacitif de la sonde ne vienne pas perturber la mesure dans certaines bandes de fréquences.

Les figures du 3.4 à 3.11 montrent les signatures du courant dans les charges retenues. Deux types de signature pour chaque charge sont observés ; le courant avec défauts d'arc et le courant en fonctionnement normal.

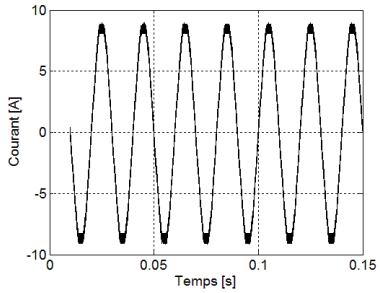


Figure 3.4. Signature du courant en fonctionnement normal pour la charge 1

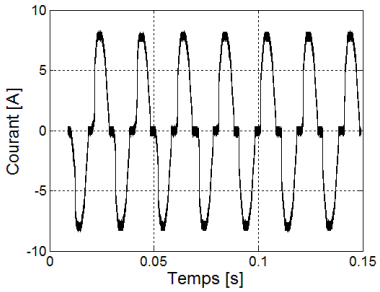


Figure 3.5. Signature du courant avec défauts d'arcs pour la charge 1

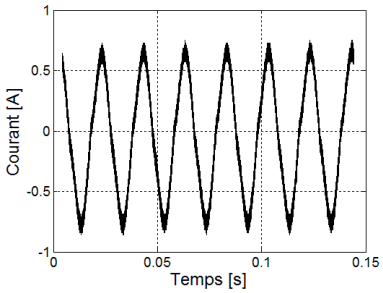


Figure 3.6. Signature du courant en fonctionnement normal pour la charge 2

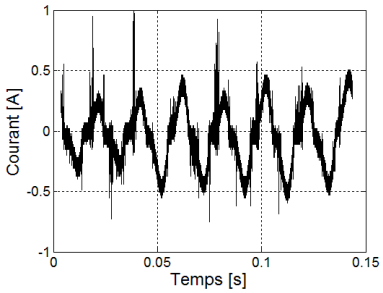


Figure 3.7. Signature du courant avec défauts d'arcs pour la charge 2

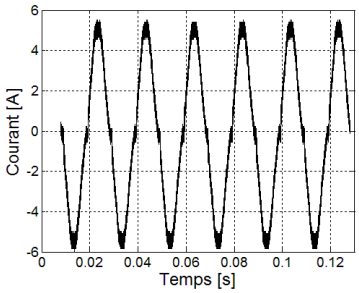


Figure 3.8. Signature du courant en fonctionnement normal pour la charge 3

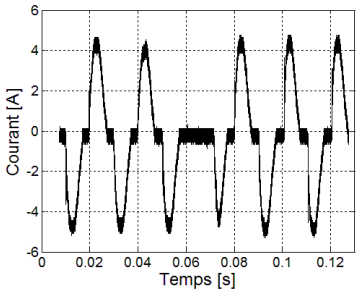


Figure 3.9. Signature du courant avec défauts d'arcs pour la charge 3

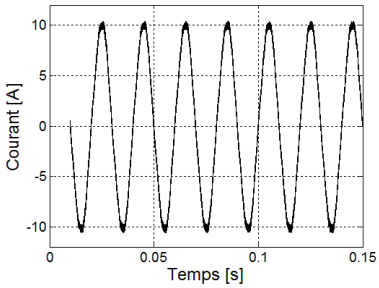


Figure 3.10. Signature du courant en fonctionnement normal pour la charge 4

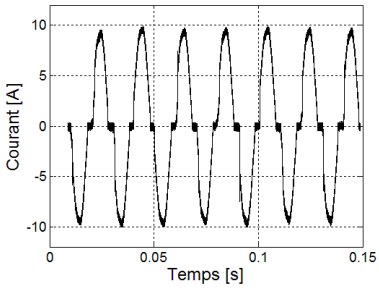


Figure 3.11. Signature du courant avec défauts d'arcs pour la charge 4

La seconde étape a été de réaliser le calcul de la transformée de Fourier pour chaque signal de courant avec le logiciel de calcul Matlab.

Les figures 3.12, 3.13, 3.14 et 3.15 présentent les transformées de Fourier Rapide (FFT) obtenues pour les différentes charges du Tableau 3.2 en fonctionnement normal (courbe rouge) et en présence de défaut d'arc (courbe bleue).

Nous allons ensuite tester les principales méthodes présentées précédemment sur ces signaux afin de vérifier la faisabilité de détection de ces méthodes basés sur l'analyse fréquentielle.

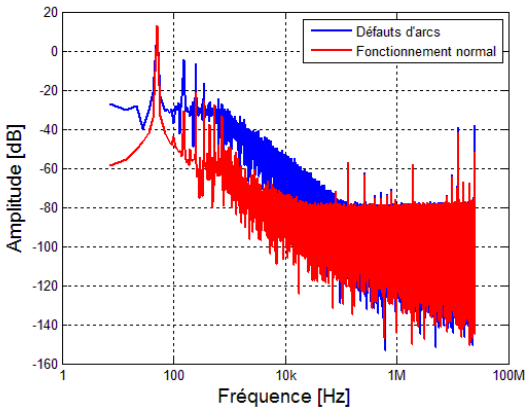


Figure 3.12. FFT pour la charge 1 (avec et sans défaut d'arcs)

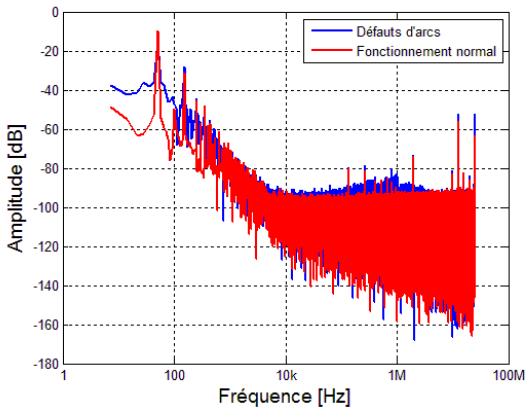


Figure 3.13. FFT pour la charge 2 (avec et sans défaut d'arcs)

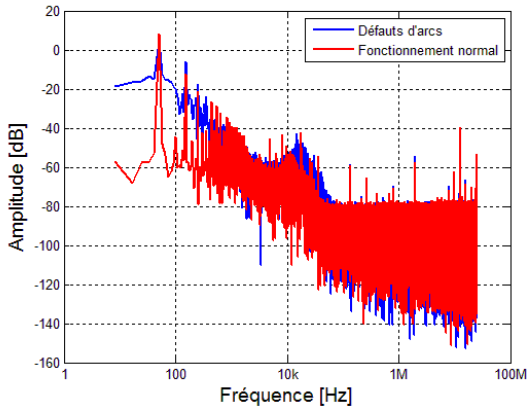


Figure 3.14. FFT pour la charge 3 (avec et sans défaut d'arcs)

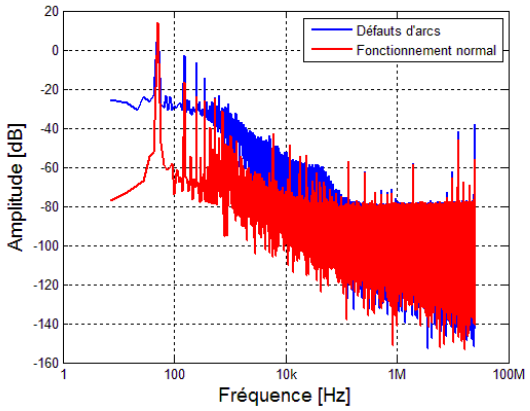


Figure 3.15. FFT pour la charge 4 (avec et sans défaut d'arcs)

3.4.3 Harmoniques paires et impaires.

Les figures 3.16, 3.17, 3.18 et 3.19 montrent les résultats obtenus pour les 4 types de charges avec défauts d'arcs et en fonctionnement normal dans la bande de fréquence de 0-1 kHz.

Si la signature du courant a une forme d'onde asymétrique, les amplitudes des harmoniques principalement en basse fréquence ont tendance à augmenter (lié à la variation de phase). Dans notre cas dans la plage de fréquences inférieures à 1 kHz, nous pouvons observer que les amplitudes des harmoniques paires du courant avec un défaut d'arc ont augmenté par rapport au courant sans défaut.

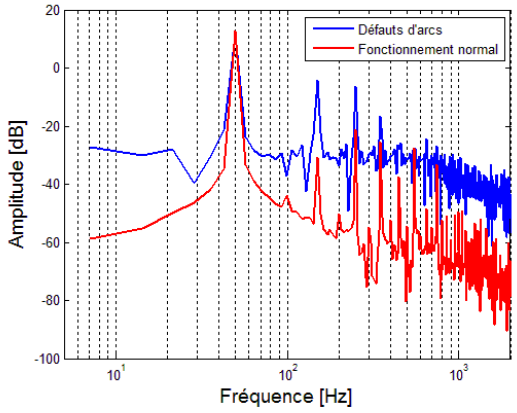


Figure 3.16. FFT pour la charge 1

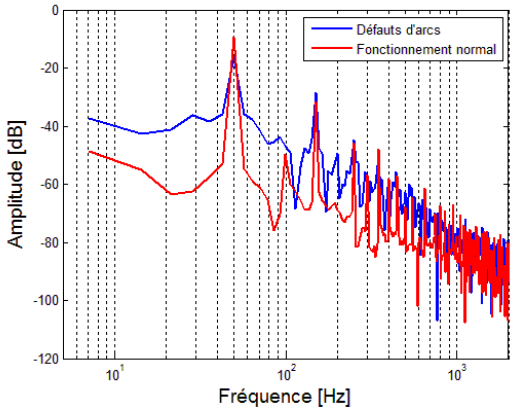


Figure 3.17. FFT pour la charge 2

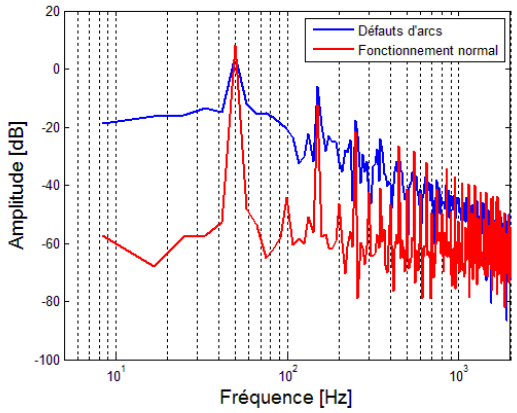


Figure 3.18. FFT pour la charge 3

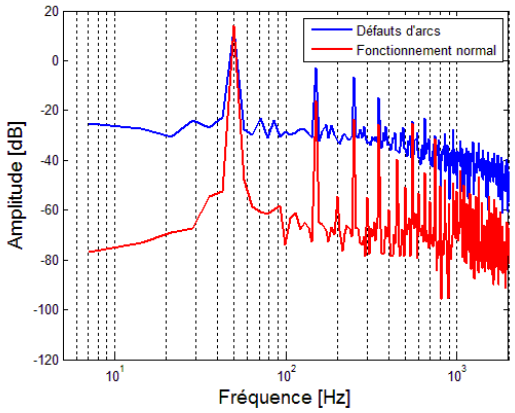


Figure 3.19. FFT pour la charge 4

Étant donné que l'amplitude des harmoniques d'ordre impair ne change pas de façon significative nous nous limitons à l'analyse des harmoniques pairs.

Le Tableau 3.3 montre les résultats obtenus pour les différentes charges pour le courant avec défauts d'arcs et le courant en fonctionnement normal.

Les résultats montrent systématiquement une augmentation de l'amplitude des harmoniques paires pour le courant en présence de défauts d'arcs.

Charges		Valeur de l'amplitude des harmoniques [x10^{-3}] A						
		$2^{ème}$	$4^{ème}$	$8^{ème}$	$10^{ème}$	$12^{ème}$	$14^{ème}$	$16^{ème}$
Charge 1	Avec arc	73.4	75.6	74.1	63.8	52.3	46.1	35.4
	normal	6.9	3.3	2.4	2.3	2.2	1.7	1.6
Charge 2	Avec arc	10.3	6.8	2.4	1.7	0.86	0.48	0.22
	normal	2.4	0.078	1.3	1.1	0.35	0.17	0.27
charge 3	Avec arc	155.4	146.7	100.4	80.4	58.7	35.6	47.1
	normal	0.24	2.1	1.6	1.1	3.2	2.0	1.3
Charge 4	Avec arc	20.1	25.3	18.0	15.2	14.1	8.0	10.0
	normal	6.8	5.6	8.0	5.5	8.9	8.5	3.7

Tableau 3.3. Harmoniques paires

3.4.4 Inter-Harmoniques

Nous avons regroupé dans le Tableau 3.4 l'évolution de l'amplitude des inter-harmoniques (25, 75, 125,… 625 Hz) [75, 83] pour les différentes charges à partir des figures 3.16, 3.17, 3.18 et 3.19. Les résultats montrent une augmentation des valeurs de leurs amplitudes en présence d'un arc électrique. Cette augmentation est principalement liée à des variations rapides du courant [98] lors de la production d'arcs. C'est le cas par exemple, lors de l'allumage de l'arc, quand se produit un changement rapide du courant lie au passage d'un état de non conduction à un autre de conduction sur un cycle répétitif et aléatoire de chaque période.

Charges		Valeurs des Inter harmoniques (Hz)						
		25	75	125	175	225	275	325
Charge 1	Avec arc	67.9	54.0	64.8	43.3	71.4	39.0	72.0
	normal	3.8	7.0	3.2	1.7	1.4	0.3	1.1
Charge 2	Avec arc	17.1	7.1	6.5	3.2	3.7	1.7	3.1
	normal	0.71	0.37	0.16	0.17	0.13	0.054	0.033
Charge 3	Avec arc	167.2	129.7	94.6	142.4	88.0	105.9	47.6
	normal	1.3	1.2	0.82	0.69	0.51	0.25	0.23
Charge 4	Avec arc	26.7	21.4	24.8	25.4	19.9	24.5	15.6
	normal	4.4	1.8	1.2	2.2	2.3	2.2	2.6

Tableau 3.4. Inter-harmoniques

- **Observations:**

  Hanzelka [99] a présenté les principales causes de l'apparition des inter-harmoniques :

  - Changement rapide du courant,
  - Régime transitoire du courant,…
  - Commutation asynchrone de dispositifs semi-conducteurs en conversion statique (convertisseurs par modulation de largeur d'impulsion (PWM)).

  Les principales sources de génération d'inter-harmoniques sur le courant sont:

  – Défaut d'arc électrique
  – Commandes électriques de charge variable
  – Moteurs électriques
  – Convertisseurs statiques (convertisseur de fréquence)
  – Onduleurs
  – Transformateur électronique (électronique de commutation)

D'après ces observations, une limitation à cette méthode est l'apparition d'inter-harmoniques liées aussi bien à la présence d'un défaut d'arc électrique qu'à certains types de charges (convertisseur, onduleurs…) pouvant entrainer des risques de fausse détection.

3.4.5 Fréquences entre 2 kHz et 5 kHz.

Les figures 3.20, 3.21, 3.22 et 3.23 montrent le spectre du courant dans la bande de fréquence 1 kHz - 20 kHz pour les 4 types de charge du Tableau 3.2.

D'après les figures 3.20 et 3.23 (cas d'une charge avec une caractéristique fortement résistive) lors de la production d'un arc, les amplitudes des harmoniques dans la bande de fréquences 2 – 5 kHz ont augmenté.

Pour les charges 2 et 3 (figures 3.21 et 3.22) fortement inductive les différences entre les amplitudes des harmoniques du courant avec arc et en fonctionnement normal sont très difficiles à distinguer.

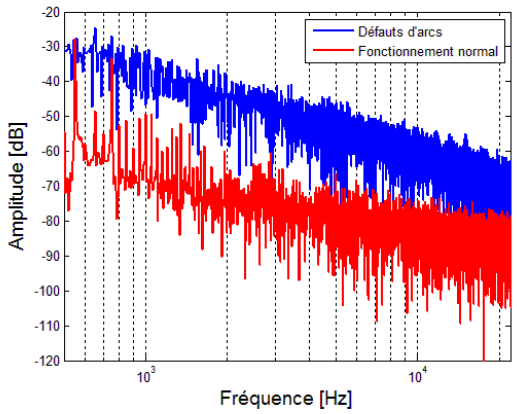


Figure 3.20. Bande de fréquence entre 1 kHz et 20 kHz pour la charge 1

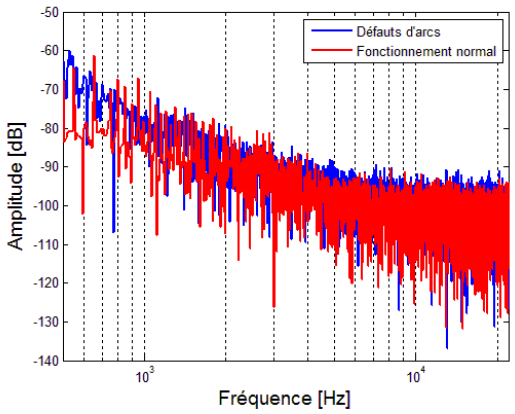


Figure 3.21. Bande de fréquence entre 1 kHz et 20 kHz pour la charge 2

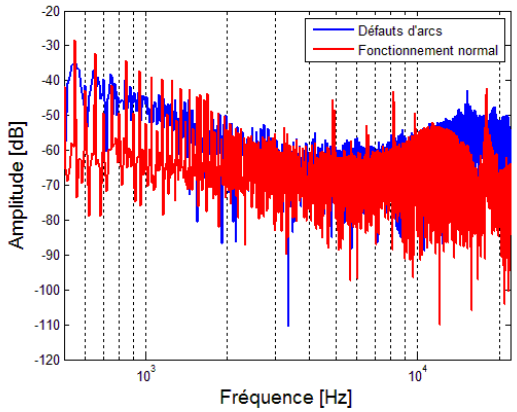


Figure 3.22. Bande de fréquence entre 1 kHz et 20 kHz pour la charge 3

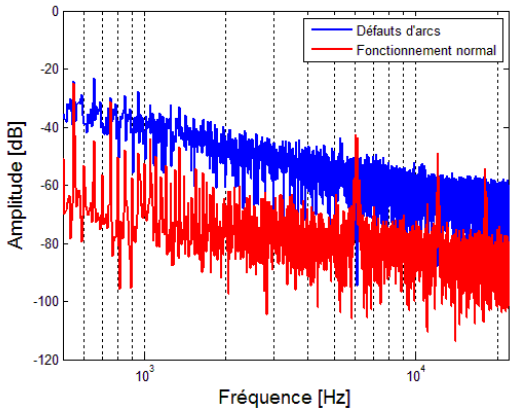


Figure 3.23. Bande de fréquence entre 1 kHz et 20 kHz pour la charge 4

En conclusion, la détection de défauts d'arcs basée sur l'analyse de la bande de fréquence 2 kHz - 5 kHz est possible si les charges sont résistives.

3.4.6 Bande de fréquence centrée autour de 22 MHz.

Restrepo [62, 97] ainsi que Martel et al [95] présentent une méthode de détection basée sur l'analyse de l'énergie de l'arc, il propose de détecter la présence d'un arc en se concentrant sur le bruit haute fréquence dans une bande centrée autour de 22 MHz et de largeur 300 kHz en utilisant un transformateur toroïdal à ferrite.

La Figure 3.24 présente le circuit de test pour effectuer la mesure du bruit en haute fréquence à l'aide du transformateur toroïdal centrée à la bande de fréquence autour de 22 MHz.

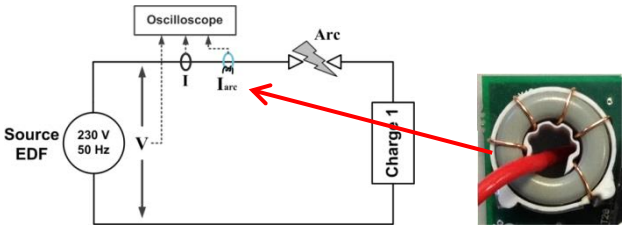


Figure 3.24. Circuit de test et transformateur toroïdal.

Pour chacune des figures suivantes nous représentons le courant d'arc ainsi que le signal obtenu à la sortie du transformateur toroïdal. Les figures 3.25, 3.27, 3.29 et 3.31 présentent les résultats obtenus en présence d'arcs et les figures 3.26, 3.28, 3.30 et 3.32 en fonctionnement normal.

L'analyse de différentes courbes montre que la méthode donne de bons résultats, l'apparition de pics est liée à celui d'un arc électrique. Deux instants peuvent être observés : le démarrage de l'arc (ignition) et l'extinction de l'arc. Le passage par zéro du courant sépare ces deux instants.

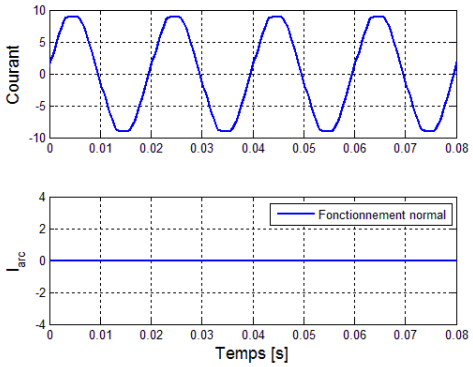


Figure 3.25. Sans arc - charge 1

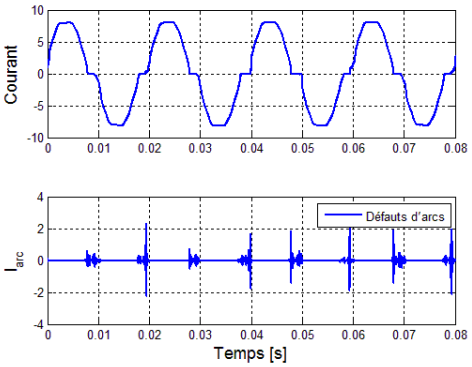


Figure 3.26. Avec arc - charge 1

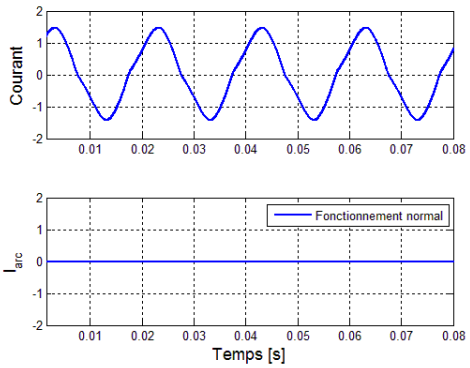


Figure 3.27. Sans arc - charge 2

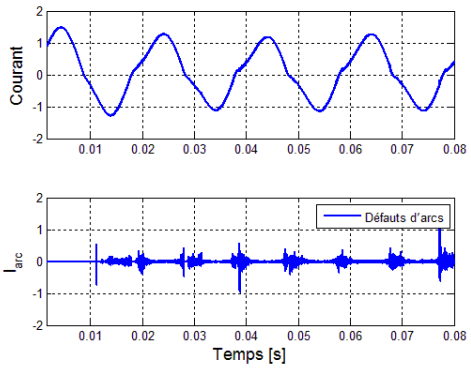


Figure 3.28. Avec arc - charge 2

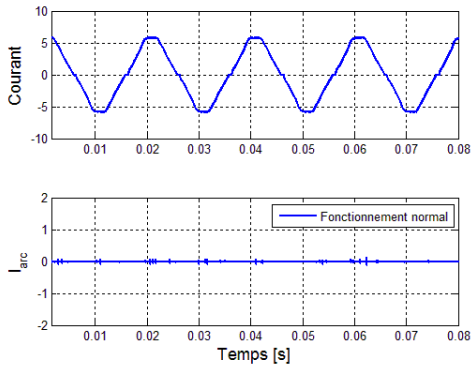


Figure 3.29. Sans arc - charge 3

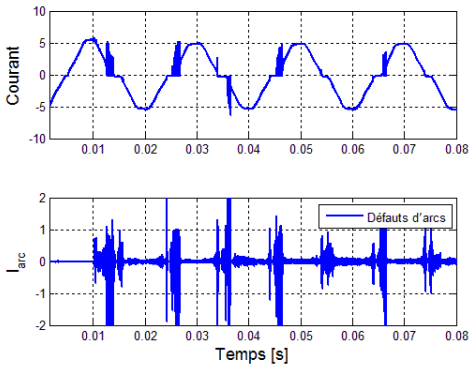


Figure 3.30. Avec arc - charge 3

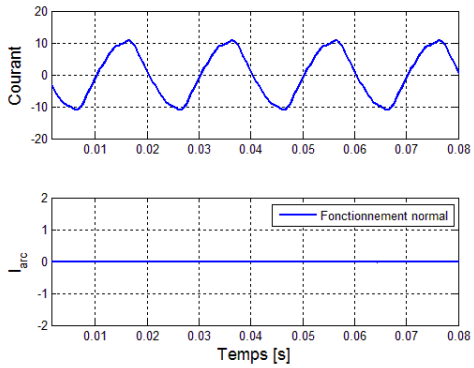


Figure 3.31. Sans arc - charge 4

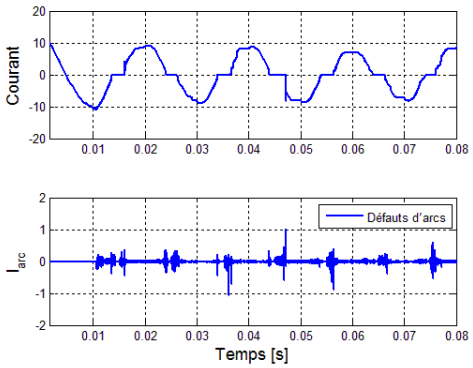


Figure 3.32. Avec arc - charge 4 à 22MHz

Observations : Malgré les bons résultats de la technique de détection de défaut d'arc, certaines charges qui présentent du bruit à des bandes très proches de cette bande de détection, peuvent occasionner des erreurs de détection. C'est le cas des dispositifs à base de Courants Porteur en Ligne (CPL) utilisés pour la transmission de données numériques à haut débit sur le réseau électrique. Le CPL fonctionne dans la gamme de fréquence 1.6 - 30 MHz, et peut donc être responsable d'erreurs de détection.

3.4.7 Analyse fréquentielle de la tension

Ayant remarqué une variation aléatoire de la tension pendant l'occurrence d'un défaut d'arc série, Dae Won Park [86] propose la détection d'un défaut d'arc électrique série basée sur l'analyse des composantes hautes fréquences de la tension AC. L'auteur propose l'utilisation d'un filtre passe-haut avec une fréquence de coupure de 3 kHz en utilisant aussi un algorithme de déphasage pour éliminer les composantes périodiques de la tension AC.

Cet algorithme est basé sur le principe de périodicité d'une charge en fonctionnement normal et du comportement chaotique de l'arc. Néanmoins, d'autres auteurs proposent différentes fréquences de coupure telles que 1 kHz, 10 kHz [21], etc.

La Figure 3.33 montre les signaux de la tension avec défauts d'arcs et en fonctionnement normal de la charge. Nous pouvons remarquer qu'il n'existe pas de changement visible entre les deux signatures. La Figure 3.34 présente l'analyse fréquentielle de la tension pour une période. Il est visible qu'il n'existe pas une grande différence entre les deux spectres.

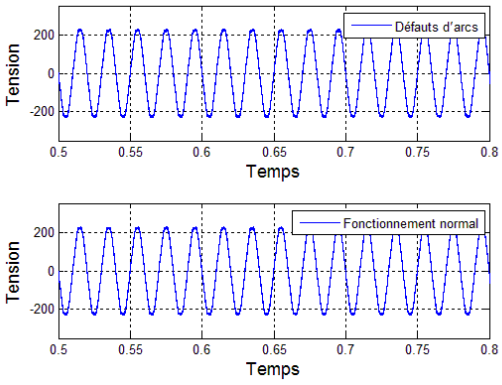


Figure 3.33. Tension avec et sans arc.

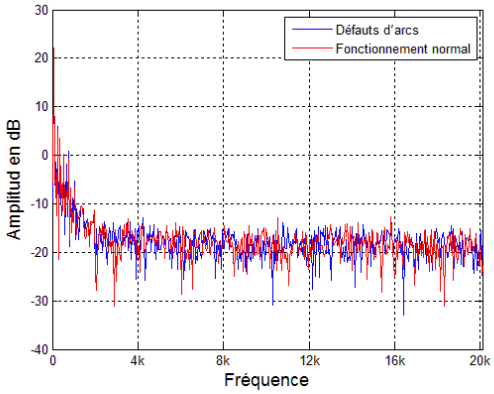


Figure 3.34. Analyse fréquentielle de l'arc.

Nous avons testé cet algorithme sur une charge résistive. La Figure 3.35 montre le résultat du test de la méthode basée sur le filtrage de la tension. Cette méthode utilise un filtre passe-bande de 3 kHz pour la tension puis le calcul de l'énergie dans cette bande de fréquence. Les résultats sont très aléatoires, il n'y a pas une différence claire entre le cas de défauts d'arcs et en fonctionnement normal. Donc, il n'est pas possible d'établir un seuil de détection pour différencier un défaut d'arc électrique.

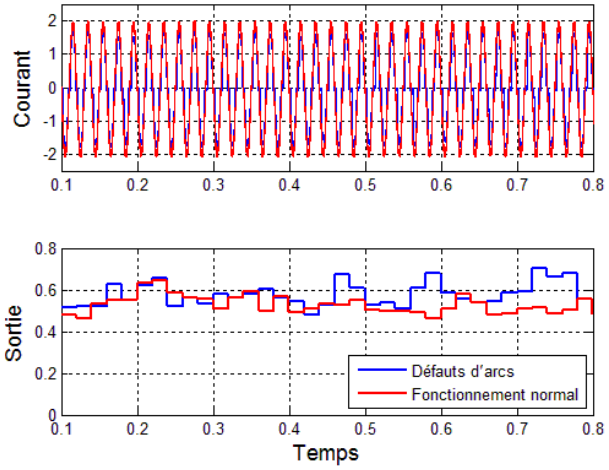


Figure 3.35. Réponse de la méthode basée sur le filtrage de la tension

3.4.8 Détection des arcs série par analyse fréquentielle du 5ème Harmonique.

N. Hadziefendic et al [69] ont observé que l'amplitude du 5ème harmonique pour le cas d'un défaut d'arc électrique série augmente par rapport au niveau obtenu pour une charge en fonctionnement normal. Ces variations se produisent également pour une charge non linéaire (aspirateur, lampe fluorescente, etc…) mais ont des valeurs moins importantes. Toutefois, la présence d'un niveau élevé de l'amplitude du 5ème harmonique dans certains appareils électroménagers tel que le micro-onde rend la détection de l'arc difficile.

La Figure 3.36 montre le diagramme de la méthode de détection basée sur l'analyse du 5ème harmonique [54, 69, 79].

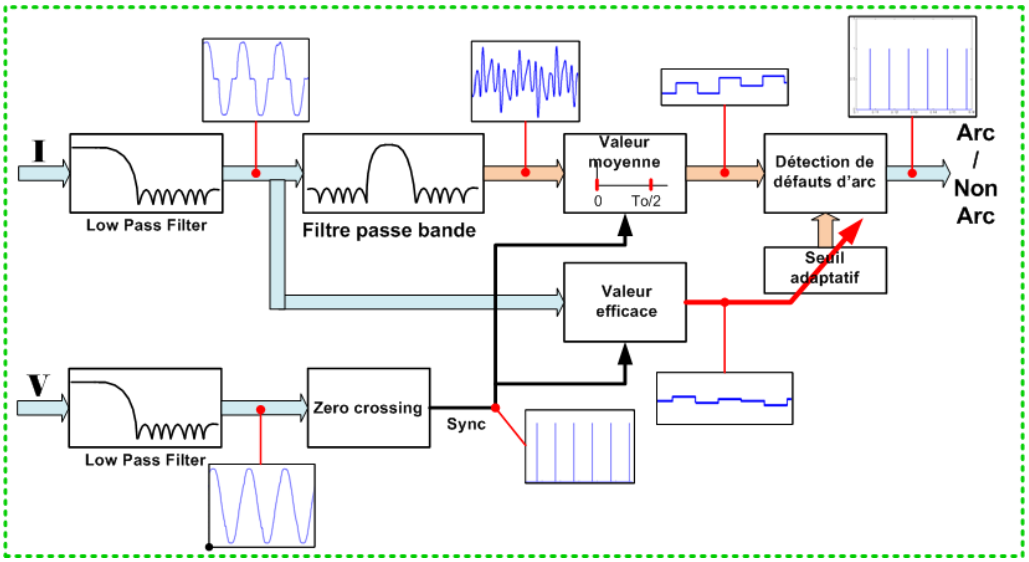


Figure 3.36. Schéma fonctionnel de la méthode basée sur le 5ème harmonique

Les étapes à suivre dans cette méthode de détection d'un défaut d'arc série sont :

- Étape 1 : Mesure du courant de ligne.
- Étape 2 : Extraction du 5ème harmonique (250 Hz) du courant.
- Étape 3 : Calcul de la valeur moyenne de l'amplitude du 5ème harmonique du courant.
- Étape 4 : Adaptation du seuil de détection en fonction de la valeur efficace du courant d'entrée (réglage de plusieurs seuils pour chaque plage du courant).
- Étape 5 : Comparaison de la valeur moyenne du 5ème harmonique avec le seuil de détection.
- Étape 6 : Prise de décision finale pour l'ouverture d'un système de disjonction.

La Figure 3.37 présente la signature de courant d'une charge résistive avec défauts d'arc ainsi que les signaux obtenus à l'étape 5. L'amplitude du 5ème harmonique du courant est supérieure au seuil prédéfini, donc un signal de détection d'arc sera activé.

La Figure 3.38 présente la signature du courant en fonctionnement normal ainsi que les signaux obtenue à l'étape 5. Si on observe dans le cas d'un signal sans arc, l'amplitude du 5ème harmonique ne dépasse pas le seuil défini.

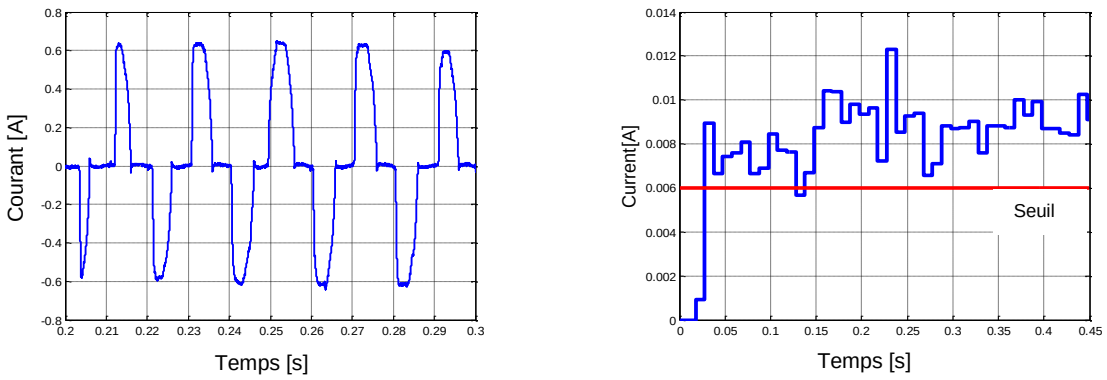


Figure 3.37. Charge résistive en présence d'un arc

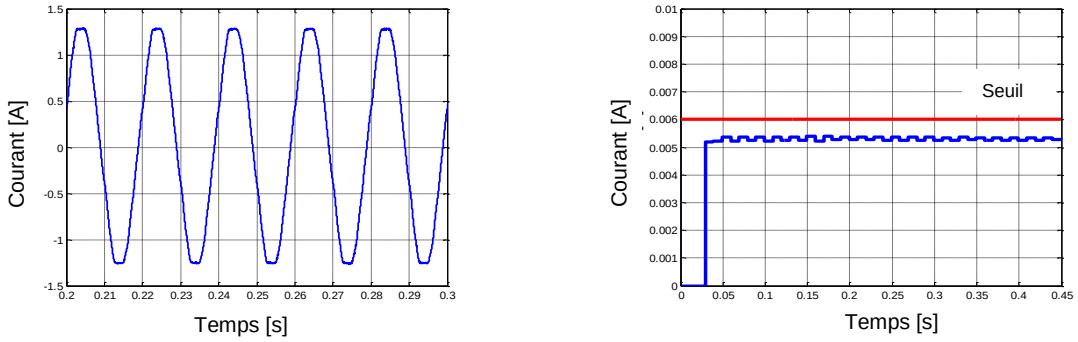


Figure 3.38. Charge résistive en fonctionnement normal

3.5 Analyses temporelles et statistiques

3.5.1 Dérivée du courant

Certains auteurs ont proposé des méthodes de détection de défauts d'arcs électriques basées sur l'analyse du changement de régime du signal en utilisant la dérivée [75, 100, 101]. Cette méthode correspond à la détection d'une discontinuité qui se manifeste par une variation de niveau (Figure 3.39) qui peut être observée par le comportement de la dérivée. Le passage du courant d'un état quasi statique à un régime variable constitue un indicateur plus fiable et moins ambigu de l'amorçage et du maintien d'un arc.

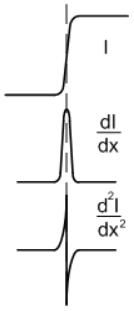


Figure 3.39. Détection de discontinuité

Si on considère une fonction y(x) définie sur un intervalle de N valeurs discrètes $0 < x < N$. Le signal y(x) est échantillonné périodiquement aux instants $x_k=kT$. Le pas de $T = x_{i+1} - x_i$. L'estimation de la première dérivée numérique [101] de y(x) au point x est décrite par l'équation ci-dessous :

$$y'(x) \approx \frac{y(x_1) - y(x_0)}{x_1 - x_0}, \quad x \in [x_0, x_1] \qquad (16)$$

L'expression de la dérivée [102] d'ordre 1, obtenue en considérant les échantillons k et k-1 (Figure 3.40), est la suivante :

$$y'(x_k) = \frac{y(x_k) - y(x_{k-1})}{T} + \mathcal{O}(T) \qquad (17)$$

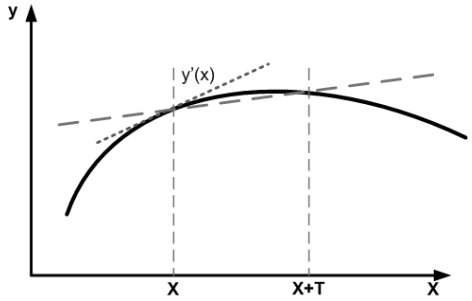


Figure 3.40. Détermination de la dérivée

Nous avons préféré utiliser la dérivée avec une équation de différence centrée d'ordre 2 pour y'(x) selon l'équation suivante:

$$y'(x_k) = \frac{y(x_{k+1}) - y(x_{k-1})}{2T} + \mathcal{O}(T^2) \qquad (18)$$

En effet, pour la différence d'ordre 1, l'erreur varie linéairement par rapport à T et par contre pour la différence d'ordre 2 la différence varie comme T^2. Donc pour une fonction « y » suffisamment lisse et pour un petit pas T donné, la différence d'ordre 2 donnera généralement une erreur plus petite.

Par contre, le problème majeur de la méthode basée sur la dérivée est sa sensibilité aux bruits de mesure.

3.5.1.1 Principe de détection

La méthode de calcul de la dérivée présentée est basée sur la détection du changement rapide du courant. La théorie indique qu'un arc électrique est produit lorsque la tension atteint un niveau suffisant pour faire claquer l'isolant (tension de restrike). Le courant électrique à cet instant effectue un changement rapide correspondant au passage d'une zone plate (courant égal à zéro) à une zone de conduction (proportionnel à la relation de la tension et l'impédance) (Figure 3.41).

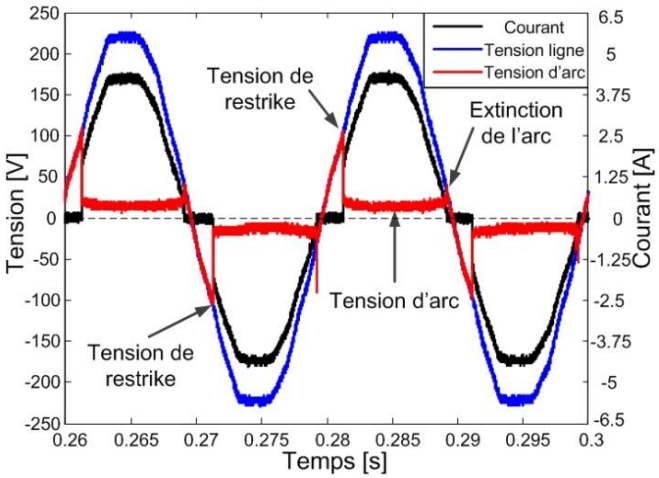


Figure 3.41. Caractéristique tension - courant de l'arc

Phipps [75] propose de réaliser la détection de défauts d'arcs en mesurant le champ magnétique du courant généré par l'arc avec un capteur basé sur une antenne en ferrite. Afin

de détecter le changement du régime du courant, le signal est appliqué à un dérivateur algébrique de 3ème dégré (la 3ème dérivée). L'algorithme capture les transitions rapides associées à l'arc.

Pour notre cas, la méthode présentée est basée sur le calcul de la dérivée 3ème de la signature du courant. La dérivée troisième a été choisie pour obtenir de façon fiable les transitions rapides du courant lors de la production d'un défaut d'arc. La première dérivée donne les variations dues à un changement de la forme d'onde, mais celles-ci, ne sont pas très importantes. Les résultats obtenus montrent que la variation est plus prononcée lors du calcul de la dérivée troisième.

La 3ème dérivée est obtenue à partir de l'équation (19).

$$y'''(x_k) = \frac{y(x_{k+2}) - 3 * y(x_{k+1}) + 3 * y(x_{k-1}) - y(x_{k-2})}{T^3} \qquad (19)$$

3.5.1.2 Résultats sous Matlab

Pour l'étape d'analyse, les essais seront réalisés avec des signaux réels enregistrés à une fréquence d'échantillonnage de 5 kHz.

La Figure 3.42 et la Figure 3.43 montrent les résultats obtenus pour le calcul de la dérivées 3ème sur le courant avec l'équation (19) pour une charge résistive.

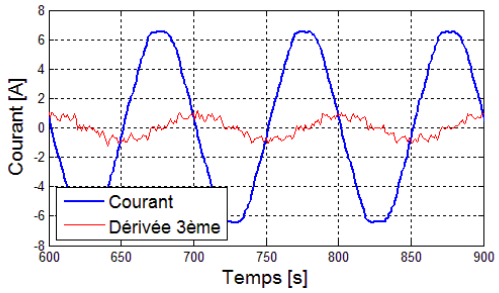


Figure 3.42. 3ème dérivée du courant sans arc

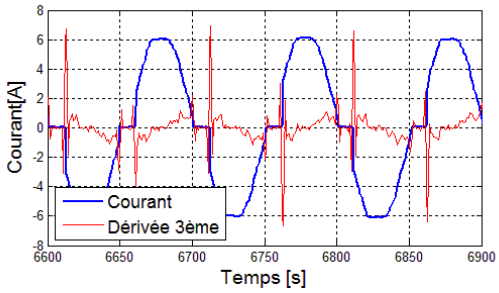


Figure 3.43. 3ème dérivée du courant avec arc

La Figure 3.44 présente les résultats obtenus avec la charge de type gradateur. Les signaux en fonctionnement normal et en présence d'un arc électrique sont quasiment identiques, la détection basé sur le calcul de la 3ème dérivée ne permet pas de détecter la présence d'un arc électrique.

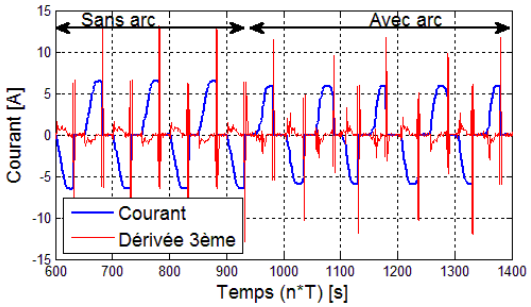


Figure 3.44. 3ème Dérivée du courant pour une charge de type gradateur

L'arc électrique est un phénomène qui présente un caractère fortement chaotique (non répétitif entre deux périodes consécutives) [34, 103] lié à des conditions d'apparition de la

décharge par influence de la nature des électrodes, la température, la pression, la composition de l'isolant (gaz, câble, etc…) et aussi par le type de charge.

Nous avons alors choisi de calculer la variation des valeurs obtenues par le calcul de la dérivée 3ème du courant entre deux périodes consécutives [103] selon l'équation (25).

$$Diff_{3eD} = [C_{3eD}(i) - C_{3eD}(i-N)] \qquad (20)$$

Où :

- C_{3eD} sont les valeurs de la dérivée 3ème
- N est le nombre d'échantillons par période

La Figure 3.45 présente les résultats obtenus à partir de l'équation (20).

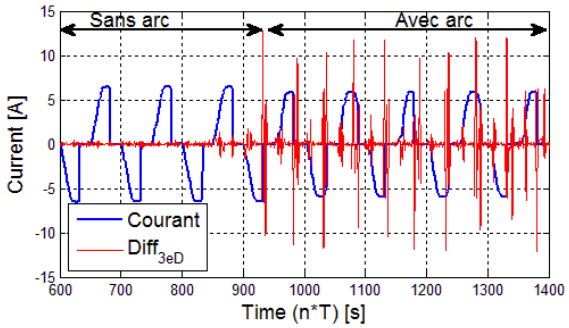


Figure 3.45. $Diff_{3eD}$ pour une charge de type gradateur

Les résultats obtenus lors des tests réalisés avec 4 types de charges (résistive, aspirateur, type gradateur et charge de masquage (résistance en parallèle avec un gradateur)) sont présentés dans les figures suivantes :

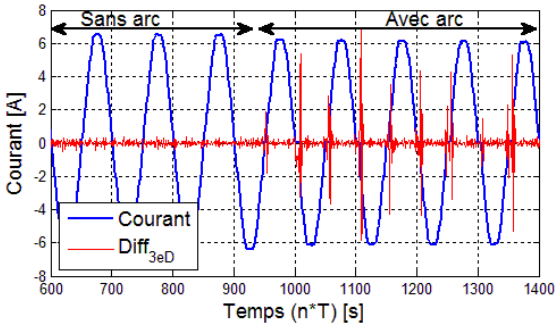


Figure 3.46. $Diff_{3eD}$ pour une charge résistive

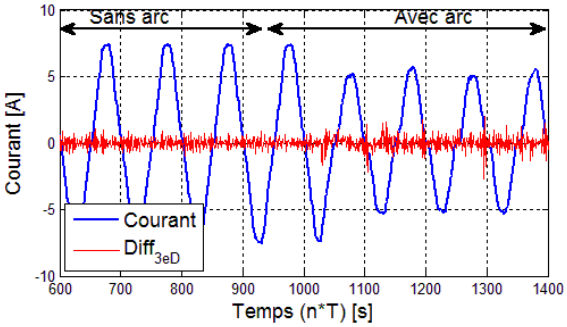


Figure 3.47. $Diff_{3eD}$ pour une charge de type moteur (aspirateur)

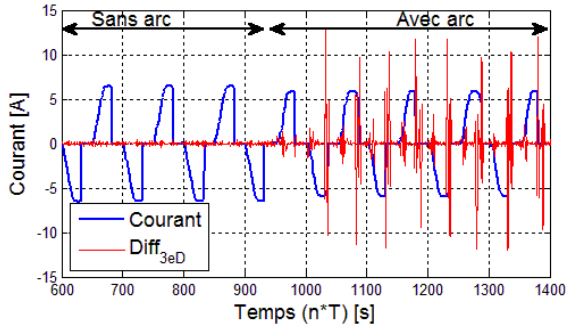


Figure 3.48. $Diff_{3eD}$ pour une charge de type gradateur

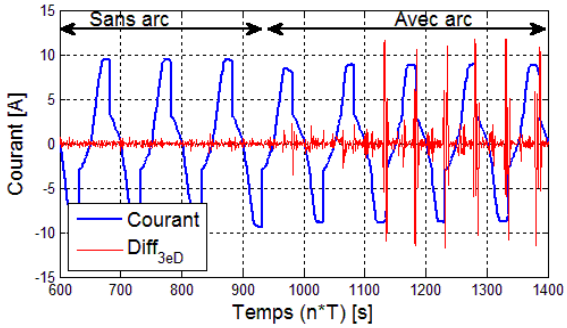


Figure 3.49. $Diff_{3eD}$ pour une charge masquage (résistance – arc - gradateur)

Malgré les bons résultats obtenus, la méthode reste sensible aux bruits, aux variations relatives aux phénomènes de la ligne pouvant perturber la signature du courant d'arc et aussi aux perturbations propres à la charge. Les résultats peuvent donc conduire à des fausses détections de défaut d'arc ou à des non-détections, notamment dans le cas d'une charge de type moteur – aspirateur (Figure 3.47).

3.5.2 Analyse du passage à zéro du courant

La Figure 3.50 présente la signature caractéristique d'un défaut d'arc électrique (courant et tension). La tension d'arc est nulle lorsqu'il n'y a pas de défaut d'arc (opération normale). Au contraire, lors de la présence d'un arc électrique, la tension d'arc varie et devient de forme carré. De même, on remarque la présence dans le courant d'une zone présentant un plateau de non-conduction. Lorsque la tension atteint sa valeur maximale, tension de re-strike, le courant commence à conduire. Le passage de courant s'arrête lors du passage par zéro (extinction de l'arc puis ré-allumage).

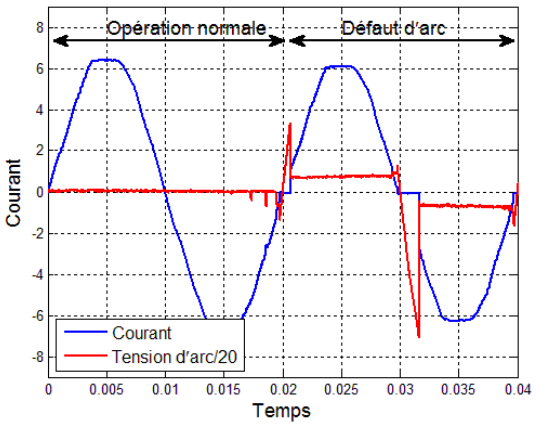


Figure 3.50. Courant et tension en présence d'un défaut d'arc

Cette méthode est basée sur l'analyse des variations du courant lors du passage par zéro et l'évaluation de la durée de non conduction du courant lors de la production d'un arc électrique.

La méthode est décrite par l'algorithme suivant :

$$if\ [I(t) = 0\ \pm\ S]\ \ then\ \ Nbp = Nbp + 1;\ end \qquad (21)$$

Où :

- S est le seuil du bruit fixé à 0.05.
- Et I(t) représente le courant.

La méthode a été implémentée sous Matlab et testée pour deux types de charges. La Figure 3.51 présente le courant pour une charge résistive en deux états ; fonctionnement normal et en présence de défaut d'arc.

La Figure 3.52 présente le résultat de la méthode pour le courant de la Figure 3.51 par demi-période. Lorsqu'il existe un défaut d'arc, Nbp augmente fortement traduisant la présence de zones de non conduction importantes.

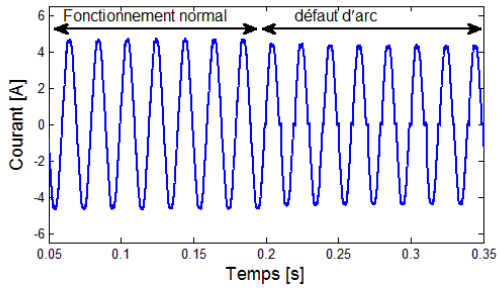


Figure 3.51. Courant de charge résistive

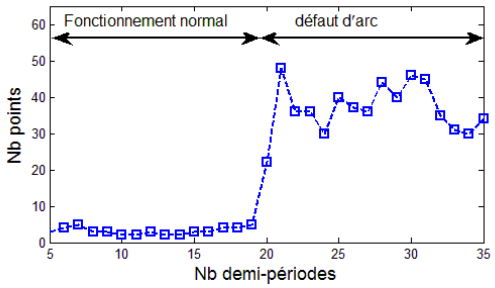


Figure 3.52. Calcul de Nbp pour chaque demi-période

La Figure 3.53 montre le courant pour une charge de type gradateur, en fonctionnement normal puis en présence de défauts d'arcs. Les résultats du calcul de Nbp sont présentés sur la Figure 3.54. Les zones de non conduction du courant du gradateur sont détectées lors du fonctionnement normal, lors de la présence d'arcs cette valeur tend à augmenter et varie de façon aléatoire.

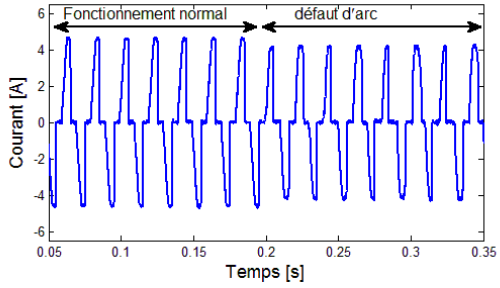


Figure 3.53. Courant pour une charge de type gradateur

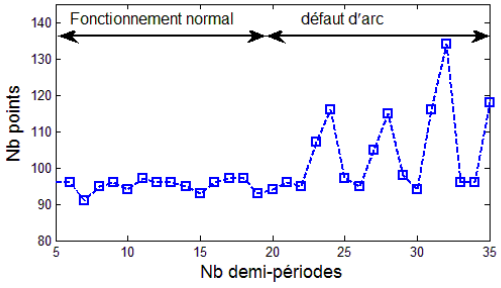


Figure 3.54. Calcul de Nbp pour chaque demi-période.

3.5.3 Analyse de la périodicité du signal

La méthode appelée somme de différences (SDI) proposée par Daqing Hou [103] est principalement basée sur la différence de la forme du courant entre deux périodes

consécutives. De par le coté aléatoire de l'arc, cette différence sera différente de zéro uniquement pour une charge en présence d'un arc électrique.

Ces deux équations décrivent la méthode :

$$DI_k = I_k - I_{k-Nspc} \quad (22)$$

$$SDI_k = \sum_{n=1}^{N_S} DI_{k-n} \quad (23)$$

Où :

- I_k est le courant
- N_{spc} est le nombre d'échantillons par période du courant
- N_s est une valeur égale à 8 (défini par l'auteur).

La Figure 3.55 présente le diagramme pour le calcul de la méthode.

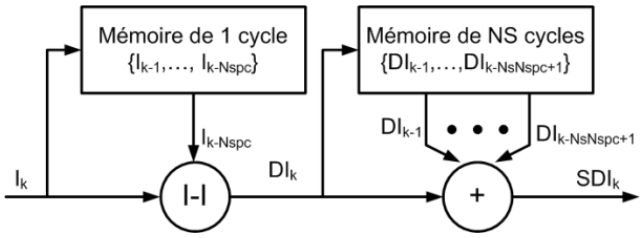


Figure 3.55. Méthode somme de différences [103]

La Figure 3.56 et la Figure 3.57 montrent les résultats du test de cette méthode de détection « somme des différences » pour le cas d'une charge résistive en fonctionnement normal et avec un arc électrique.

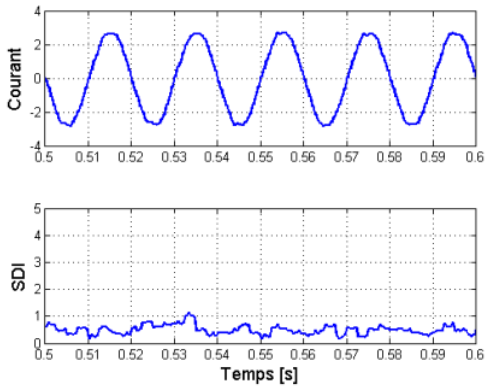


Figure 3.56. SDI (charge résistive)

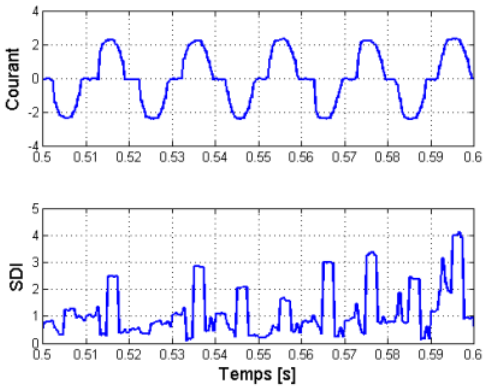


Figure 3.57. SDI (charge résistive + arc)

La Figure 3.58 et la Figure 3.59 montrent les résultats pour une charge de type gradateur. Dans le cas d'un signal sans arc, les valeurs de SDI restent comprises entre 0 et 1, mais pour le cas du courant avec défaut d'arcs, les valeurs de SDI fluctuent fortement attestant la présence d'un arc.

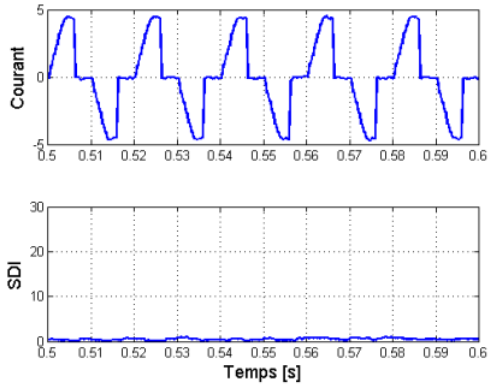


Figure 3.58. SDI (charge gradateur)

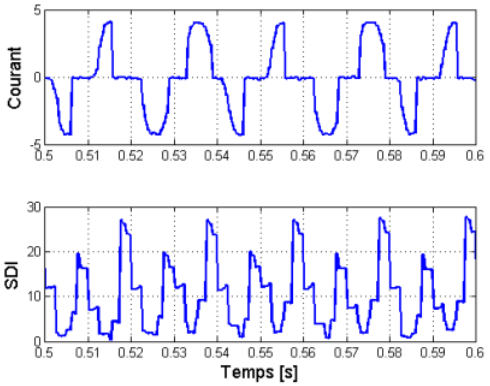


Figure 3.59. SDI (charge gradateur + arc)

3.5.4 Calcul des moments statistiques d'ordre k (valeur moyenne, variance, écart type)

Par définition, le moment centré d'ordre k d'une variable aléatoire est calculé comme suit [104, 105] :

$$m_1 = \mu = \sum_{i=1}^{n} p_i(x_i) \qquad (24)$$

$$m_2 = \sigma^2 = \sum_{i=1}^{n} p_i(x_i - m_i)^2 \qquad (25)$$

$$m_k = \sum_{i=1}^{n} P_i \left[\frac{x_i - \mu}{\sigma}\right]^k, k > 2 \qquad (26)$$

Nous avons procédé au calcul des moments d'ordre 1 à 4 (Figure 3.60) sur le courant principalement pour une charge résistive en suivant les étapes suivantes :

- Calcul de la valeur normalisée du courant (N échantillons par période).
- Calcul du moment d'ordre 1 pour N/2 échantillons.
- Après un délai de N/2 échantillons, nous calculons les moments d'ordre 2, 3 et 4.

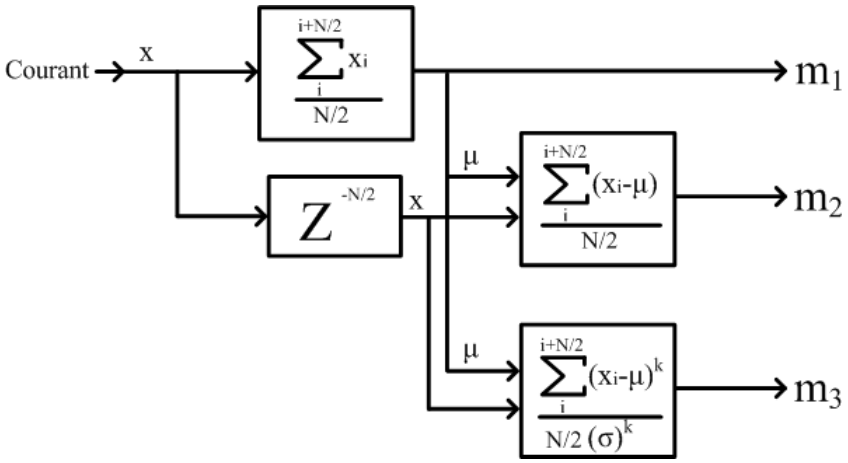


Figure 3.60. Calcul de moments d'ordre 1 à 4

La Figure 3.62 présente les résultats obtenus lors de l'analyse des différentes signatures du courant d'arc avec la méthode des moments d'ordre 1 et 2.

Les valeurs obtenues pour la moyenne sont stables (0.65) en fonctionnement normal mais cette valeur baisse et fluctue (autour de 0.5) dans le cas en présence d'un arc électrique. Pour le cas du moment d'ordre 2, le calcul met en évidence les variations qui existent entre chaque période dues à la présence d'arcs.

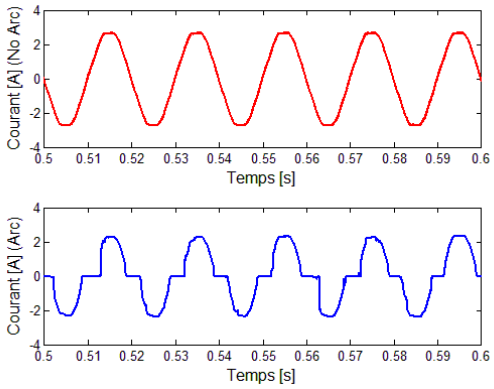


Figure 3.61. Courant d'une charge résistive.

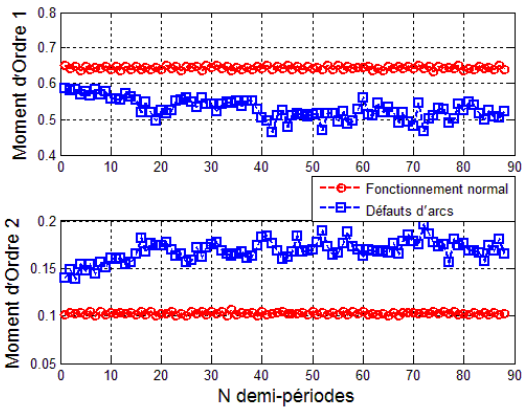


Figure 3.62. Moment d'ordres 1 et 2

À partir des résultats, nous pouvons observer que les résultats obtenus ont une réponse constante et presque invariable pour les différents moments dans le cas du courant en fonctionnement normal. Par contre pour le courant en présence de défauts d'arcs la réponse des valeurs du moment d'ordres sont très variables, ceci est dû aux états aléatoires de l'arc.

3.5.5 Méthode basée sur la corrélation

Certains auteurs ont présenté différentes méthodes de détection basées sur la corrélation. Par exemple Zoko et al [106] présentent l'analyse du coefficient d'autocorrélation pour un signal de courant d'arc mesuré par une antenne, pour l'analyse des arcs en haute tension. Une approche pour la détection de l'arc a été présentée dans la thèse du

Arunachalam[107] qui propose d'utiliser l'autocorrélation sur le courant AC ou DC pour la détection d'arc. Parker et al [108] ont proposé une méthode basée sur la corrélation entre di/dt du courant et celle de la valeur absolue du courant. La méthode présentée par Rajamani [109] s'appuie sur l'étude de similarité entre deux signaux aléatoires (le signal du courant et différents cas de défauts) en utilisant l'autocorrélation pour la détection de défauts dans les transformateurs et l'identification des défaillances. Une autre méthode de l'autocorrélation pour la détection de défaut d'arc a été présentée par Rabla et al [80], pour la détection du déclenchement et la localisation d'un arc série en courant DC par analyse du signal en radio fréquence RF en utilisant deux capteurs de type Rogowski.

Notre approche basée sur le calcul du coefficient de corrélation est basée sur l'observation de la différence des formes d'onde du courant en fonctionnement normal et en présence d'un arc électrique.

Le coefficient de corrélation (r) (Bravais - Pearson) [110] est décrit dans l'équation (27).

$$r_{XY} = \frac{\sum_{i=0}^{N}(X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=0}^{N}(X_i - \bar{X})^2).(\sum_{i=0}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2)}} \qquad (27)$$

Où :

- X est la variable motif
- Y est la variable à prédire
- N est le nombre d'échantillons
- r_{XY} est la relation linaire du coefficient de corrélation.

Dans la méthode que nous avons mise au point, nous procédons à la comparaison de la forme du courant d'une période à la suivante. Cette comparaison est réalisée par le calcul du coefficient de corrélation suivant la formule précédente. En fonctionnement normal la signature du courant sera identique entre chaque période (le coefficient de corrélation sera égal à 1). La variabilité d'un arc d'une période à autre va conduire à une valeur inférieure à 1 pour le résultat de la corrélation.

La Figure 3.63 montre le principe de la méthode de détection et le calcul du coefficient de corrélation sur le courant pour une charge résistive (Figure 3.64).

Les résultats obtenus pour 4 types de charges sont présentés dans les figures 3.65, 3.66, 3.67 et 3.68. On observe que pour le courant en présence d'arcs, le coefficient de corrélation a une valeur aléatoire et inférieure à 1. Pour certains cas tels que la résistance, l'aspirateur et la charge de masquage, la valeur du coefficient de corrélation est très proche de 1 en présence d'arcs. En raison de ces caractéristiques, le seuil de détection doit être placé à environ 0.9998. Ces valeurs du coefficient de corrélation sont liées à la similarité de la forme d'onde du courant sinusoïdal entre deux périodes consécutives (environ 80 %) qui rend la détection de l'arc par cette méthode très délicate.

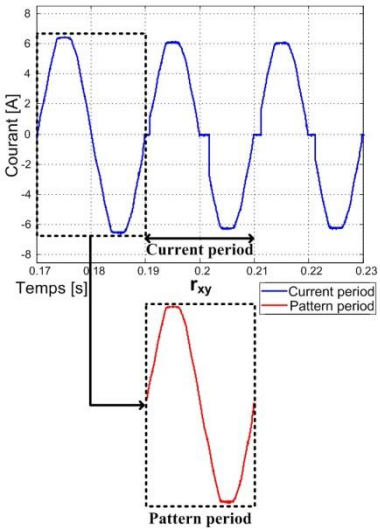


Figure 3.63. Méthode coefficient de Corrélation.

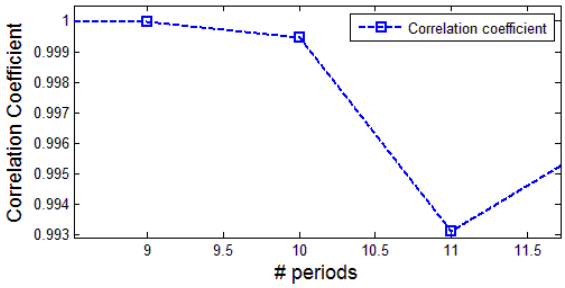


Figure 3.64. Résultat de la méthode coefficient de corrélation.

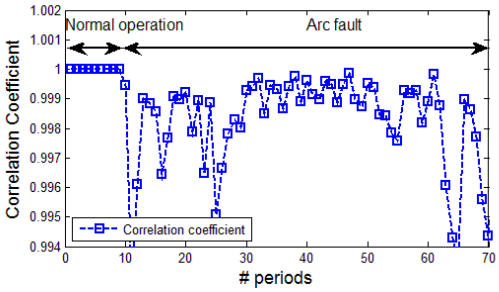


Figure 3.65. Coefficient de corrélation pour une charge résistive

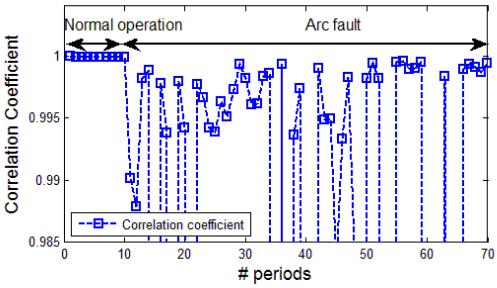


Figure 3.66. Coefficient de corrélation pour une charge de type moteur - aspirateur

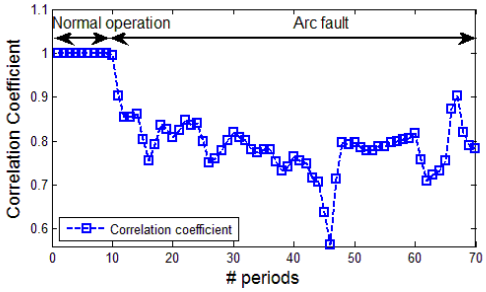


Figure 3.67. Coefficient de corrélation pour une charge de type gradateur

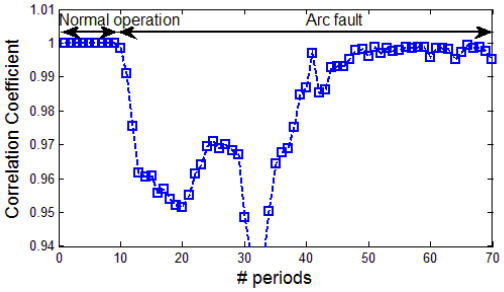


Figure 3.68. Coefficient de corrélation pour une charge de masquage (résistance – arc - gradateur)

3.6 Méthode combinée proposée par C. Kim

Dans son étude (ASD –Arc/spark detector) Charles Kim [21] propose une méthode de détection basée sur les observations suivantes :

- Une étincelle génère un bruit haut fréquence.
- La valeur RMS du courant avec un arc en série est inférieure à celle obtenue en fonctionnement normal.
- L'arc peut être instable ou court.
- La tension d'arc a une forme quasi rectangulaire.
- Présence d'un bruit haute fréquence sur le courant et la tension.

Kim propose alors une méthode de détection basée sur les 5 critères suivants :

- Analyse du courant en haute fréquence.
- Calcul de la valeur RMS du courant.
- Calcul de la valeur RMS de la tension.
- Analyse de la tension en haute fréquence.
- Filtrage du courant entre 180 et 300 Hz.

Nous avons testé la méthode proposée par C. Kim [21] en ajoutant un critère basé sur l'analyse des composantes basses fréquences du courant [79]. La Figure 3.69 montre le diagramme de la méthode de détection basée sur 5 critères.

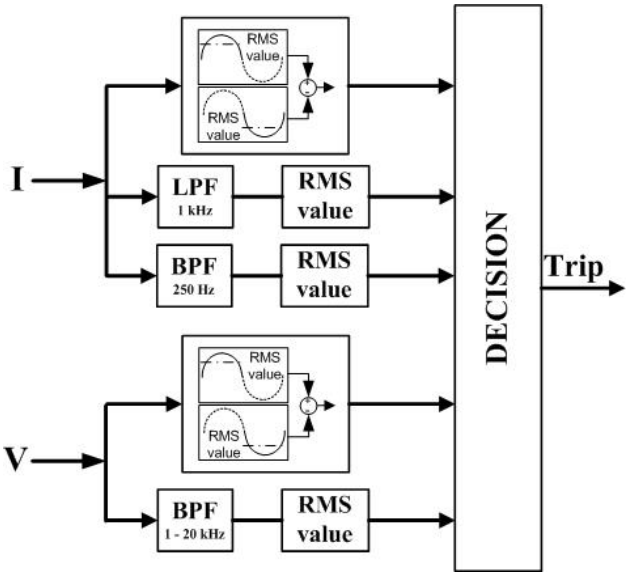


Figure 3.69. Méthode combinée

Les 5 critères ont les caractéristiques suivantes :

- Calcul de l'amplitude du courant (Ip) : la méthode évalue la variation de la valeur RMS du courant entre deux périodes consécutives.
- Analyse en basse fréquence du courant (Ilf) : la valeur RMS de la bande de fréquences entre 0 et 1 kHz est mesurée.

- Analyse du 5ème harmonique (I5h) : mesure de la valeur RMS pour le 5ème harmonique du courant.
- Analyse de la variation de la tension (Vp) : calcul de la valeur moyenne de la tension pour chaque demi-période. L'objectif est de calculer la variation de la tension due à la surtension ou à un arc parallèle.
- Analyse de la tension en haute fréquence (V_{HF}) : la méthode porte sur le calcul de la valeur RMS de la tension d'une bande de fréquence entre 1 et 20 kHz.

Le résultat de chaque méthode est dirigé vers un bloc de décision pour indiquer la présence ou non d'arcs électriques sur la ligne.

La Figure 3.70 montre le bloc synoptique de la logique de décision. Nous avons considéré trois états : état de fonctionnement normal, défaut d'arc série et surtension et enfin défaut d'arcs parallèles.

Afin de détecter la présence d'un arc électrique en série sur la ligne nous procédons à :

- L'analyse des basses fréquences du courant,
- L'analyse du 5ème harmonique du courant
- L'analyse des hautes fréquences de la tension.

Par contre pour la détection d'un défaut d'arc parallèle ou d'une variation dans la tension (surtension), nous analysons les hautes fréquences présentes sur la tension ainsi que la variation de la tension de ligne.

La détection d'un arc série ou d'un arc parallèle est active (à 1) respectivement I_{arcS} (série) ou I_{arcP} (parallèle). Le calcul est réalisé pour chaque demi-période du courant. Les seuils Ns (série) et Np (parallèle) donnés par la norme sont liés au nombre maximum de fois qu'un défaut peut se produire.

Dès que le nombre d'arcs série (ths) ou parallèle (thp) détectés est supérieur au seuil Ns ou Np le signal de sortie (Trip) est activé confirmant la présence d'arcs selon la norme IEC62606.

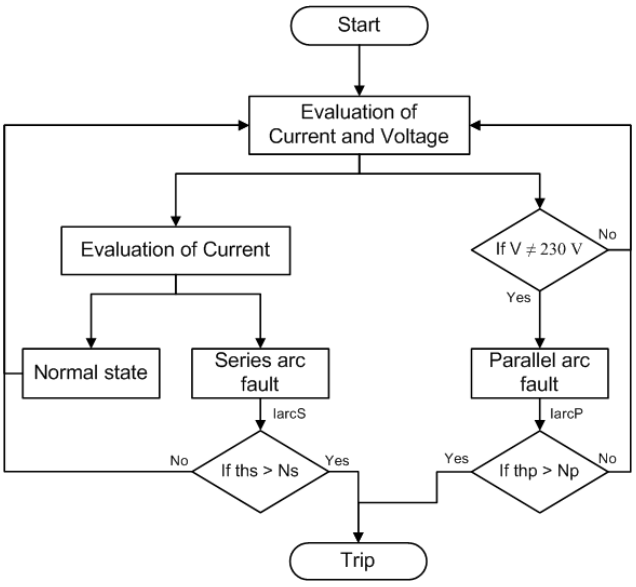


Figure 3.70. Bloc de décision

La Figure 3.71 présente les résultats de détection pour une charge résistive (26.5 Ω). Les figures montrent que pour le courant avec présence régulière d'arcs, les défauts ont été

détectés. Nous avons représenté sur la Figure 3.71 le signal I_{arcS} indiquant la détection pour chaque demi-période de la présence d'un arc dans le signal. Le signal de commande Trip est activé après un nombre présélectionné de détections. En fonctionnement normal, les signaux I_{arcS} et Trip ne sont pas activés.

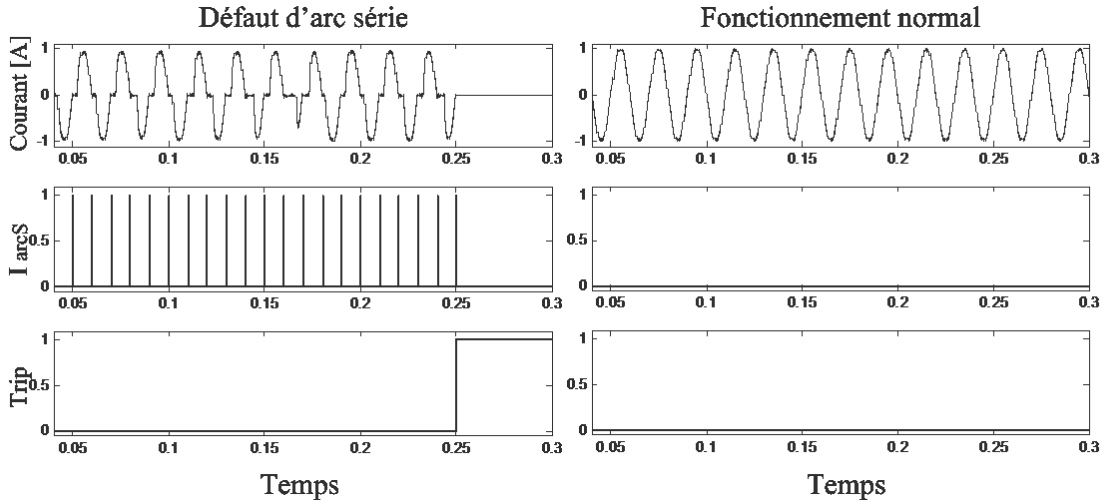


Figure 3.71. Détection sur une charge résistive

La Figure 3.72 présente les résultats obtenus pour une charge résistive – inductive (26.5 Ω - 29 mH), l'algorithme a détecté tous les cas d'apparition d'arcs (signal I_{arcS}), le signal Trip est activé après 25 demi-périodes.

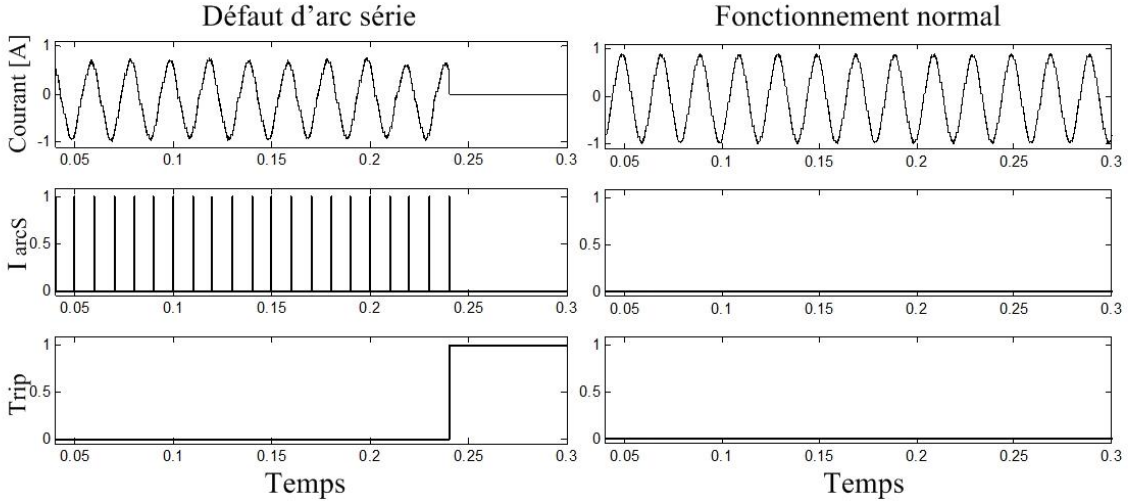


Figure 3.72. Détection sur une charge résistive - inductive

La Figure 3.73 présente les résultats obtenus pour le cas d'une charge de type aspirateur (1200 W). L'algorithme détecte parfaitement la présence d'arcs sur la ligne, toutefois trois fausses détections sont générées en fonctionnement normal.

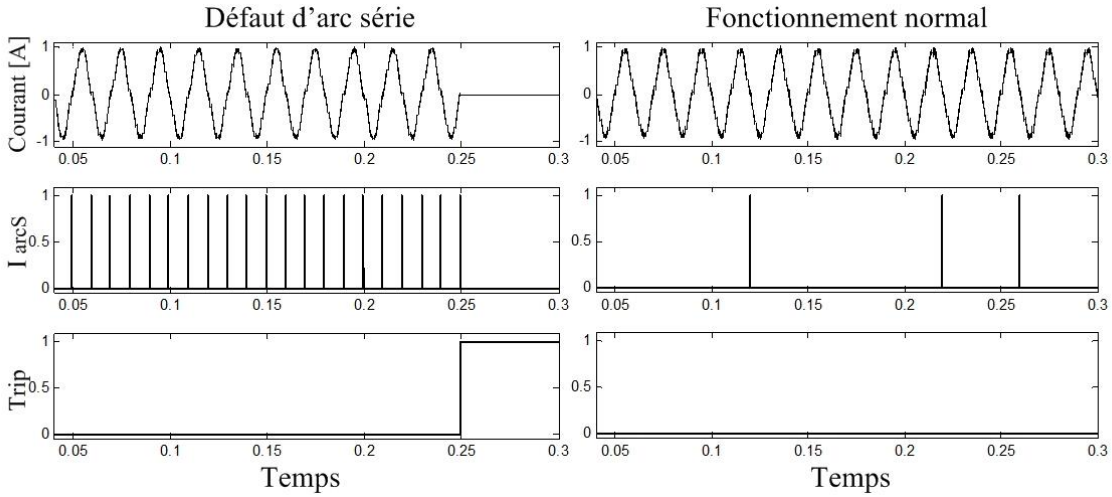


Figure 3.73. Détection sur un charge aspirateur

3.7 Conclusion

Différentes méthodes de détection de défauts d'arcs de la littérature ont été présentées. Elles sont divisées en deux groupes principaux ; méthodes fréquentielles et méthodes temporelles.

Les **méthodes fréquentielles** analysent et observent les caractéristiques en fréquence tels que les inter-harmoniques, les harmoniques pairs et impairs ou certaines bandes de fréquences spécifiques.

Le Tableau 3.5 présente un résumé des résultats que nous avons obtenus pour plusieurs méthodes de détection d'arcs basées sur l'analyse fréquentielle pour différents types de charge domestique (résistive, de type moteur, de type redresseur et une charge de masquage (perceuse connectée en parallèle avec une bouilloire)).

La charge de masquage a un caractère très résistif dû à la puissance élevée du composant résistif par rapport à celui-ci de la perceuse.

Résultat sur la détection pour différents types de charge					
N	**Méthode**	**Résistive**	**Redresseur**	**Moteur**	**Masquage**
1	Inter harmoniques [75, 83]	Oui	Oui	Oui	Oui/Non
2	Pairs – Impairs [83]	Oui	Oui	Non	Non
3	$3^{ème}$ et $5^{ème}$ harmoniques [69]	Oui	Non	Non	Non
4	Fréquence entre 2-5 kHz	Oui	Non	Non	Oui/Non
5	Filtre passe haut à 1 kHz	Oui	Non	Oui	Non
6	Filtre passe bande à 10 kHz	Oui	Non	Non	Oui/Non
7	Filtre passe bande à 35 kHz	Oui	Non	Non	Non

Tableau 3.5. Résumé des performances des méthodes de détections fréquentielles

Les **méthodes temporelles** analysent et observent les caractéristiques de la forme d'onde de la signature du courant. Le Tableau 3.6 synthétise les résultats obtenus pour 6 méthodes de détection basée sur l'analyse temporelle du courant de ligne.

Résultat approximative de détection pour différents types de charge					
N	**Méthodes**	**Résistive**	**Redresseur**	**Moteur**	**Masquage**
1	Dérivée [75, 100]	Oui	Non	Non	Non
2	Corrélation [106]	Oui	Oui	Oui	Oui/ Non
3	Moment d'ordre [104, 105]	Oui	Non	Non	Non
4	Analyse du plat du courant	Oui	Non	Oui/ Non	Non
5	Analyse de la périodicité [103]	Oui	Oui	Oui	Oui/Non
6	Facteur de crête [111]	Oui	Non	Oui	Non

Tableau 3.6. Résumé des performances des méthodes de détections temporelles

À partir de l'ensemble des résultats obtenus et présentés dans les deux tableaux, la méthode des inter-harmoniques semble détecter presque tous les configurations de défaut d'arc. Mais par contre les autres méthodes testées ne permettent pas de détecter systématiquement la présence de défauts d'arcs sur tous types de charge en configurations de charge simple ou de masquage.

L'ensemble de ces observations nous a conduit à mettre au point d'autres méthodes de détection fiable dans des configurations pour lesquelles la détection de la présence d'arcs est la plus difficile à réaliser : charge de masquage ou charge de type gradateur qui ont une signature proche de celle d'un arc.

Chapitre 4

4 Méthodes de détection de défauts d'arcs

4.1 Introduction

Les principales méthodes de détection de la littérature pour la détection de défaut d'arc ont été présentées dans le chapitre III.

Dans le cadre de cette thèse, certaines méthodes pour la détection des arcs sur une ligne électrique sont développées au sein de l'équipe Mesure et Architecture Électronique MAE 406 de l'institut Jean Lamour.

Différents tests ont été effectués afin d'obtenir des signaux de courant et tension de ligne au sein du laboratoire. Ces acquisitions enregistrées vont faire partie de la base de données pour le test et le développement de méthodes de détection.

Une première analyse bibliographique (chapitres I et III) a été effectuée pour comprendre les caractéristiques importantes des signaux de courant et tension de ligne en présence de défauts d'arcs électriques.

Le logiciel Matlab a été choisi pour le traitement et le développement des méthodes de détection.

Ce chapitre présente trois nouvelles méthodes de détection de défaut d'arc électrique. Parmi les trois, une est basée sur l'analyse fréquentielle du courant et les deux autres sur l'analyse temporelle de la forme d'onde du courant.

Chaque méthode est détaillée jusqu'à l'obtention du résultat final. Quatre types de charges simples avec et sans la présence de défauts d'arcs ont été choisies pour le test et l'évaluation de la méthode. Les méthodes sont aussi testées avec quatre types de charges combinées suivant différentes configurations.

Nous présentons également une étude qui permet de choisir un seuil de détection fixe et optimal en fonction des réponses des méthodes pour plusieurs charges afin d'accroitre la robustesse de la détection pour toutes les charges et configurations de charges y compris charges de masquage, la fin du chapitre propose la combinaison de deux méthodes suivi d'un algorithme de décision.

4.2 Signaux électrique du courant d'arc

Les tests des méthodes présentées dans le chapitre III ont montré de bons résultats pour les charges résistives et des résultats aléatoires pour les autres types de charges (charges simples et charge de masquage).

Les méthodes ne sont pas fiables et ne permettent pas de différencier la présence d'un arc électrique ou un fonctionnement normal sur des charges non linéaires telles que

l'aspirateur, la perceuse, le gradateur… ainsi que pour les différentes configurations de charges de masquage.

Ce chapitre doit prendre en considération les avantages et les inconvénients des différentes méthodes de la littérature présentées dans le chapitre III et proposer des méthodes qui permettent de faire une meilleure discrimination du courant en présence d'un arc par rapport au courant en fonctionnement normal.

Le Tableau 4.1 présente les signatures de courant mesuré en fonctionnement normal et en présence de défauts d'arcs. Les essais sont réalisés avec une charge résistive, un aspirateur, un gradateur et une alimentation à découpage.

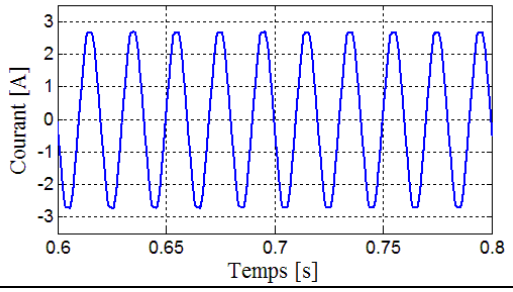
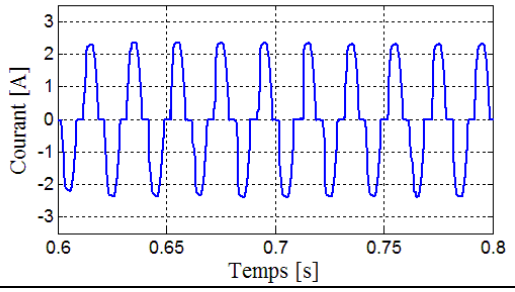
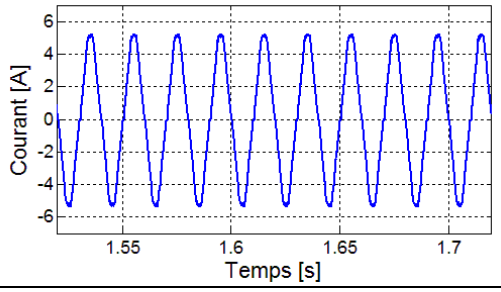
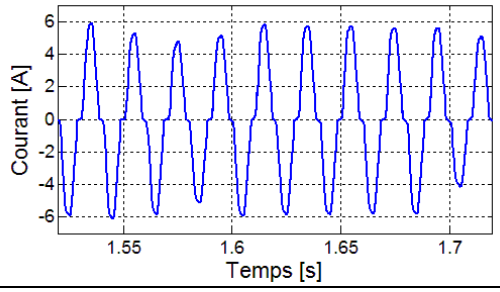
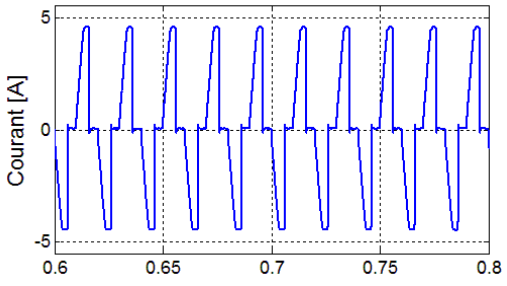
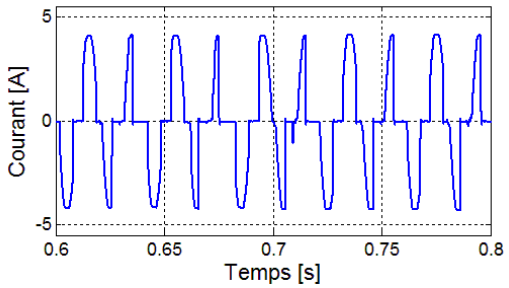
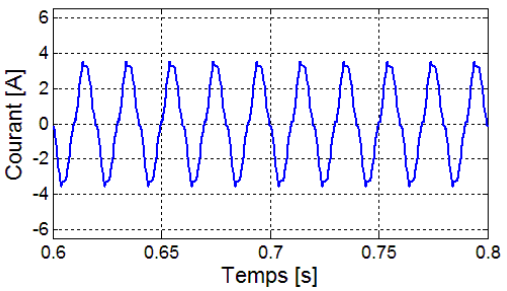
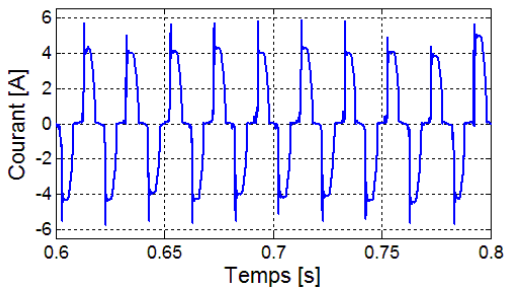
C	Fonctionnement normal	Avec défauts d'arc
Résistive		
Aspirateur		
Gradateur		
Alimentation à découpage		

Tableau 4.1. Signatures du courant

La mise au point des principales méthodes de détection que nous proposons dans ce manuscrit sont basées sur l'observation des caractéristiques temporelles qui apparaissent dans le courant lors de la production d'un arc.

4.3 Méthode 1 : Calcul de l'énergie du courant

Cette méthode proposée est inspirée de la méthode présentée par Istrate [112] qui propose une étude pour la détection de sons dans un environnement bruité. Cette méthode prend en considération l'analyse fréquentielle vue dans le chapitre précédent qui donne la conclusion suivante :

- Le spectre présente une augmentation d'amplitude pour certaines fréquences lors de la production de l'arc. Elles sont localisées dans la plage de 1 kHz et 20 kHz. Cette analyse est validée pour certains types de charges fortement résistives. Mais, information de cette plage de fréquence peut être modifiée en fonction du type de charge et aussi la configuration de ces charges dans le circuit (charges en parallèle, charge de masquage, etc…).

La Figure 4.1 montre le schéma bloc de calcul de l'énergie du bruit du courant.

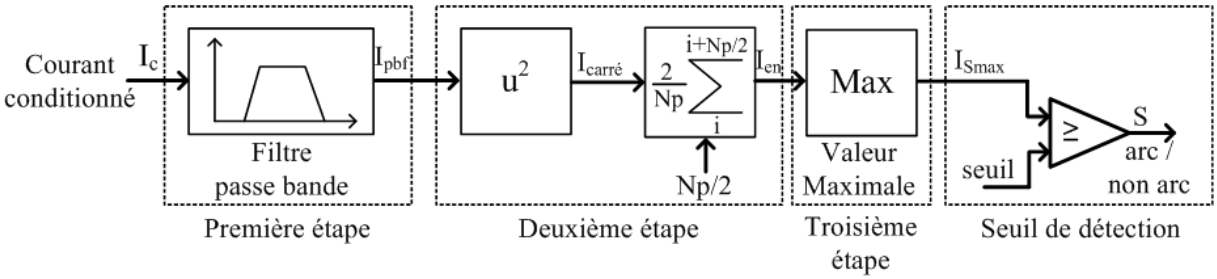


Figure 4.1. Diagramme descriptif de la méthode

Donc, ces variations fréquentielles peuvent se reproduire dans un grand nombre de charges et suivant différentes configurations. L'algorithme proposé comporte les étapes suivantes :

- Filtrage passe-bande entre 1 kHz et 20 kHz du courant conditionné (I_{pbf}), pour l'obtention de fréquences liées aux défauts d'arc.
- Calcul de l'énergie d'une demi-période.

$$I_{en} = \frac{2}{Np}\sum_{i=1}^{\frac{Np}{2}} I_{pbf}^2 \qquad (28)$$

Où :

- Np = nombre d'échantillons par période
- I_{pbf} = Amplitude du courant filtré entre 1 kHz et 20 kHz

L'étape suivante consiste à faire le calcul de la valeur maximale (I_{Smax}) de l'énergie pour chaque demi-période puis à comparer cette valeur à un seuil de détection. Le résultat donne une indication sur la présence ou non d'un arc électrique.

4.4 Méthode 2: PEDSR

La méthode est basée sur l'analyse des caractéristiques temporelles de la signature du courant.

Dans la réalité un défaut d'arc qui est produit sur une ligne électrique a plusieurs paramètres qui peuvent modifier la signature du courant d'arc (généralement lors de l'allumage et l'extinction de l'arc). Les expérimentations menées dans cette étude ainsi que ceux de la littérature [103] montrent une variabilité de la signature du courant d'arc en fonction des conditions d'apparition de ces décharges. Les paramètres d'influence sont la nature de la charge, la température, la distance entre les électrodes, la pression, la composition du gaz où se produit l'arc, la nature des électrodes, etc. [24, 96]. Pendant la décharge électrique, des atomes peuvent se dégager des électrodes et modifier localement et de manière hétérogène la composition du gaz entre les électrodes. Par ailleurs la puissance électrique mise en jeu va également échauffer les électrodes et le milieu de décharge [96]. L'ensemble de ces phénomènes va créer des instabilités dans la décharge électrique conduisant à faire varier d'une période à l'autre la signature temporelle de l'arc électrique.

La suite de cette partie a été supprimée pour des raisons de confidentialité.

4.5 Méthode 3 : EMDP

Cette méthode de détection prend également en considération la nature chaotique de la signature du courant en présence de défauts d'arcs.

La méthode porte sur l'influence de la tension d'amorçage de l'arc sur la signature du courant d'arc. Lors de la production d'un arc, il existe un changement brutal de la signature du courant. Il apparait lors du passage d'une étape de non-conduction à une autre étape de conduction.

La suite de cette partie a été supprimée pour des raisons de confidentialité.

4.6 Test des méthodes de détection

Trois méthodes de détection de défauts d'arcs électriques ont été présentées dans les paragraphes précédents. Ces méthodes basées sur l'analyse fréquentielle et temporelle sont testées avec huit signaux de courants différents : courant en fonctionnement normal et courant en présence de défauts d'arcs électriques. Parmi les huit signaux, quatre sont des charges simples et les quatre autres sont des charges de masquage.

4.6.1 Résultats pour charges simples

Le Tableau 4.2 montre les méthodes utilisées lors du test avec différents types de charge.

Appellation	**Nom**
Méthode 1	Calcul de l'énergie d'une bande de fréquence
Méthode 2	PEDSR
Méthode 3	EMDP

Tableau 4.2. Méthodes proposés

Le Tableau 4.3 montre les résultats obtenus lors du test des trois méthodes pour l'évaluation des signatures des deux premiers types de charge (résistive et aspirateur). Les figures montrent la valeur maximale de sortie de chaque méthode de détection pour chaque demi-période du courant.

Les différentes figures du Tableau 4.3 montrent les différences qui existent entre les résultats obtenus pour les courants avec défauts d'arcs (en bleu) et en fonctionnement normal (en rouge). Une stabilité des valeurs maximales de sortie de chaque méthode est observée dans le cas du courant en fonctionnement normal. Par contre, la réponse présente un comportement totalement aléatoire en présence de défauts d'arcs. Ces observations seront analysées dans la section suivante.

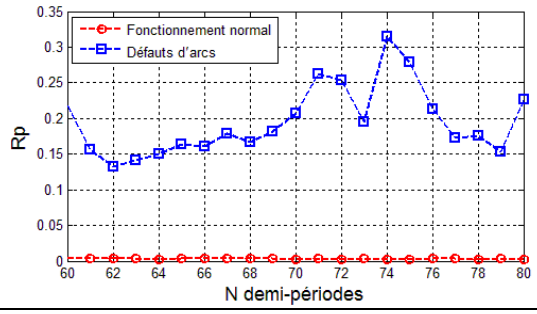
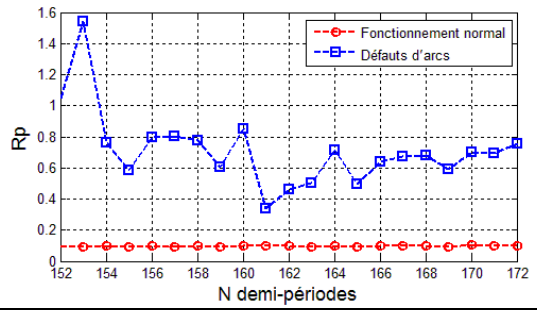
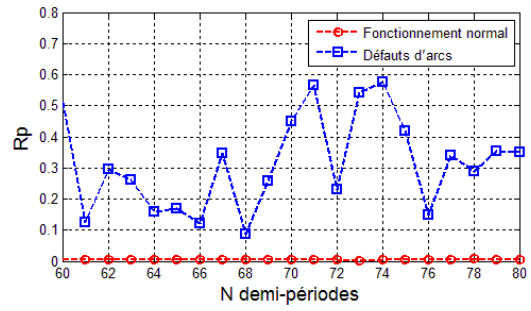
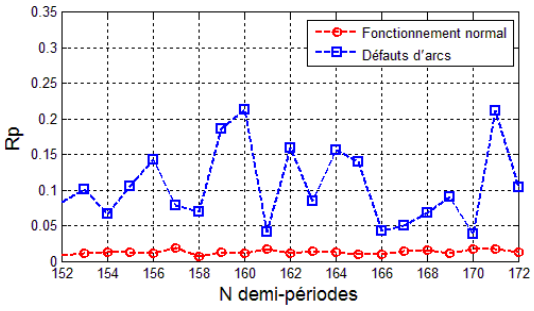
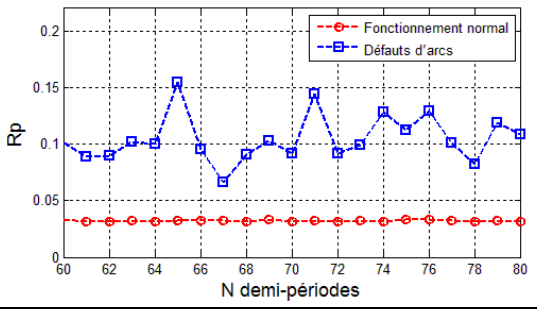
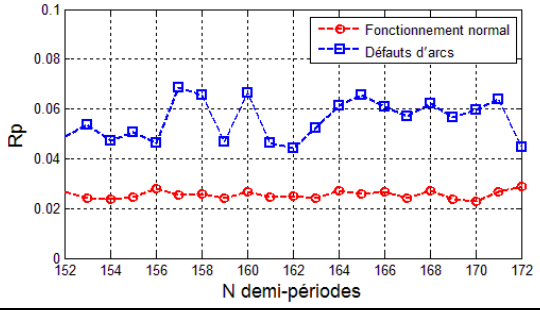
	Charge 1 : résistive	Charge 2 : Aspirateur
Méthode 1		
Méthode 2		
Méthode 3		

Tableau 4.3. Résultats des méthodes pour la charge 1 et 2.

Le Tableau 4.4 montre les résultats obtenus pour les deux autres charges (gradateur et alimentation à découpage). Les résultats montrent que pour la charge de type gradateur dans le cas de la méthode 1, il est difficile de trouver un écart entre les valeurs maximales de sortie de la méthode pour le cas du courant en fonctionnement normal et en présence de défauts d'arcs. Mais on observe que les valeurs maximales pour le cas de courant en présence de défauts d'arc ont une réponse aléatoire. Dans le cas des autres charges qui présentent les mêmes caractéristiques que le tableau précédent.

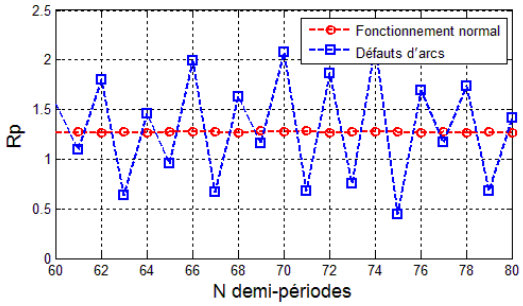
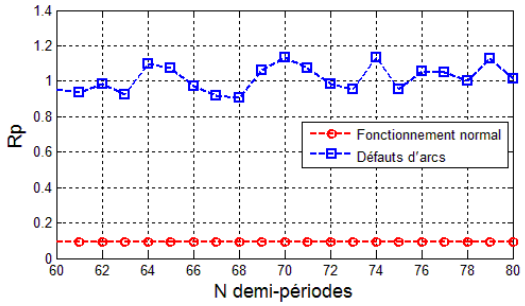
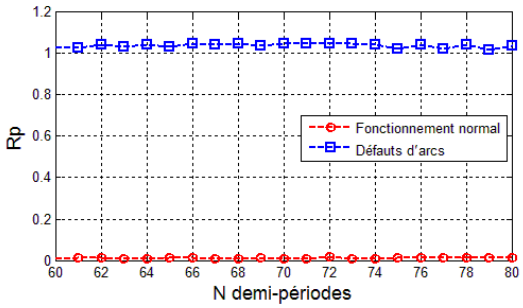
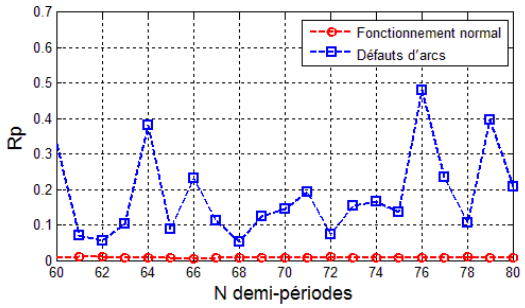
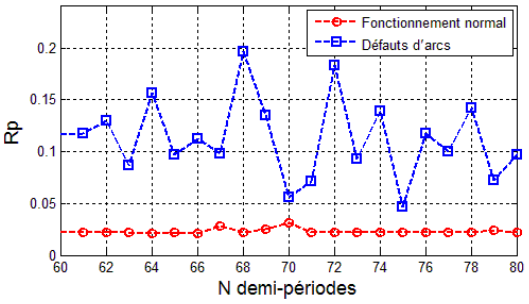
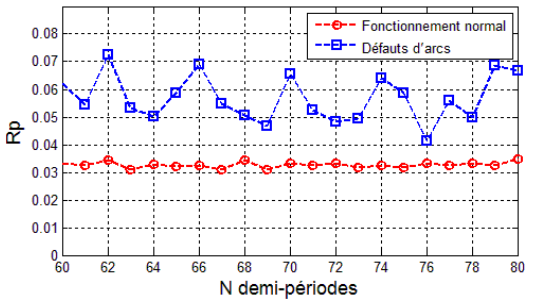
	Charge 3 : Gradateur	Charge 4 : Alimentation à découpage
Méthode 1		
Méthode 2		
Méthode 3		

Tableau 4.4. Résultats des méthodes pour les charges 3 et 4.

La détermination d'un seuil de détection pour chaque type de méthode est nécessaire, il va nous permettre de différencier les signatures dans les cas de défauts d'arc et en fonctionnement normal.

4.6.2 Résultats des méthodes pour les charges de masquage

Différents tests peuvent être faits avec des charges de masquage. Les figures des Tableau 4.6 et Tableau 4.7 montrent les réponses de deux méthodes (PEDSR et EMDP) pour

4 cas de charges combinées. Le Tableau 4.5 montre les charges avec une combinaison qui permet de masquer la signature de l'arc selon la Figure 4.2.

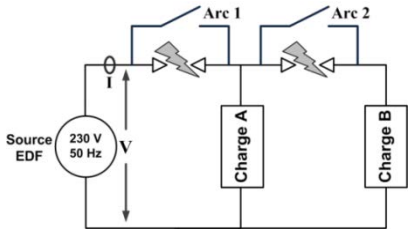


Figure 4.2. Configuration combinée

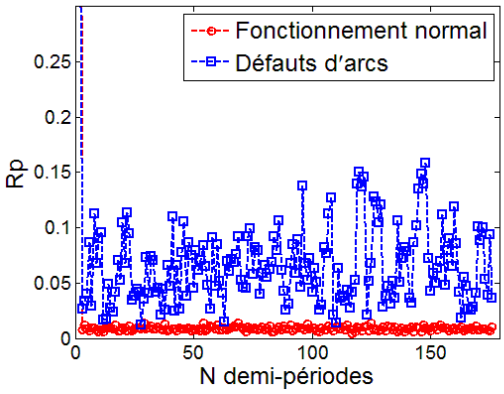
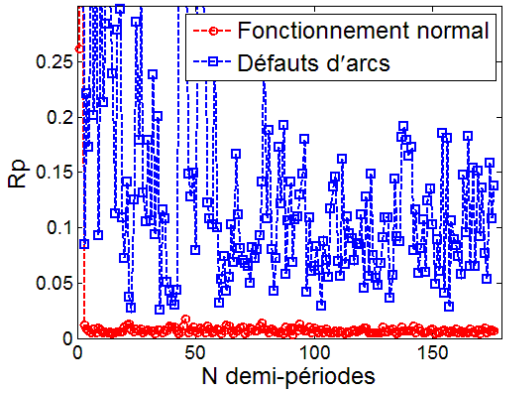
Appellation	Arc 1	Charge A	Arc 2	Charge B
Charge 5	Non	Aspirateur	Oui	Résistance
Charge 6	Oui	Perceuse	Non	Résistance
Charge 7	Non	Résistance	Oui	Alimentation à découpage
Charge 8	Oui	Lampe	Non	Résistance

Tableau 4.5. Spécifications des charges.

Nous pouvons remarquer qu'il existe une différence visuelle entre les cas du courant en fonctionnement normal (en rouge) et avec défaut d'arc (en bleu).

La réponse pour le courant en fonctionnement normal présente un comportement stable pour chaque demi-période du signal (en rouge). Par contre, la réponse pour le courant avec défaut d'arc présente un comportement aléatoire avec une valeur d'offset plus élevée que le cas sans défaut d'arc (en bleu). Ces caractéristiques sont observées pour les deux méthodes de détections présentées (PEDSR et EMDP).

Cependant, la sélection d'un seuil de détection pour faire la différence entre la réponse pour le courant en fonctionnement normal et en présence d'arcs est encore difficile à déterminer. Une étude sera présentée dans la section suivante afin de trouver le seuil optimal de détection.

Réf	Charge 5	Charge 6
Méthode 2		

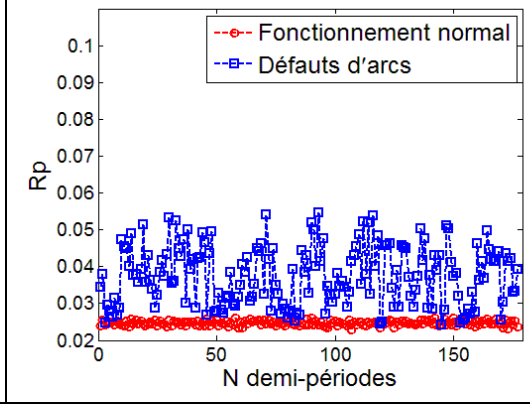
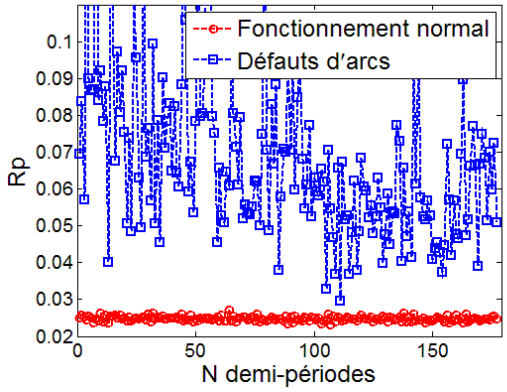
Méthode 3		

Tableau 4.6. Résultats des méthodes pour la charge 5 et 6.

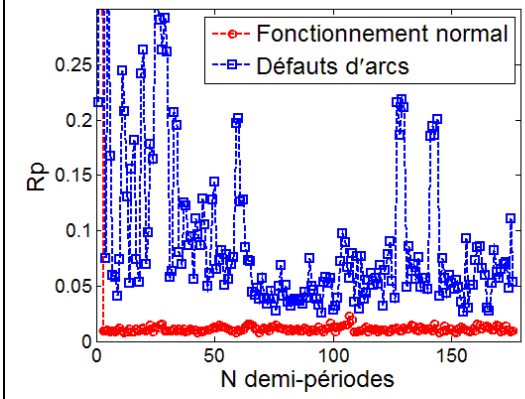
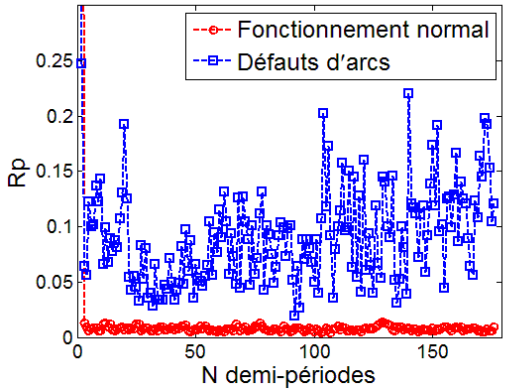
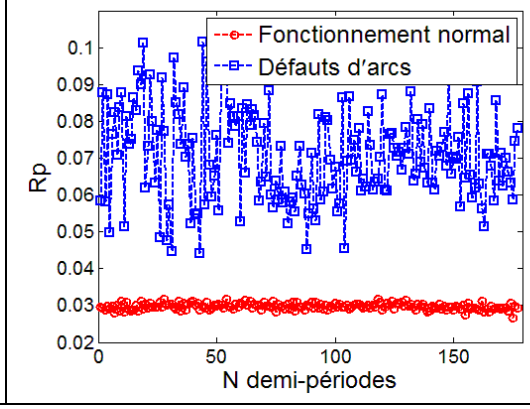
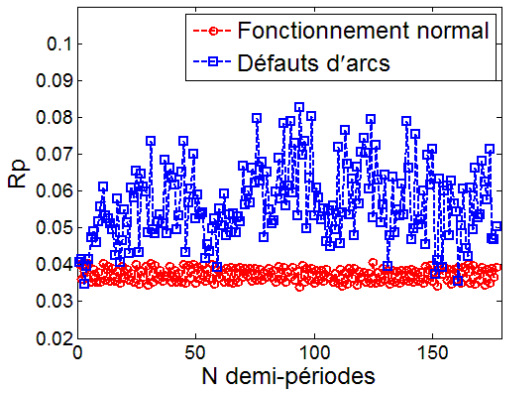
Réf	Charge 7	Charge 8
Méthode 2		
Réf	Charge 7	Charge 8
Méthode 3		

Tableau 4.7. Résultats des méthodes pour les charges 7 et 8.

4.7 Ajustage du seuil de détection

Les méthodes de détection présentées nous permettent d'évaluer et de détecter les défauts d'arcs présents dans la signature du courant, ces méthodes sont basées soit sur les caractéristiques fréquentielles ou caractéristiques temporelles.

Bien qu'il existe une différence visuelle entre les résultats de chaque méthode pour le cas de courant avec défauts d'arc et en fonctionnement normal. Il est nécessaire de quantifier cette différence avec une valeur logique soit 1 ou 0 pour chaque période ou demi-période du courant.

Pour réussir cette contrainte, il est nécessaire de fixer un seuil qui va permettre l'obtention d'un signal « 1 » lorsqu'un défaut d'arc est produit et « 0 » quand le courant est en fonctionnement normal.

4.7.1 Seuil de détection fixe

Notre objectif est la détermination d'un seuil optimal pour minimiser la probabilité de mauvaise détection.

Les résultats obtenus de l'analyse des deux méthodes et pour les huit types de charges avec différentes configurations (avec défauts d'arc et en fonctionnement normal) nous font penser à la sélection d'un seuil qui soit fixe pour chaque méthode.

Sicot [113] propose une solution basée sur l'analyse de densités de probabilités d'une variable Φs(i), dans lequel un seuil de détection β est choisi pour minimiser la probabilité de mauvaise décision (P_{md}). La Figure 4.3 montre cette approche.

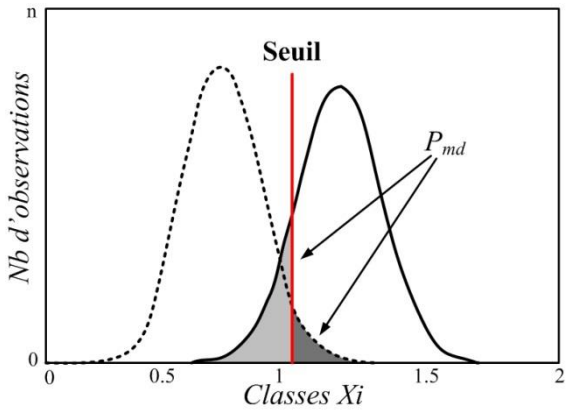


Figure 4.3. Détermination du seuil de détection [113].

4.7.1.1 Distribution de fréquence statistique pour la détermination du seuil de détection fixe

La distribution de fréquence statistique ou tableau de fréquences va nous permettre d'organiser et représenter certaines quantités de données dans un mode synthétique, de manière ordonnée et parfaitement intelligible.

Vu la grande quantité de données à traiter, la méthode propose la répartition de données en différentes classes ou catégories et la détermination du nombre d'individus appartenant à chacune de ces classes.

L'exemple ci-dessous montre l'élaboration d'un tableau de fréquences (histogramme).

- Un signal aléatoire quelconque est considéré.
- Classification de données dans un tableau de distribution de fréquences. Le signal va être divisé en 20 classes différentes avec un nombre de données qui appartient à chaque classe.
- Représentation graphique du tableau de fréquences obtenues. La Figure 4.4 montre une distribution normale de données analysées ainsi que la probabilité d'occurrences des données pour différentes classes.

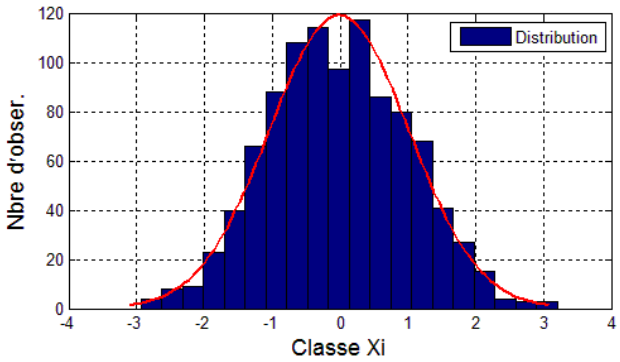


Figure 4.4. Distribution de fréquences

L'objectif est l'obtention d'un seuil optimal pour la différentiation entre les coefficients de sortie de la méthode pour le courant en fonctionnement normal et avec défauts d'arc.

La détermination du seuil de détection basé sur la distribution de fréquences est basée :

- Les valeurs maximales de sortie d'une méthode de détection sont utilisées. Ils sont divisés en « n » classes et il est nécessaire de calculer le nombre d'éléments appartenant à chaque classe. Regroupement par classes $X_i = [X_1, X_2, \dots X_n]$
- Les fréquences d'apparition (F_i) ou le nombre d'observations sont représentées en fonction de classes proposées (X_i). La Figure 4.5 montre le graphique de distribution de fréquences pour les deux cas, le courant en fonctionnement normal (rouge) et en présence d'arcs (bleu), pour une charge résistive et un total de 360 demi-périodes du courant.
- Enfin, la Figure 4.5 montre qu'il est possible de déterminer une zone entre la courbe du signal en fonctionnement normal et la courbe du signal en présence de défauts d'arcs, ses rangs de valeurs vont nous permettre de définir et choisir un seuil de détection. Cette valeur de seuil doit être optimale pour minimiser le nombre de fausses détections.

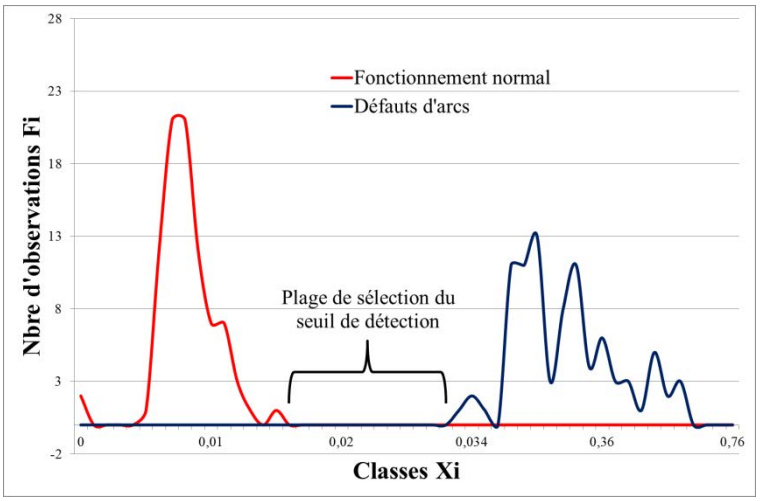


Figure 4.5. Détermination du seuil de détection pour le cas d'une charge résistive avec la méthode 2 (PEDSR)

4.7.2 Détermination du seuil fixe pour la méthode 2 (PEDSR)

La détermination d'un seuil fixe a comme objectif de différencier parfaitement les résultats de la méthode pour les cas de courant en fonctionnement normal et en présence d'arcs pour toutes les combinaisons possibles (charges simples et charges de masquage). Ce seuil doit être choisi surtout pour minimiser le nombre de fausses détections.

4.7.2.1 Détermination des paramètres intervenant dans la méthode

La méthode présentée dans le paragraphe 4.4 présente plusieurs paramètres qui peuvent modifier sa réponse. C'est le cas de l'équation 35, dans laquelle le principal paramètre à évaluer est « p » qui représente la largueur p de la fenêtre du moyenneur.

La Figure 4.6 montre l'évaluation des résultats pour différents valeurs de « p » pour une charge de type résistive. Le but est d'obtenir la valeur de « p » qui répond favorablement à tous les types de charge et aussi qui permet de minimiser le nombre de fausses détections.

Exemple 1 : charge résistive

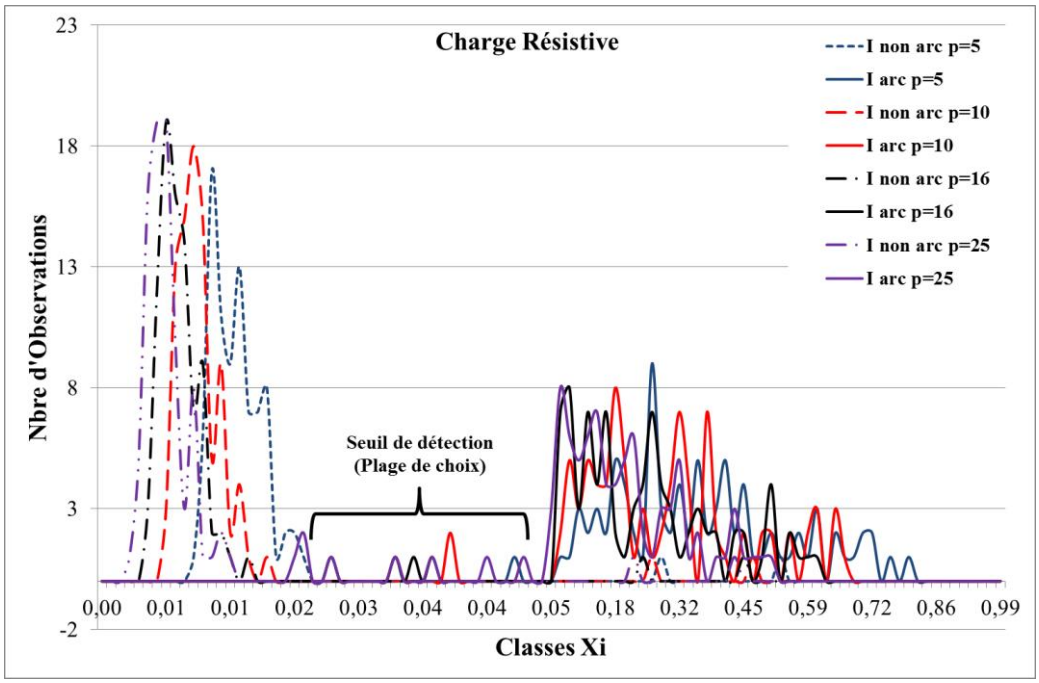


Figure 4.6. Charge résistive et variation de « p ».

La Figure 4.6 montre que la plage de séparation (plage de choix) entre la distribution de fréquences des valeurs de sortie de la méthode en présence de défauts d'arcs et en fonctionnement normal est presque stable pour toutes les valeurs de « p ». Mais il est aussi remarquable que la courbe en fonctionnement normal avec une valeur de p=16 (en noir) montre une réponse avec un minimum de valeurs dans la plage de détection.

Exemple 2 : alimentation à découpage.

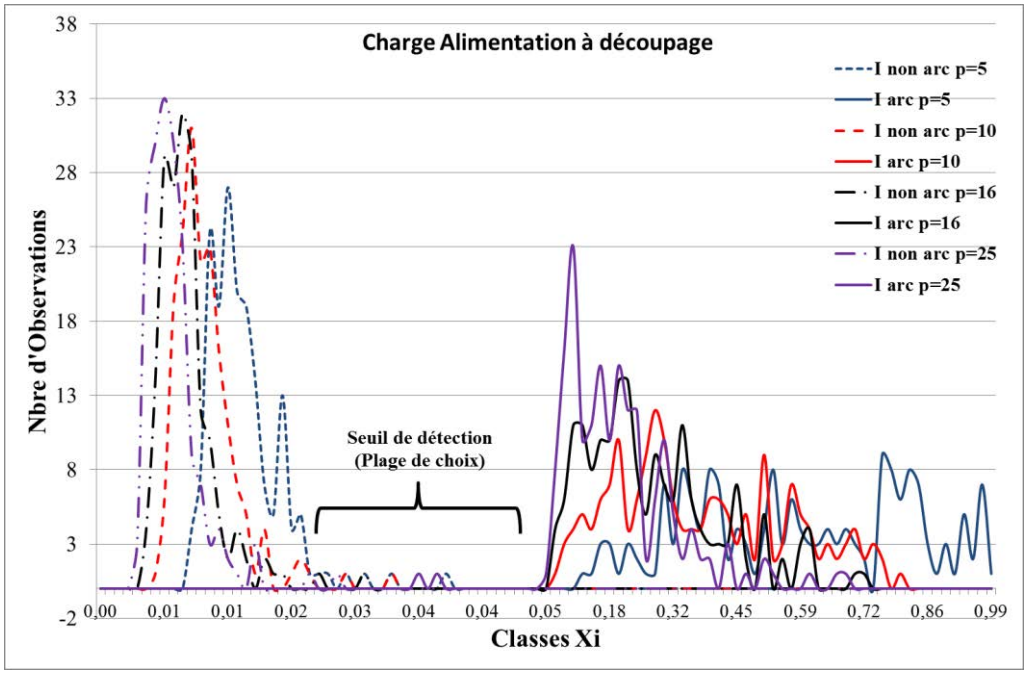


Figure 4.7. Charge alimentation à découpage et « p ».

La Figure 4.7 montre les courbes pour p=16 (noir) et p=25 (violet), leurs résultats sont presque similaires, par contre la courbe pour p=5 va limiter la plage de choix du seuil de détection.

D'autres charges ont été aussi testées pour pouvoir déterminer la valeur de « p » qui sera utilisée dans la détermination du seuil de détection. Selon l'analyse des figures observées, la valeur de « p » égale à 16 a été retenue pour la méthode de détection (Figure 4.8).

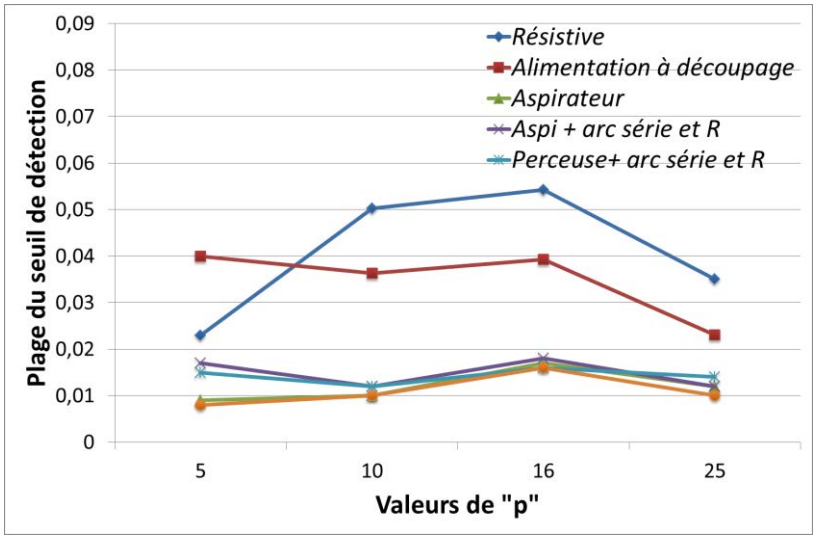
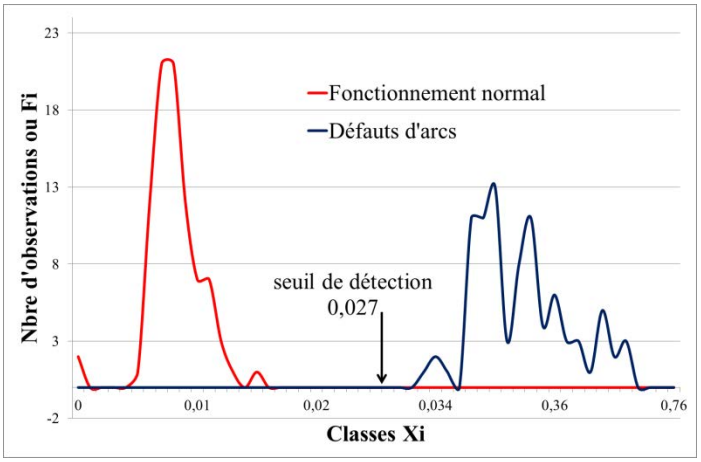


Figure 4.8. Sélection de la valeur de « p ».

4.7.2.2 Détermination du seuil de détection

La valeur de « p = 16 » choisie va permettre de tester la méthode avec tous les types de charges de la base de données. Les résultats du Tableau 4.8 correspondent pour les quatre premiers types de charge. Les figures du Tableau 4.8 vont permettre de choisir un seuil fixe adapté pour cette méthode, tout en prenant en compte la contrainte imposée de minimiser le nombre de fausses détections.

Charges	Distribution fréquentielle
Résistive	

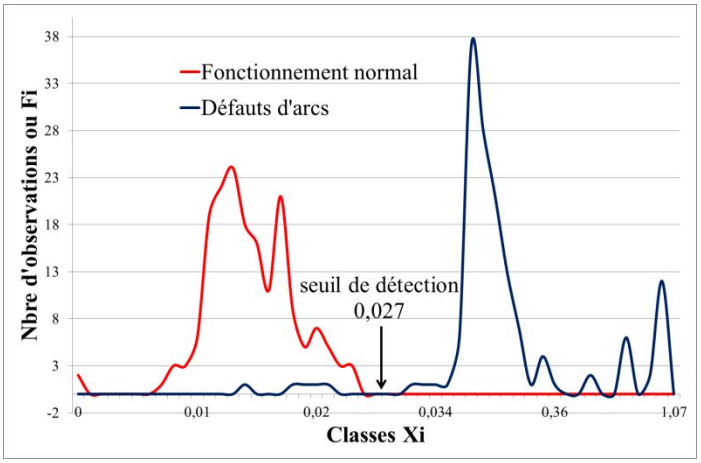
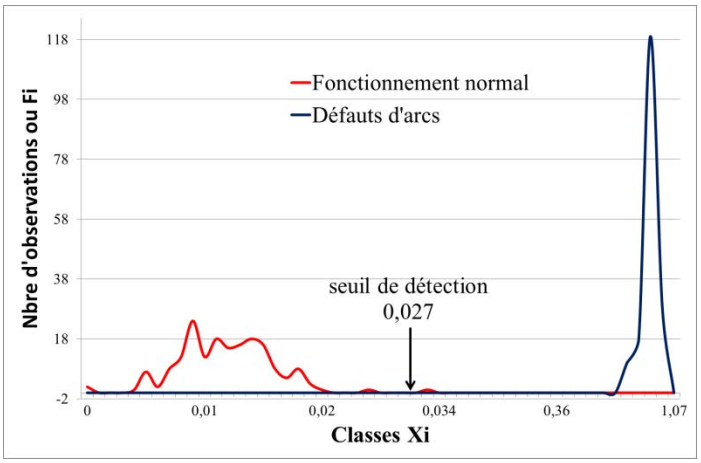
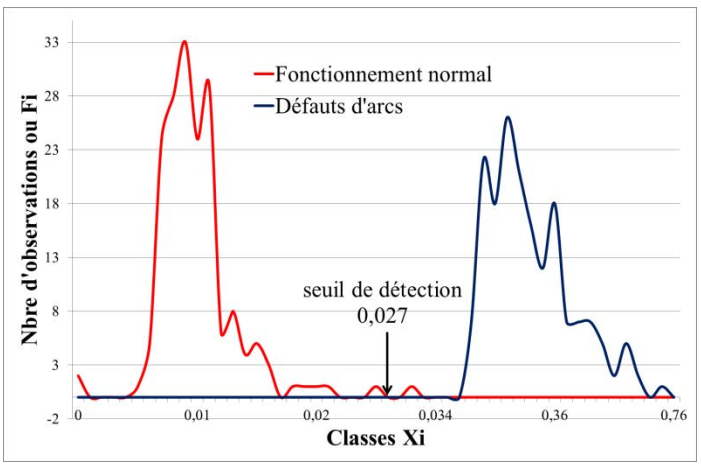
Aspirateur	
Gradateur	
Alimentation à découpage	

Tableau 4.8. Détermination du seuil optimal pour la méthode PEDSR.

À partir des résultats observés pour cette méthode, la valeur du seuil choisi est égale à 0.027. Cette valeur représente le seuil optimal pour la méthode PEDSR.

Cette valeur est choisie malgré la non-détection du nombre minimum de demi-périodes avec défauts d'arcs (surtout pour des charges présentant une signature proche de celle d'un arc).

4.7.3 Détermination du seuil de détection fixe pour la méthode 3 EMDP

4.7.3.1 Détermination des paramètres intervenant dans la méthode

L'équation 39 contient la variable « r » qui va jouer un rôle important dans le calcul des valeurs maximales de sortie de la méthode.

La Figure 4.9, Figure 4.10 et Figure 4.11 représentent la distribution de fréquences pour différentes valeurs de « r ». Soit pour une charge résistive (Figure 4.9), pour la charge de type alimentation à découpage (Figure 4.10) ou pour la charge de type gradateur (Figure 4.11).

Il est remarquable que, dans les trois figures, lorsque le courant est en fonctionnement normal la distribution de fréquences est presque stable. Par contre pour le cas du courant avec défaut d'arc la distribution des figures 4.9, 4.10 et 4.11 est très variable l'une de l'autre. Pour la courbe avec r=25, il existe un écartement entre la distribution de courant en fonctionnement normal et en présence d'arcs. C'est pourquoi la valeur de r=25 a été choisie comme paramètre de l'équation.

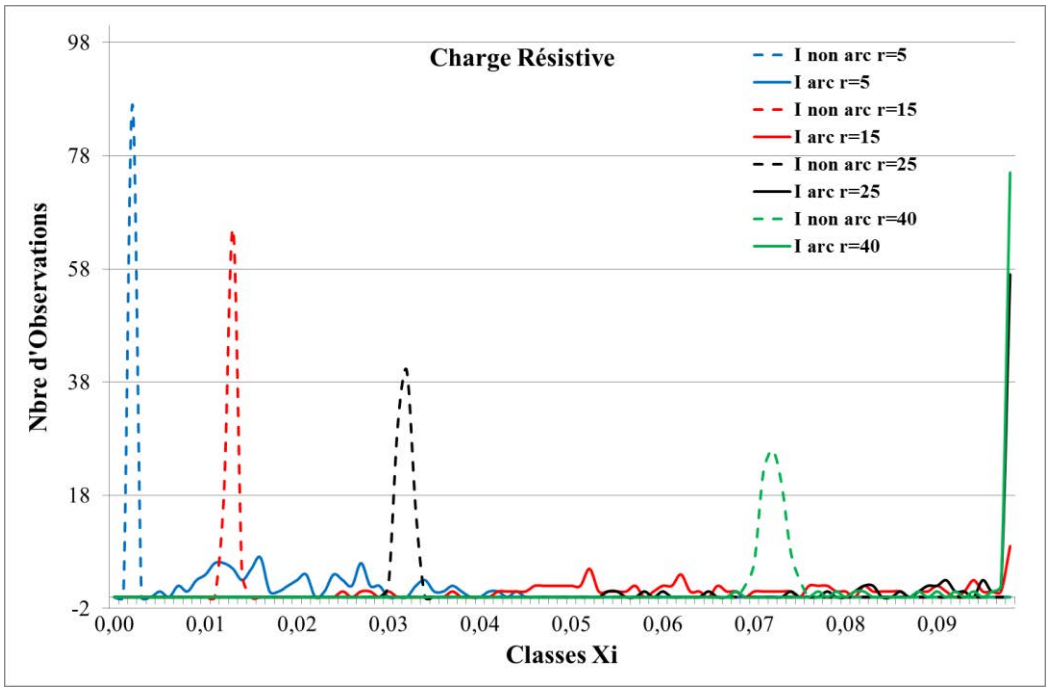


Figure 4.9. Histogramme pour une charge résistive

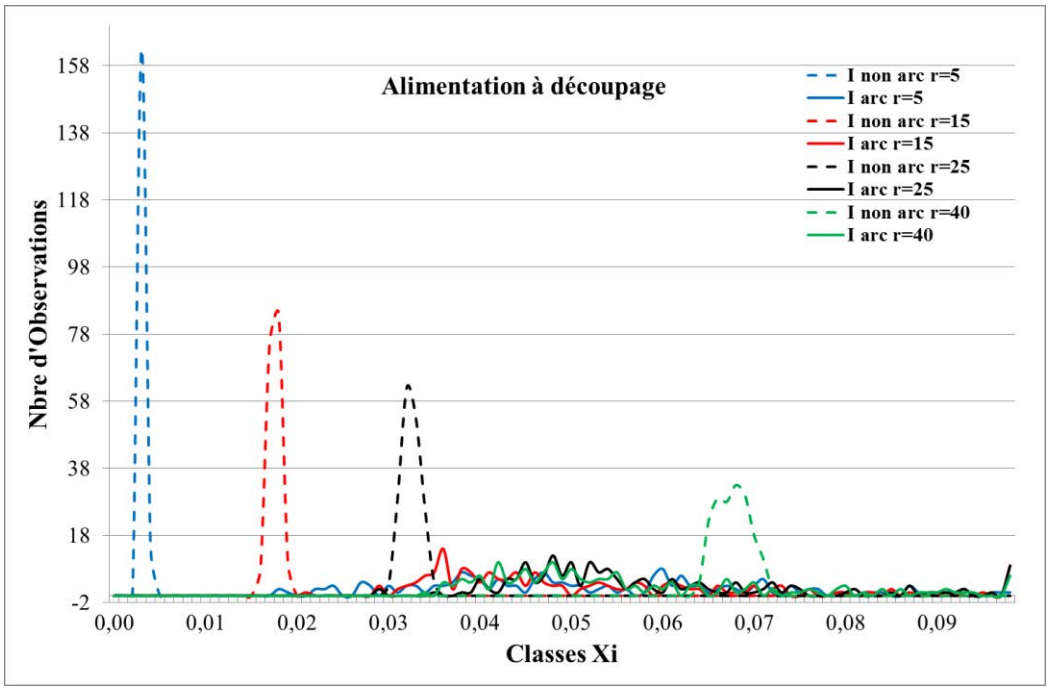


Figure 4.10. Histogramme pour une charge alimentation à découpage

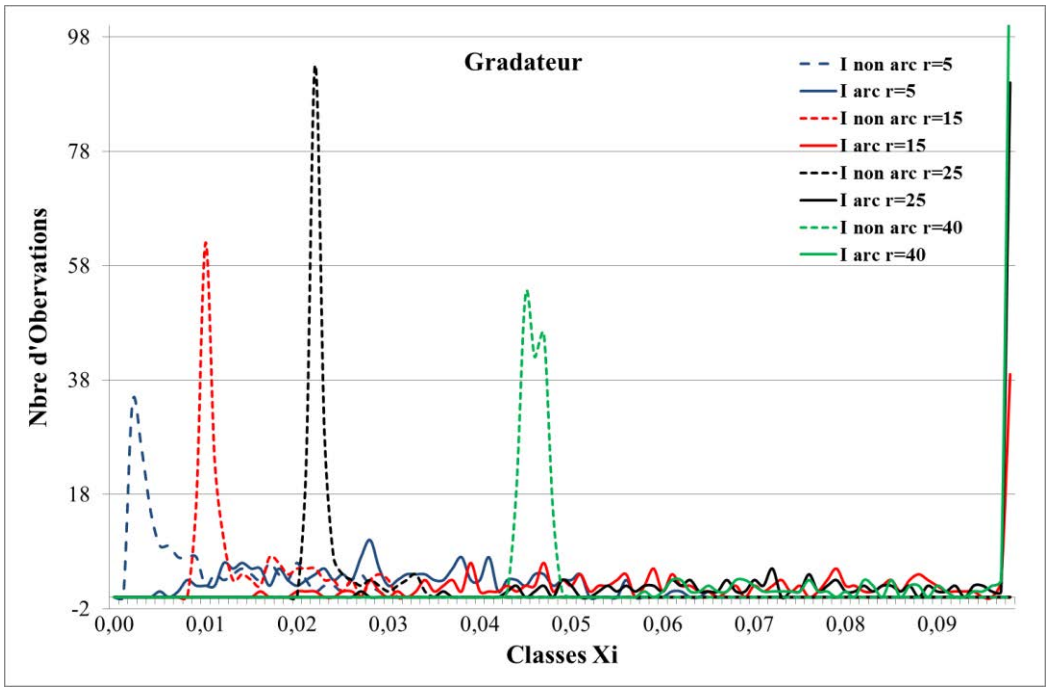
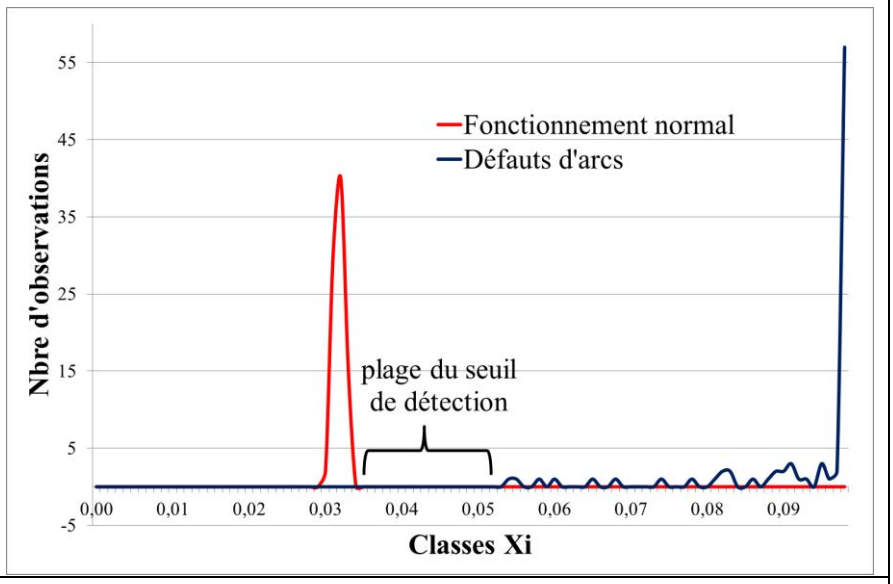
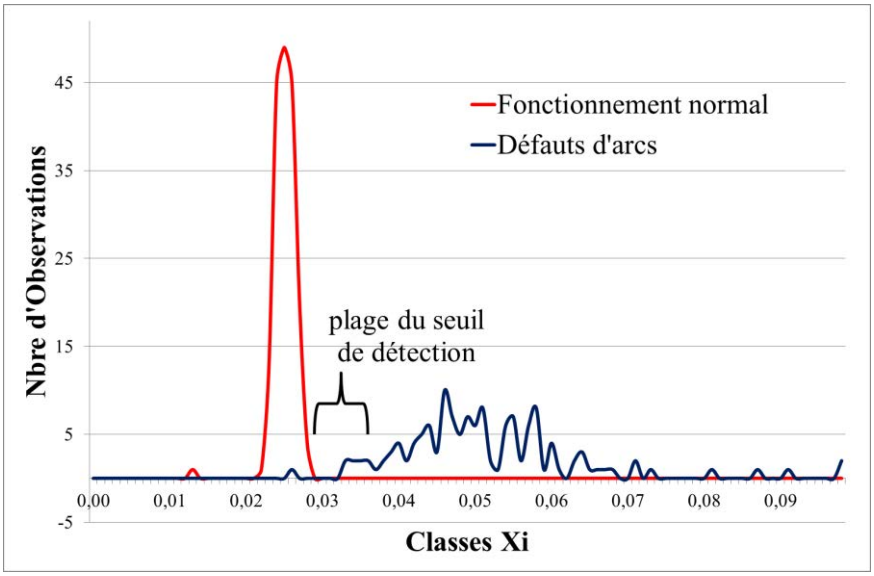
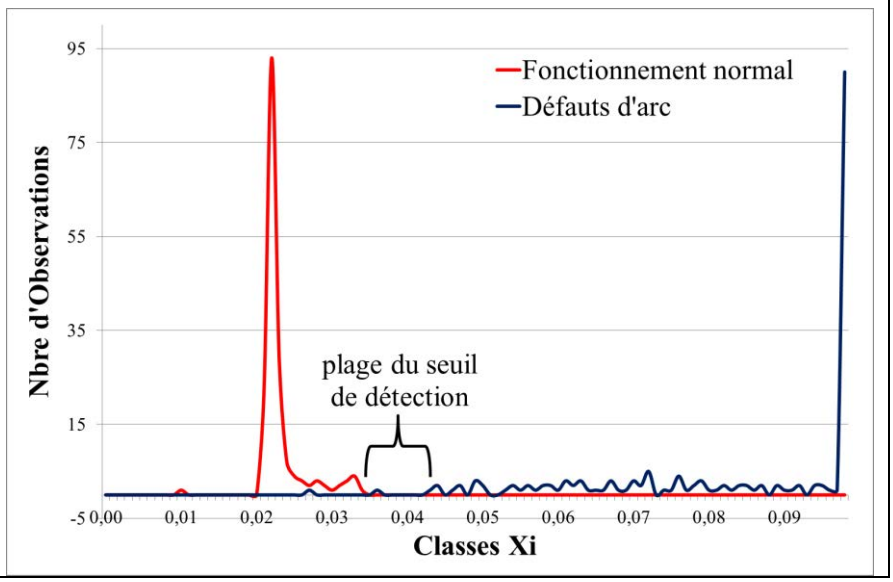


Figure 4.11. Histogramme pour une charge de type gradateur

4.7.3.2 Détermination du seuil de détection

Le Tableau 4.9 présente l'analyse pour la détermination d'un seuil de détection pour la méthode 4 avec une valeur de r=25.

Charge	Distribution fréquentielle
Résistive	
Aspirateur	
Gradateur	

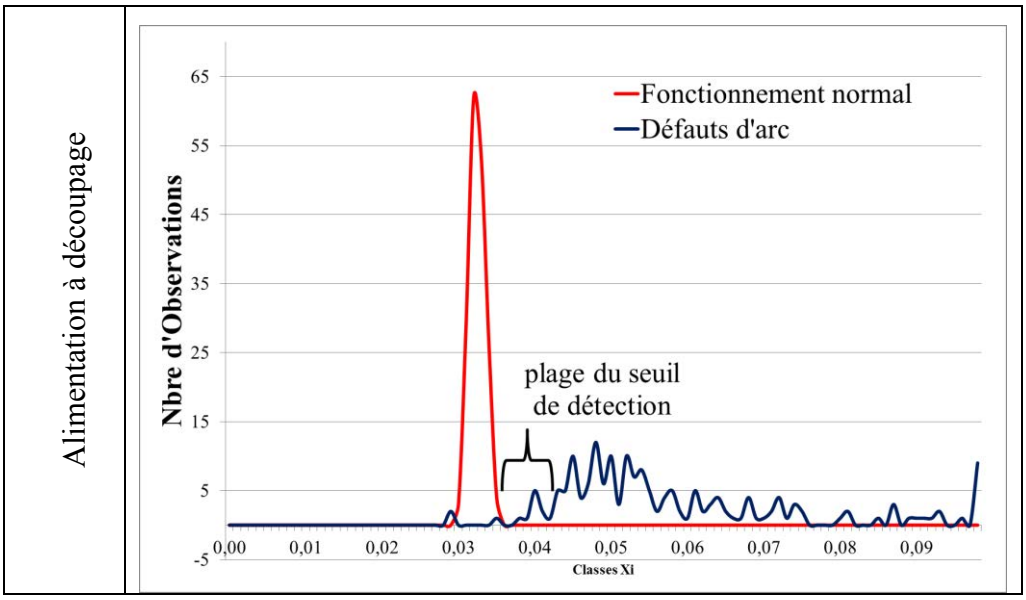


Tableau 4.9. Détermination du seuil optimal pour la méthode EMDP.

D'après les résultats de figure du Tableau 4.9 montrent la distribution des coefficients pour une valeur de r=25, la difficulté majeure consiste à choisir un seuil fixe pour cette méthode due à la variation des résultats des différentes charges.

Prendre un seuil fixe oblige à considérer que le système de détection ne fasse pas de fausse détection lorsqu'une charge est en fonctionnement normal. Le seuil choisi est égal à 0.04.

4.8 Comparaison des performances des différentes méthodes

Le but de ce paragraphe est de montrer la performance des différentes méthodes de détection lors d'un test sur différents cas en présence ou non de défauts d'arc.

Pour valider les résultats, nous allons utiliser le calcul de 4 paramètres comme indiqué dans la Figure 4.12.

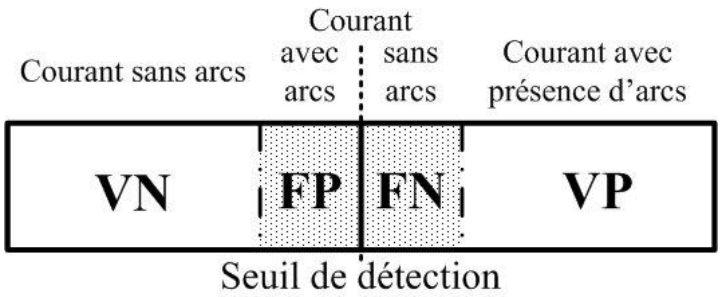


Figure 4.12. Critères de validation de résultats

Où :

- VP → Vrai positifs, les arcs électriques détectés
- FP → Faux positifs, les arcs électriques non détectés

- FN → Faux négatifs, les signaux sans arcs détectés comme défauts d'arc.
- VN → Vrais négatifs, les signaux sans arc électrique.

Selon la théorie statistique nous pouvons présenter deux grandeurs d'évaluation de test :

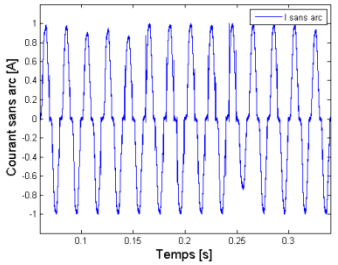
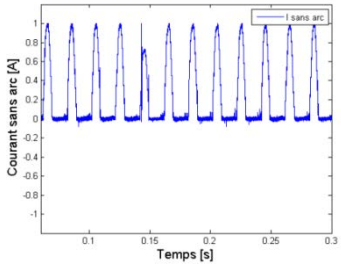
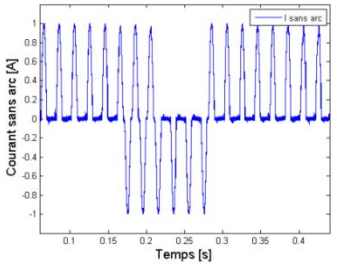
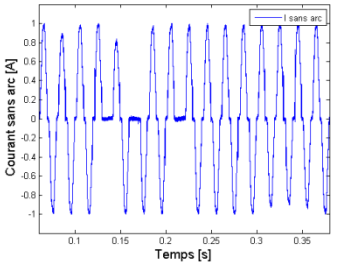
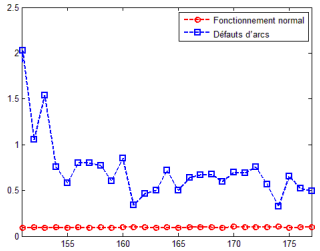
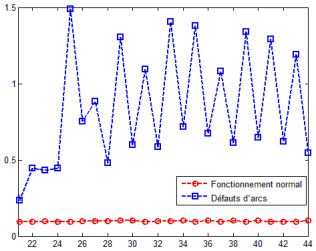
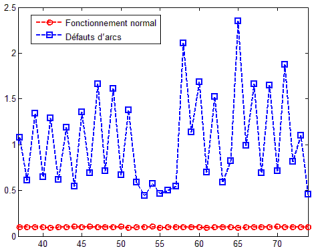
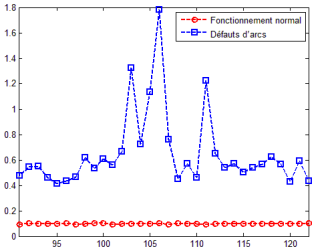
- **La sensibilité est la capacité d'un test de détecter les échantillons positifs lorsqu'ils sont vraiment positifs.**

$$Sensibilité = \frac{VP}{(VP + FN)} \quad (29)$$

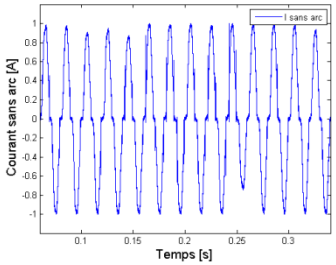
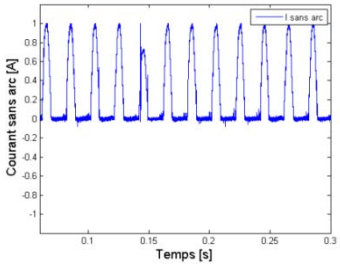
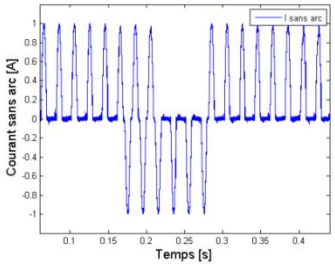
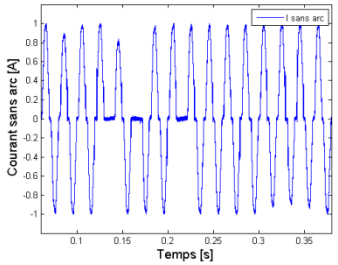
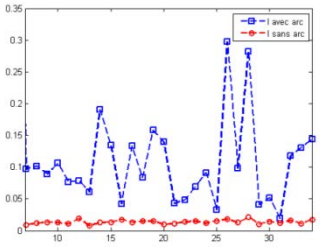
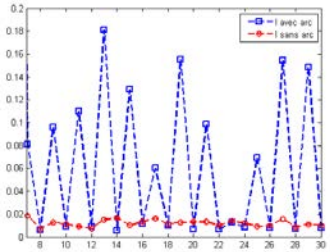
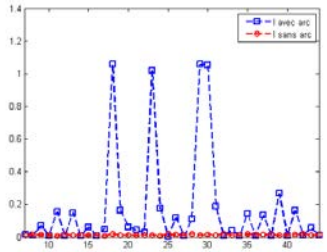
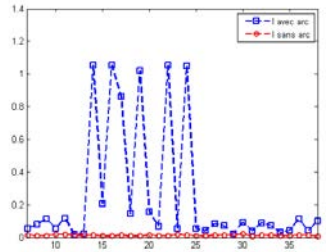
- **La spécificité est la capacité d'un test de détecter les échantillons négatifs lorsqu'ils sont vraiment négatifs.**

$$Spécificité = \frac{VN}{(VN + FP)} \quad (30)$$

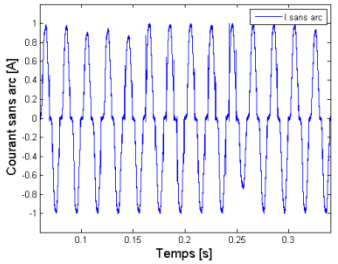
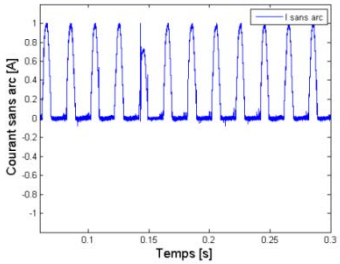
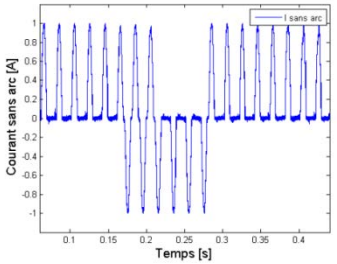
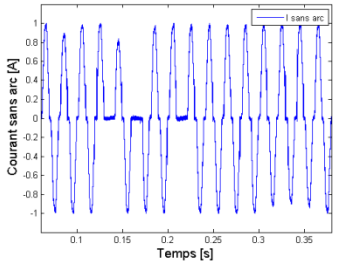
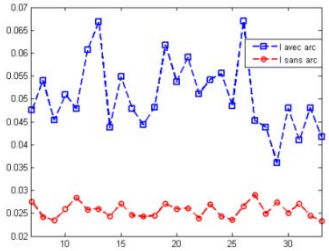
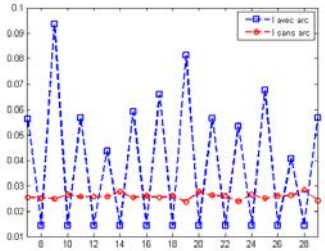
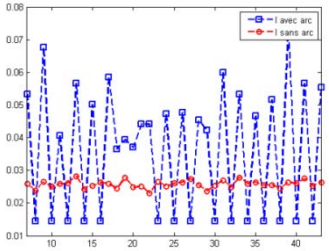
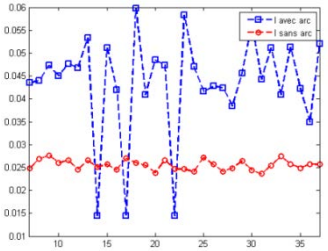
4.8.1 Méthode 1 : Énergie d'une bande de fréquence

	Charge 1 : Aspirateur			
	Test_01	Test_02	Test_03	Test_04
Courant				
Réponse				
# 1/2 pér	27	24	38	32
Seuil	0.2	0.2	0.2	0.2
# dp arc	27	12	22	29
#dp sans	0	12	16	3
#dpdétec VP	27	12	22	29
#dpnode FP	0	0	0	0
False-dét FN	0	12	16	3
VN	0	0	0	0
Sensibilité	100 %	50 %	45.8 %	90.6 %
Spécificité	100 %	100 %	100 %	100 %

4.8.2 Méthode 2 : PEDSR

	Charge 1 : Aspirateur			
	Test_01	Test_02	Test_03	Test_04
Courant				
Réponse				
# 1/2 pér	27	24	38	32
Seuil	0.027	0.027	0.027	0.027
# dp arc	27	12	22	29
#dp sans	0	12	16	3
#dpdétec VP	26	11	21	26
#dpnode FP	1	1	1	3
False-dét FN	0	0	2	3
VN	0	12	14	0
Sensibilité	100 %	100 %	91.3 %	89.7 %
Spécificité	50 %	92.3 %	93.3 %	25 %

4.8.3 Méthode 3 : EMDP

	Charge 1 : Aspirateur			
	Test_01	Test_02	Test_03	Test_04
Courant				
Réponse				
# 1/2 pér	27	23	38	31
Seuil	0.035	0.035	0.035	0.035
# dp arc	27	12	22	28
#dp sans	0	11	16	3
#dpdétec VP	27	12	22	28
#dpnode FP	0	0	0	0
False-dét FN	0	0	0	0
VN	0	11	16	3
Sensibilité	100 %	100 %	100 %	100 %
Spécificité	100 %	100 %	100 %	100 %

Les tests présentés précédemment ont montré que les méthodes 2 « PEDSR » et 3 « EMDP » ont une meilleure performance de détection pour des courants de forme particulière (apparition aléatoire d'un arc d'une période à l'autre correspondant à test_02, test_03 et test_04 de figures précédentes).

4.9 Méthode Combinée

La méthode proposée est basée sur l'exploitation des résultats obtenus lors des essais avec les méthodes présentées dans les sections 4.4 et 4.5.

Les résultats présentés dans la section 4.6 montrent une différence visuelle entre la réponse du courant avec arc et en fonctionnement normal. Malgré ces résultats visuels, nous pouvons observer la difficulté de placer un seuil de détection surtout pour le cas de charges de masquage. Ceci est la principale motivation pour l'élaboration d'une amélioration des méthodes présentées (sections 4.4 et 4.5) qui puisse être utilisées dans toutes les configurations de charges.

L'approche consiste dans l'implémentation des deux méthodes en parallèle pour ensuite additionner les coefficients de sortie pour chaque demi-période.

La Figure 4.13 montre le digramme des blocs de la méthode combinée.

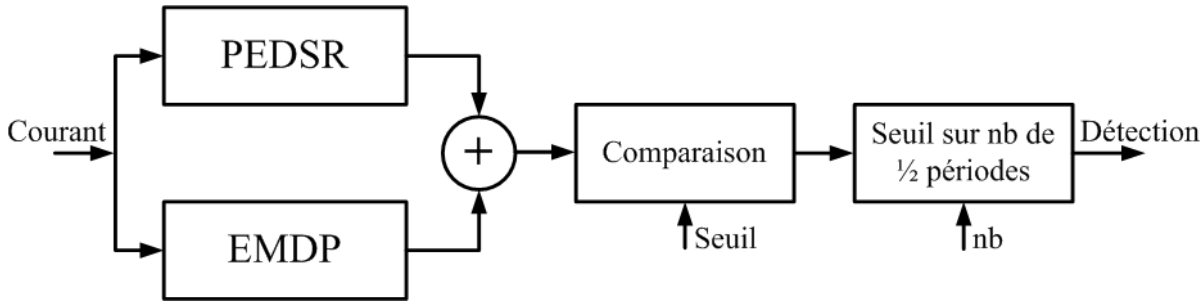


Figure 4.13. Méthode combinée

Les figures du Tableau 4.10 montrent les résultats pour les charges classiques du Tableau 4.1 (résistance, aspirateur, gradateur et alimentation à découpage). Le Tableau 4.10 montre quatre figures différentes concernant les résultats du test de la méthode combinée avec différentes charges. On observe une amélioration de la performance de discrimination en présence de défauts d'arcs et en fonctionnement normal. L'écart entre la réponse obtenue en présence ou non d'un arc est plus significatif que lors d'une utilisation individuelle de chacune des méthodes.

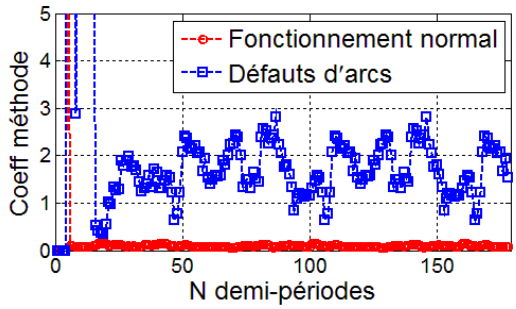
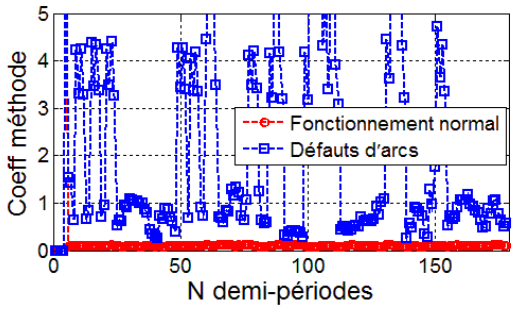
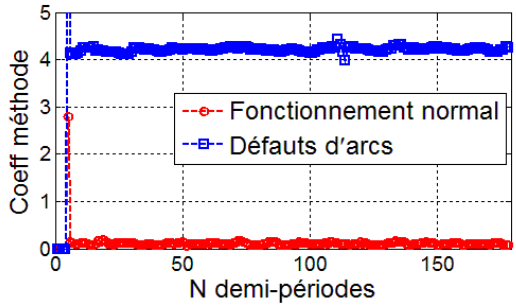
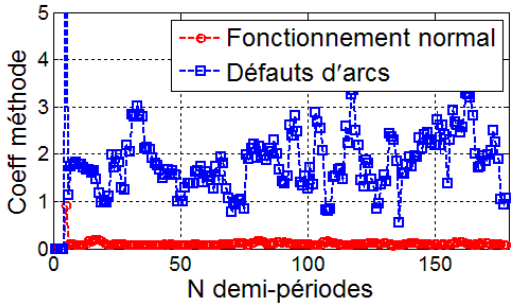
Réf	Charge 1	Charge 2
Méthode Combinée		
	Charge 3	Charge 4
Méthode Combinée		

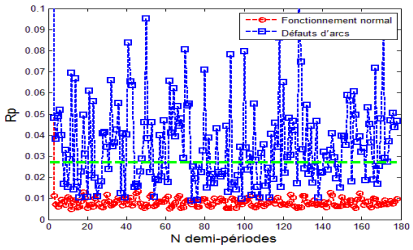
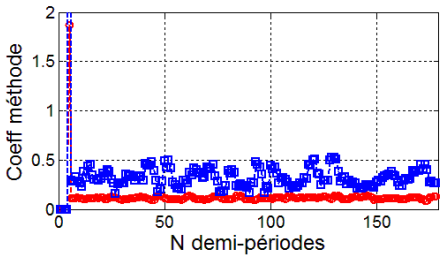
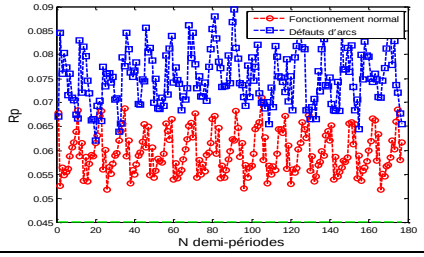
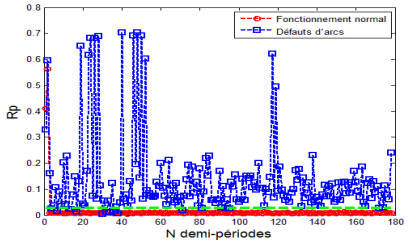
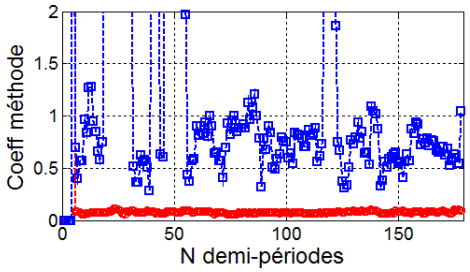
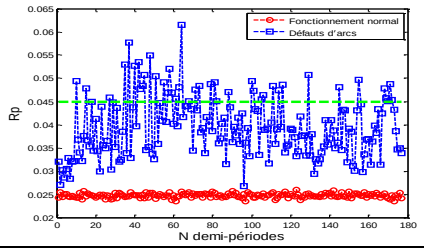
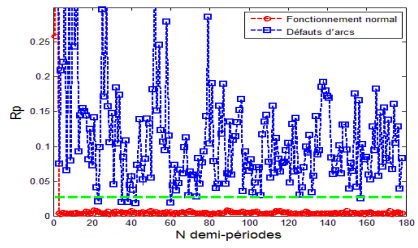
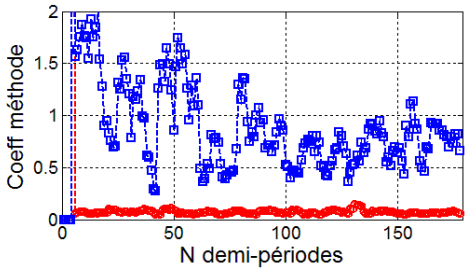
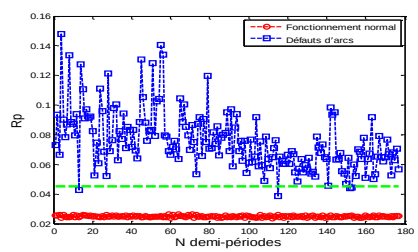
Tableau 4.10. Résultats pour des charges simples.

Cependant, lors des essais des méthodes présentées dans la section 4.8, pour toutes les différentes configurations de charges ; charge simple et charge de masquage, il y a des cas problématiques liés à l'influence de la non linéarité des charges. La méthode combinée doit permettre d'améliorer la réponse dans les cas les plus problématiques. Les figures du Tableau 4.12 présente les résultats pour ces cas problématique du Tableau 4.11.

Appellation	**Arc 1**	**Charge A**	**Arc 2**	**Charge B**
Charge 9	Non	Gradateur	Oui	Résistance
Charge 10	Non	Résistance	Oui	Aspirateur
Charge 11	Oui	Perceuse	Non	Résistance
Charge 12	Non.	Compresseur	Oui	Résistance

Tableau 4.11. Description des charges pour les cas selon la Figure 4.2.

Les résultats du Tableau 4.12 montrent une amélioration notable par rapport aux méthodes PEDSR et EMDP. Il va être possible de choisir un seuil de détection adéquat dans laquelle les fausses détections vont être réduites considérablement en comparaison aux autres méthodes.

Réf	Méthodes		Méthode Combinée
Charge 9	2.- PEDSR		
	3.-EMDP		
Charge 10	2.- PEDSR		
	3.-EMDP		
Charge 11	2.- PEDSR		
	3.-EMDP		

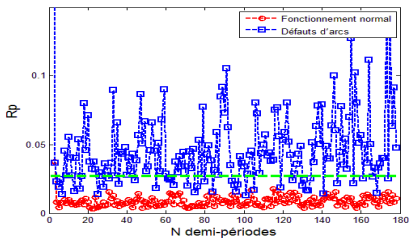
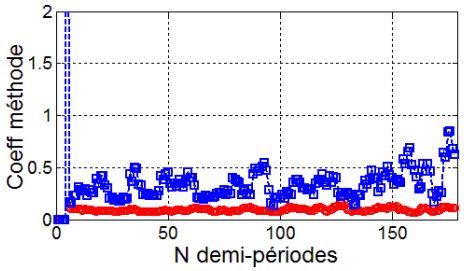
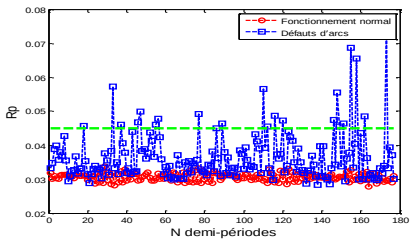
Charge 12	2.- PEDSR		
	3.-EMDP		

Tableau 4.12. Résultats pour de charges combinées.

4.9.1 Détermination du seuil de détection

Les différents résultats ont montré une amélioration des méthodes. Malgré les bons résultats visuels (Tableau 4.10 et Tableau 4.12), il est nécessaire de placer un seuil de détection pour faire la différence entre la réponse du courant en présence de défauts d'arcs et en fonctionnement normal.

Comme dans la section 4.7 la fréquence d'apparition des valeurs de sortie sera calculée pour déterminer le seuil optimal. Pour réaliser cette analyse, 178 demi-périodes par signature du courant ont été prises, toutes ces valeurs vont représenter les échantillons d'analyse.

Les valeurs de sortie sont séparées en plusieurs classes. Ensuite une distribution de fréquence d'apparition pour chaque classe est faite. Le résultat va permettre de choisir et de déterminer le seuil optimal.

La Figure 4.14 montre les résultats du calcul de distribution des fréquences d'apparition de la variable de sortie.

Deux secteurs très remarquables apparaissent : en bleu, la distribution de fréquences pour les valeurs en présence de défauts d'arcs et en rouge, la distribution pour le courant en fonctionnement normal. Un seuil optimal de discrimination pour la détection doit être placé entre les deux courbes. La sélection de cette valeur de seuil a comme contrainte principale que le résultat final ne doit pas avoir une grande sensibilité aux déclenchements intempestifs, c'est-à-dire éviter les fausses détections.

La Figure 4.15 est un histogramme où l'abscisse représente l'amplitude de notre indicateur de présence d'arc et l'ordonnée le nombre d'observations (en nombre de demi-périodes du signal de courant). La figure distingue en rouge les demi-périodes sans arc et en bleu la réponse du détecteur pour les demi-périodes présentant un arc avéré. Le nombre total d'observations pour chaque situation (avec ou sans arc avéré) est de 4671 demi-périodes. Chaque séquence expérimentale comporte en moyenne 86 périodes ainsi la Figure 4.15 fait la synthèse de 27 expériences pour chaque situation.

Les deux courbes se croisent entre les valeurs 0,15 et 0,22 de notre indicateur.

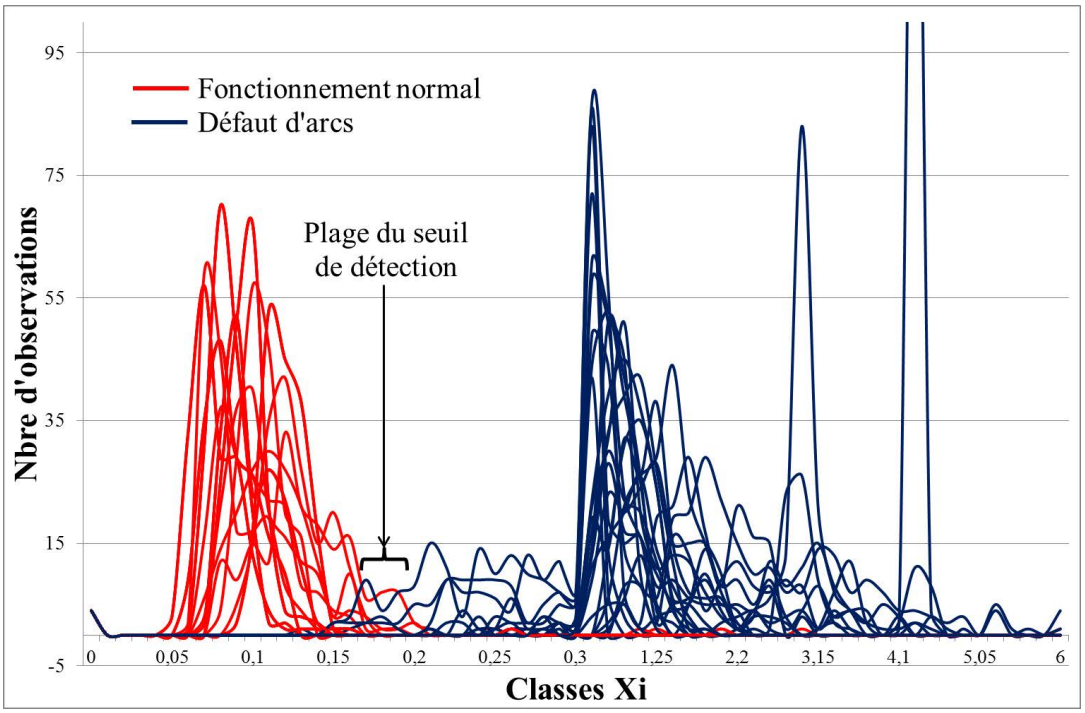


Figure 4.14. Distribution des fréquences pour la méthode combinée

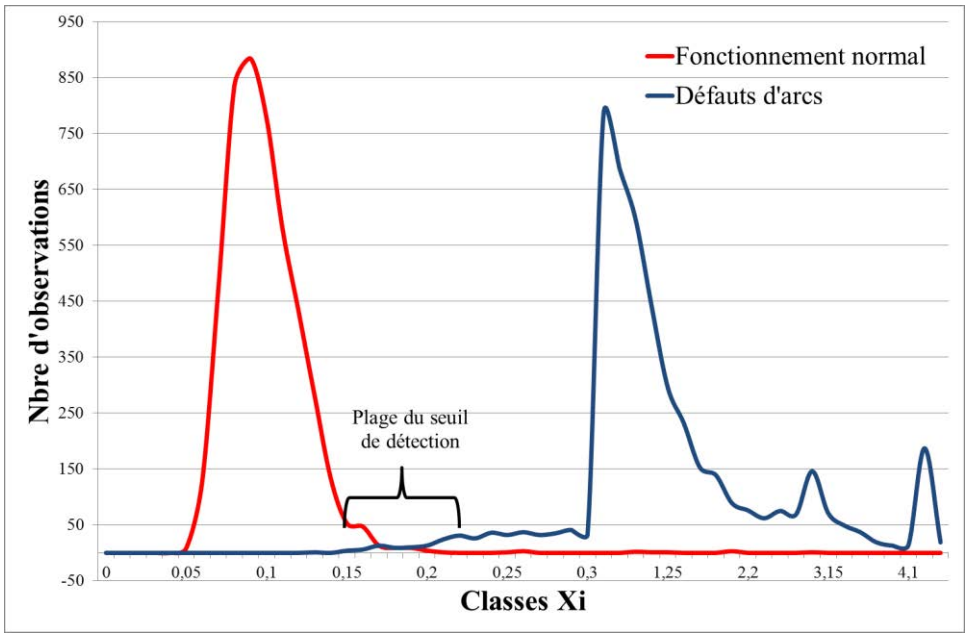


Figure 4.15. Histogramme de la distribution des fréquences moyennes

Dans le tableau 4.13 nous avons calculé les taux de détection (VP) et de non détection (FP) ainsi que le taux de fausse détection (FN) pour des signaux avec arc puis sans arc pour 4 valeurs différentes de seuil de détection.

On observe que si l'on privilégie le minimum de non détection (seuil à 0,15) alors 0,11% demi-périodes sont non détectées en revanche 1,78% de fausses détections sont à déplorer. A l'inverse, avec un seuil de 0,22 il n'y a plus de fausses détections. Toutefois 2,38% des observations présentant un arc ne sont pas détectées.

Signaux	Seuil	0.15	0.18	0.2	0.22
Défauts d'arc	**VP**	99.89%	99.29%	98.8%	97.62%
	FP	0.11%	0.71%	1.2%	2.38%
Sans arc	**VN**	98.22%	99.70%	99.98%	100%
	FN	1.78%	0.3 %	0.02%	0%

Tableau 4.13. Analyse du seuil de détection.

Une analyse plus approfondie de la Figure 4.14 nous permet d'observer l'existence de certains types de charges combinées (Tableau 4.14) qui ont de résultats très proche de la plage du seuil de détection.

Charges combinées	
Charge A	Gradateur avec un arc en série avec la charge résistive
Charge B	compresseur avec un arc en série avec la charge résistive
Charge C	Alimentation à découpage avec un arc en série avec la charge résistive

Tableau 4.14. Charges combinées.

Le Tableau 4.15 présente l'analyse du taux de détection et non détection pour les charges du Tableau 4.14 pour un nombre d'observations égal à 173 demi-périodes en présence de défauts d'arcs. On observe que si le seuil à une valeur plus grande, le pourcentage de non détection augmente pour chaque charge.

	Charge A		**Charge B**		**Charge C**	
Seuil	**VP**	**FP**	**VP**	**FP**	**VP**	**FP**
0.15	100 %	0 %	98.27 %	1.73 %	98.84 %	1.16 %
0.18	96.53 %	3.47 %	94.80 %	5.20 %	89.60 %	10.40 %
0.20	95.95 %	4.05 %	90.75 %	9.25 %	80.92 %	19.08 %
0.22	89.6 %	10.40 %	82.66 %	17.34 %	65.90 %	34.10 %

Tableau 4.15. Sélection du seuil pour les charges combinées.

Pour le cas de charges en fonctionnement normal, les charges du Tableau 4.16 ont des résultats très proches de la plage du seuil de détection.

Charges en fonctionnement normal	
Charge D	Perceuse
Charge E	Gradateur
Charge F	Alimentation à découpage

Tableau 4.16. Charges en fonctionnement normal.

Le Tableau 4.17 présente l'analyse du taux de fausse détection et de taux de demi-périodes non détectées pour les charges du Tableau 4.16 pour un nombre d'observation égal à 173 demi-périodes du courant en fonctionnement normal. On observe que si le seuil a une valeur plus grande, le pourcentage de fausse détection diminue pour chaque charge.

	Charge D		**Charge E**		**Charge F**	
Seuil	**VN**	**FN**	**VN**	**FN**	**VN**	**FN**
0.15	77.46 %	22.54 %	92.49 %	7.51 %	93.64 %	6.36 %
0.18	94.22 %	5.78 %	99.42 %	0.58 %	98.27 %	1.73 %
0.20	99.42 %	0.58 %	100 %	0 %	100 %	0 %
0.22	100 %	0 %	100 %	0 %	100 %	0 %

Tableau 4.17. Sélection du seuil pour les charges en fonctionnement normal.

Une réflexion générale sur l'analyse du Tableau 4.15 et Tableau 4.17 doit nous permettre de choisir un seuil de détection adéquat. Les valeurs de seuil 0.15 et 0.22 présentent des pourcentages de détection très différents pour le cas de non détection et de fausses détections.

Néanmoins, si l'on privilégie le minimum de non détection (seuil à 0,18) alors 3 % à 10 % des demi-périodes seront non détectées en revanche 0.5 % à 5,78% de fausses détections sont à déplorer. A l'inverse, avec un seuil de 0,20 nous obtenons 0.58 % de fausses détection et 4 % à 19 % des signaux présentant un arc ne sont pas détectées. En rappelant l'objectif principal d'un système de détection qui est de détecter les défauts d'arc électriques en intégrité mais en prenant en compte de ne pas faire de fausses détection. D'après l'ensemble de ces remarques le seuil de détection est fixé à 0.2.

4.10 Test de la méthode PEDSR avec le réseau électrique modélisé

Dans le chapitre 2 nous avons présenté les premiers éléments visant à mettre au point une plateforme virtuelle de test constituée d'un ensemble de module correspondant chacun à une charge domestique ou un arc électrique modélisé sous Matlab / Simulink - SimPowerSystems.

Les résultats de modélisation ont permis d'obtenir, pour des configurations de charges simples et de charges de masquage des signaux courant simulés très proche de ceux modélisés.

Dans cette partie nous allons donc tester les performances de la méthode PEDSR sur des signaux du courant issus de la modélisation et comparer les résultats de détection avec les signaux mesurés.

La Figure 4.16 représente le système électrique modélisé, il comprend un aspirateur en parallèle avec une charge résistive placée en série avec un défaut d'arc. Cette configuration de masquage représente un des essais de détection à réaliser selon la norme IEC62606.

La méthode de détection PEDSR est implémentée dans le bloc disjoncteur numérique. Un signal de commande « Trip » assure l'ouverture du circuit lors de la détection des défauts d'arcs électriques.

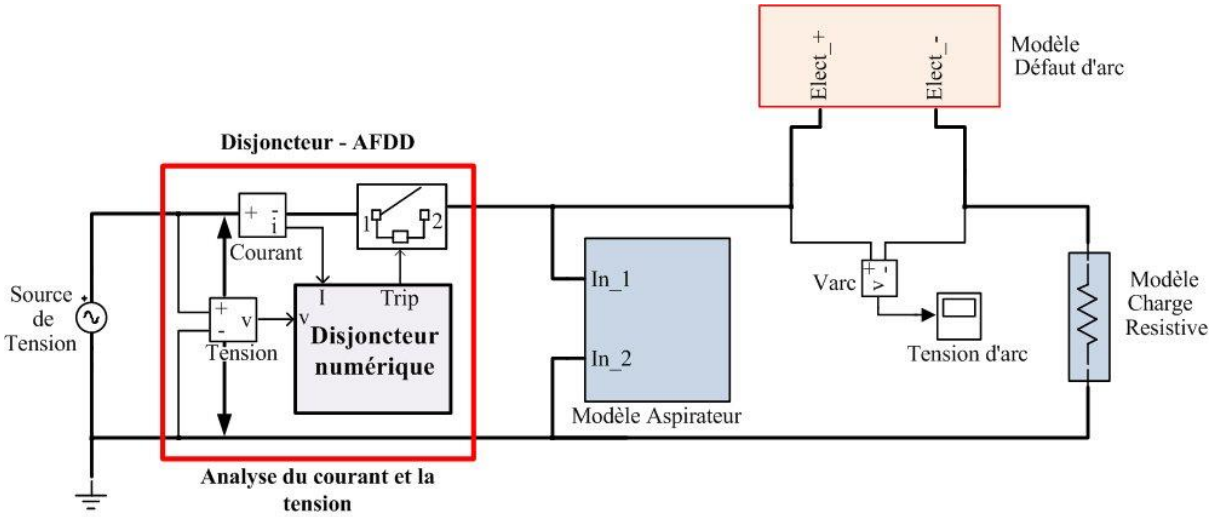


Figure 4.16. Modèle sous Matlab / Simulink – SimPowerSystems

Les Figure 4.17 et 4.38 représentent les courants mesuré et simulé obtenus avec et sans défaut d'arc sur la ligne suivant la configuration de test présentée sur la Figure 4.16. Nous obtenons une parfaite concordance entre ces deux signaux.

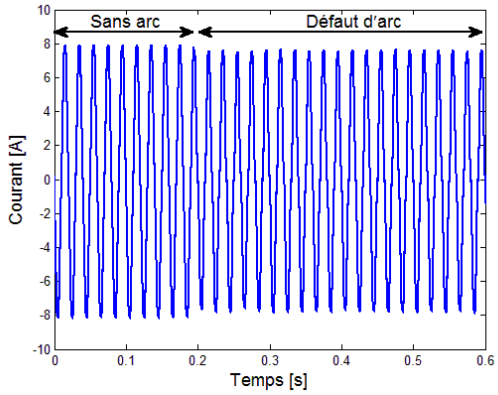


Figure 4.17. Courant mesuré

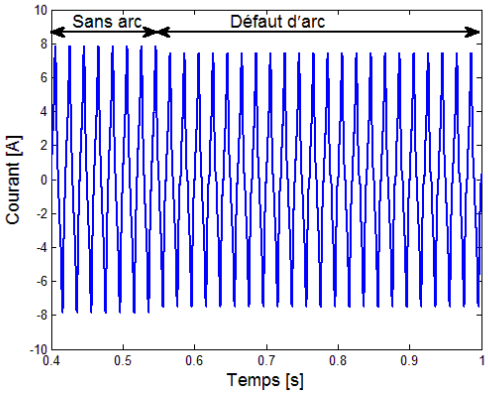


Figure 4.18. Courant simulé

Nous avons ensuite appliqué la méthode de détection PEDSR sur les courants simulé et mesuré. Les résultats de détection sont présentés dans la Figure 4.17 pour le courant mesuré et

dans la Figure 4.18 pour le courant simulé. Les résultats sont obtenus pour chaque demi-période du signal.

Le seuil de détection permettant de différencier la présence ou non d'un arc électrique a été fixé et optimisé à 0.027 conformément à la valeur obtenue dans section 4.7.2 Détermination du seuil fixe pour la méthode 2 (PEDSR).

Les Figure 4.19 et 4.40 présentent une bonne concordance en détection. Dans le cas d'un fonctionnement sans arc, les valeurs obtenues pour l'indicateur de détection (Rp) sont stables et proches d'une valeur nulle. Au contraire, en présence de défauts d'arcs sur la ligne les valeurs de l'indicateur de détection (Rp) sont très variables confirmant la présence d'un arc électrique.

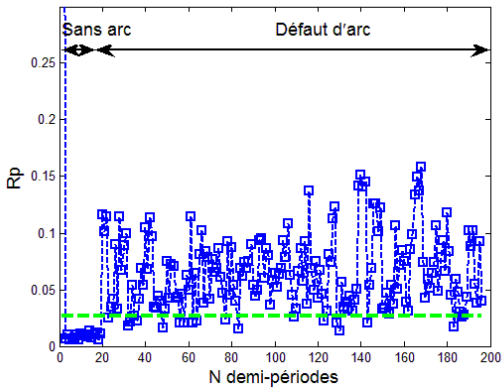


Figure 4.19. Résultat pour le courant mesuré

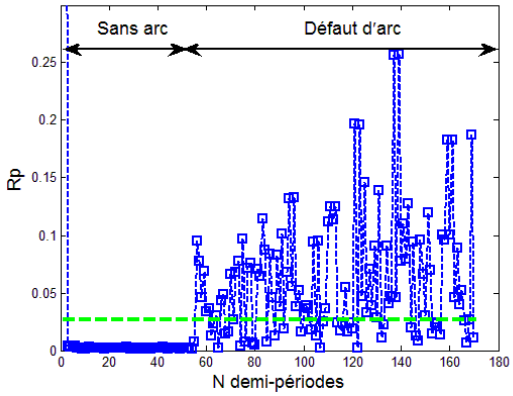


Figure 4.20. Résultat pour le courant simulé

4.11 Conclusion

Trois méthodes de détection originales ont été présentées dans ce chapitre, une basée sur l'analyse fréquentielle et deux autres sur l'analyse temporelle.

Pour l'analyse fréquentielle, l'observation de la bande de fréquence utilisée [1 kHz - 20 kHz] a permis d'obtenir de bons résultats de détection pour les charges simples et en présence d'arcs établis. Pour des courants de forme particulière (apparition aléatoire d'un arc d'une période à l'autre) les résultats ont montré des fausses détections.

En ce qui concerne les deux méthodes de détection basées sur l'analyse temporelle (PEDSR et EMDP), La suite de cette partie a été supprimée pour des raisons de confidentialité.

Chaque méthode a été présentée et testée sur différents types de charge. Les résultats analysés sous Matlab ont montré qu'il est possible de détecter les arcs sur différents types de charges. Pour le cas du courant en fonctionnement normal, la réponse des méthodes est très stables et quasiment de la même valeur. Cette stabilité de la réponse devient une caractéristique très importante à prendre en compte pour la différenciation entre un arc et un état normal.

Ces caractéristiques de valeurs stables pour le courant en fonctionnement normal et de valeurs aléatoires pour le cas en présence de défauts d'arcs ont permis l'étude et la détermination d'un seuil de détection pour chaque méthode.

Malgré ces bons résultats, des cas problématiques où la détermination d'un seuil fixe est très difficile (charges de masquage) subsistent. Nous avons donc proposé une nouvelle méthode de détection basée sur une exploitation combinée de la méthode PEDSR et l'EMDP. Les résultats très probants ont montré une meilleure discrimination entre le courant en fonctionnement normal et en présence de défauts d'arcs.

Cette nouvelle méthode a permis également la détermination d'un seuil de détection fixe pour un nombre important de cas problématiques. Lors des tests effectués, on remarque un bas taux de fausses détections. Ces résultats permettent de s'approcher à notre principal objectif de départ qui est d'avoir un bas taux de fausse détection, pour éviter des déclenchements intempestifs du dispositif de détection.

5 Conclusion générale et perspective

La détection de défaut d'arc est une problématique de première importance en Europe depuis la publication en 2013 de la norme internationale IEC62606. Le défi technologique consiste à proposer et développer des systèmes de protection électrique intégrant la détection de défauts d'arcs dans un disjoncteur classique qui travaille sous un réseau électrique 230 V – 50 Hz.

La première contribution de cette thèse porte sur la modélisation d'un réseau électrique constitué de charges électriques et d'un arc pouvant être associés suivant différentes configurations de tests.

La modélisation du réseau électrique a été réalisée en tenant compte de la source de tension, les différentes charges pouvant être présentes sur le réseau (perceuse, aspirateur, lampe, bouilloire, etc.), le modèle de défaut d'arc électrique. Dans ce réseau électrique modulaire, il est également possible d'insérer le module numérique destiné à l'implantation d'algorithmes afin de tester différentes méthodes de détection. Nous nous sommes basés sur les modèles existants de la littérature en les complétant afin de s'approcher du comportement réel et de la consommation électrique des charges. Dans le cas de l'aspirateur, nous avons ajouté au modèle d'un moteur universel un module pour la régulation du couple et un module pour le réglage de la puissance. La particularité du modèle de défaut d'arcs électriques que nous présentons dans ce travail est de prendre en compte le caractère aléatoire de l'arc.

Nous avons choisi de valider ces modèles en comparant les signaux mesurés et simulés dans le domaine fréquentiel en se basant sur le taux de distorsion harmonique (THD) du courant et dans le domaine temporel en calculant l'indice de confiance entre les formes d'onde des courants simulé et mesuré. Les modèles ont donné des résultats très satisfaisants. Dans la plupart des cas l'indice de confiance est supérieur à 90%. L'analyse harmonique quant à elle a montré une bonne concordance pour les harmoniques d'ordre impairs jusqu'au septième rang. L'outil que nous avons développé permet de tester et de développer rapidement et de façon fiable des algorithmes de détection tout en s'affranchissant de tests souvent long et lourds à réaliser. Nous avons également montré que les résultats de test de détection par la méthode PEDSR sont similaires.

Une autre contribution à cette thèse porte sur la problématique de mise au point de plusieurs algorithmes de détection de défaut d'arcs électriques sur le réseau basse tension domestique. Les méthodes de détection proposées reposent sur l'analyse du courant et de la tension de ligne du réseau.

La difficulté de détection est avérée d'une part sur des charges telles que l'aspirateur ou la perceuse qui ont des signatures de courtant pouvant se rapprocher de celle d'un arc électrique et d'autre part dans le cas de charges de masquage.

L'analyse de la norme IEC 62606 nous a ensuite permis de retenir un ensemble de charges et de configurations différentes (simples et combinées) pour le test de validation des algorithmes de détection.

Une grande partie de notre travail a été de mettre au point quatre méthodes originales de détection.

La première méthode proposée est basée sur une analyse fréquentielle. Le calcul de l'énergie est réalisé dans la bande de fréquence 1 kHz – 20 kHz. La détection est réalisée avec toutes les charges excepté le gradateur et les charges combinées.

La suite de cette partie a été supprimée pour des raisons de confidentialité.

Nous nous sommes intéressés ensuite au réglage d'un seuil unique pour toutes les charges. Pour résoudre cette problématique, une étude statistique de fréquence d'apparition des valeurs du résultat a permis de choisir le seuil fixe capable de discriminer la présence des arcs sur les signaux du courant.

Afin d'améliorer les performances de détection nous avons proposé une quatrième méthode basée sur la combinaison de la méthode PEDSR et celle de l'EMDP. Nous avons mis en évidence qu'il était possible d'améliorer l'écart de discrimination par rapport aux autres méthodes présentées précédemment pour les cas de détection les plus difficile à réaliser (cas des charges combinées ou de masquage). Nous sommes parvenus ainsi à minimiser le nombre de fausses détections et de régler un seuil fixe.

Afin d'évaluer les performances de notre modélisation nous avons comparé les résultats de détection de la méthode PEDSR entre les signaux issus de la mesure et ceux issus de la modélisation Matlab-Simulink. Les premiers résultats ont permis d'obtenir des performances de détection assez proche. La modélisation devrait sans doute permettre à l'avenir de s'affranchir de manipulations lourdes et longues à mettre en œuvre.

Perspectives

Les perspectives de ce travail sont nombreuses aussi bien au niveau de la modélisation que de la détection ou de la caractérisation du phénomène physique que représente l'arc électrique dans l'habitat.

Concernant la modélisation, une poursuite possible de ces travaux est de prendre en compte l'amélioration des modèles des différentes charges et plus particulièrement du moteur.

Nous devons également enrichir la base de données des charges modélisées en incluant les modèles de charges domestiques telles que le réfrigérateur, la machine à laver, l'ordinateur, etc….

Il serait également intéressant de compléter le modèle d'un défaut d'arc électrique en prenant en compte les caractéristiques physiques de l'arc comme la pression, la température, le matériau des électrodes, etc.

Concernant la partie détection, il nous faudra absolument tester les algorithmes de détection proposés dans cette thèse avec un ensemble des charges plus important et avec des configurations diverses (charge simple et charges combinées).

L'optimisation du seuil de détection peut être également améliorée en utilisant un seuil adaptatif en fonction du type de charge sur le réseau.

De plus, l'ensemble des algorithmes de détection mis au point dans ce travail ont montré leurs bonnes performances en régime établi. La prise en compte du régime transitoire doit absolument être réalisée pour aboutir à un produit performant. Une solution serait de mettre au point un algorithme de détection qui détecte le démarrage et l'arrêt de l'état transitoire (reconnaissance du type de charge, analyse de la puissance…) afin d'inhiber l'algorithme de détection. D'autres pistes concerne la mise au point d'algorithmes de détection d'arcs lors de la phase transitoire.

En cas d'utilisation de plusieurs méthodes de détection en parallèle il serait nécessaire d'étudier et de proposer une étape de logique de décision afin de fiabiliser la discrimination de la présence d'un défaut d'arc électrique.

A la problématique de détection des arcs électriques dans l'habitat s'ajoute également la nécessité d'explorer de nouvelles solutions innovantes sur la localisation de défaut dans un réseau électrique, en particulier à l'aide de méthodes non intrusives.

6 Bibliographie

[1] Underwriters_Laboratories, "UL Standard for safety for Arc Fautl Circuit Interrupter," in *ANSI UL 1699,* vol. Second Edition ed, 2008, p. 122.

[2] IEC62606, "General requeriments for arc fault detection devices," in *International Electrotechnical Commission* vol. First Edition, ed, 2013, p. 150.

[3] H. L. Floyd, J. J. Andrews, M. Capelli-Schellpfeffer, and D. P. Liggett, "An overview of the state-of-the-art in electrical safety technology, work practices and management systems," in *Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2003. Conference Record of the 2003 Annual*, 2003, pp. 123-140.

[4] G. D. Gregory and G. W. Scott, "The arc-fault circuit interrupter: An emerging product," *Ieee Transactions on Industry Applications,* vol. 34, pp. 928-933, Sep-Oct 1998.

[5] FEMA, "Residential building electrical Fires, Topical Fire Report Series," in *U.S. Fire Administration (USFA)* vol. 8, ed, 2008.

[6] FEMA2014, "Residential Building Fires (2009-2011)," in *Topical Fire Report Series, U.S. Fire Administration* vol. 14, ed, 2014.

[7] NF-C15100, "Norme NF C 15-100 ", ed, 2012.

[8] Groupe de Reflexion sur la sécurité électrique dans le logement. (consulté le 2 juillet 2014). *La sécurité électrique* [En ligne]. Available: http://www.gresel.org/incidentelectrique-2-4.html

[9] INPES, "Campagne Nationale de preventions des incendies domestiques," Institut National de Préventions et d'Education pour la Santé, France, Octobre 2004.

[10] V. Patel, *Electrical Wiring Systems and Fire Risk in Residential Dwellings*: Energy Safety Service, Consumer Affairs Branch, Ministry of Economic Development, New Zealand, 2005.

[11] S. Vacquié, M. Aubès, and E. Club, *L'arc électrique*: Eyrolles Paris, 2000.

[12] H. E. Bayda, "Etude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement: application à l'Arc Tracking," Thèse de doctorat, Laboratoire PLAsma et Conversion d'Energie (LAPLACE), UMR 5213, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2012.

[13] F. Koliatene, "Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique," Thèse de doctorat, Laboratoire PLAsma et Conversion d'Energie (LAPLACE), UMR 5213, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.

[14] A. Labergue, "Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas–Application au contrôle de décollements d'écoulements," Thèse de doctorat, LEA - Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques, Université de Poitiers, 2005.

[15] N. L. Allen, M. Abdel-Salam, and I. Cotton, "Effects of temperature and pressure change on positive corona and sparkover under direct voltage in short airgaps," *Science, Measurement & Technology, IET,* vol. 1, pp. 210-215, 2007.

[16] D. López del Moral Hernández, "Estudio de los efectos físicos y sistemas de protección en los sistemas de distribución de potencia eléctrica embarcados," Universidad Carlos III, Madrid, España Proyecto fin de carrera, Julio 2009.

[17] T. Schoepf and W. F. Rieder, "Consequences for automotive relays of a 42 VDC power network in vehicles," *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on,* vol. 23, pp. 177-182, 2000.

[18] E. Hetzmannseder and J. Zuercher, "42V DC Arc Faults–Physics and Test Methods."

[19] L. Jing, D. W. P. Thomas, M. Sumner, E. Christopher, and C. Yang, "Series Arc fault studies and modeling for a DC distribution system," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific*, 2013, pp. 1-6.

[20] A. E. Emanuel, D. Cyganski, J. A. Orr, S. Shiller, and E. M. Gulachenski, "High impedance fault arcing on sandy soil in 15 kV distribution feeders: contributions to the evaluation of the low frequency spectrum," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 5, pp. 676-686, 1990.

[21] C. J. Kim, "An arc/spark detection system as an early warning indicator of electric fire hazard - Final Report for the project "Development of a Home Networking System for Automation and Security Enhancement"," Howard University, Washington USA, Office of Research Administration, June 2002.

[22] K. Hocine, "Influence de l'effet couronne sur les surtensions dans les lignes et les transformateurs de haute tension," Faculte de genie electrique et d'informatique, Departement d'electrotechnique, Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou.

[23] G. D. Gregory, W. Kon, and R. Dvorak, "More about arc-fault circuit interrupters," in *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, 2003, pp. 1306-1313.

[24] J. Shea, "Comparing 240 Vrms to 120 Vrms Series Arcing Faults in Residential Wire," in *Electrical Contacts, 2008. Proceedings of the 54th IEEE Holm Conference on*, Orlando, FL, USA, 2008, pp. 218-224.

[25] O. Mayr, "Beiträge zur Theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens," *Archiv für Elektrotechnik,* vol. 37, pp. 588-608, 1943.

[26] A. Cassie, "Theorie Nouvelle des Arcs de Rupture et de la Rigidité des Circuits," *Cigre, Report,* vol. 102, pp. 588-608, 1939.

[27] A. H. Etemadi and M. Sanaye-Pasand, "High-impedance fault detection using multi-resolution signal decomposition and adaptive neural fuzzy inference system," *Generation, Transmission & Distribution, IET,* vol. 2, pp. 110-118, 2008.

[28] N. Zamanan and J. K. Sykulski, "Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in the electric arc," *WSEAS Transactions on Power Systems,* vol. 1, pp. 1507-1512, 2006.

[29] N. Zamanan, J. K. Sykulski, and A. K. Al-Othman, "Arcing High Impedance Fault Detection Using Real Coded Genetic Algorithm," presented at the Third IASTED Asian Conference Power and Energy Systems, 2007.

[30] A. R. Sedighi and M. R. Haghifam, "Simulation of high impedance ground fault In electrical power distribution systems," in *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 1-7.

[31] K. M. Shebl, E. A. Badran, and E. Abdalla, "A combined MODELS-TACS ATP draw general model of the high impedance faults in distribution networks," in *The 14th International Middle East Power Systems Conference (MEPCON'10)*, Cairo University Egypt, 2010.

[32] J. Andrea, P. Schweitzer, and E. Tisserand, "A New DC and AC Arc Fault Electrical Model," in *Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, Charleston, SC, USA, 2010, pp. 1-6.

[33] P. H. Schavemaker and L. van der Slui, "An improved Mayr-type arc model based on current-zero measurements," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 15, pp. 580-584, 2000.

[34] A. V. Masa, J.-C. Maun, S. Werben, and A. Siemens, "Characterization of high impedance faults in solidly grounded distribution networks," presented at the 17th Power Systems Computation Conference (PSCC), 2011.

[35] Siemens_USA. (consulté le 21 juillet 2014). *Arc Fault Detection* [En ligne]. Available: http://w3.usa.siemens.com/us/internet-dms/btlv/Residential/Residential-Murray/docs_LoadCentersBreakersMurray/MYPM-COMBO-0907.pdf

[36] Siemens. (consulté le 21 juillet 2014). *AFDD Advanced Preventive Fire Protection* [En ligne]. Available: https://www.automation.siemens.com/mcms/infocenter/content/en/Pages/order_form.aspx?nodeKey=key_9182047&infotype=3

[37] J. J. Shea, "Identifying causes for certain types of electrically initiated fires in residential circuits," *Fire and Materials,* vol. 35, pp. 19-42, 2011.

[38] J. Andrea, P. Schweitzer, E. Tisserand, P. Roth, and S. Weber, "Calibrated AC and DC Arcing Fault Generator," in *Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, Charleston, SC, USA, 2010, pp. 1-6.

[39] R. D. Patidar and S. P. Singh, "Harmonics estimation and modeling of residential and commercial loads," in *Power Systems, 2009. ICPS '09. International Conference on*, Kharagpur, INDIA, 2009, pp. 1-6.

[40] C. Venkatesh, D. S. Kumar, D. S. Sarma, and M. Sydulu, "Modelling of nonlinear loads and estimation of harmonics in industrial distribution system," in *Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC)*, IIT Bombay, 2008, pp. 592-597.

[41] P. R. Nasini, N. R. Narra, and Santosh, "Modeling And Harmonic Analysis Of Domestic/Industrial Loads," *International Journal of engineering research and Application IJERA,* vol. 2, pp. 485-491, September – October 2012.

[42] K. H. Loo, D. A. Stone, R. C. Tozer, and R. Devonshire, "A dynamic conductance model of fluorescent lamp for electronic ballast design simulation," *IEEE Transactions On Power Electronics,* vol. 20, pp. 1178-1185, 5 sept. 2005.

[43] R. N. Tuncay, M. Yilmaz, and C. Onculoglu, "The design methodology to develop new-generation universal-motors for vacuum cleaners," in *Electric Machines and Drives Conference, 2001. IEMDC 2001. IEEE International*, 2001, pp. 926-930.

[44] A. Di Gerlando, R. Perini, and G. Rapi, "Equivalent circuit for the performance analysis of universal motors," *Energy Conversion, IEEE Transactions on,* vol. 19, pp. 18-27, march 2004.

[45] A. Di Gerlando and R. Perini, "Modelling and test validation of high speed universal motors fed via a triac," in *Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 1173-1178.

[46] C. J. Willmott, "On the validation of models," *Physical geography,* vol. 2, pp. 184-194, 1981.

[47] L. Jian, S. Ng, G. Kendall, and J. Cheng, "Load Signature Study Part I: Basic Concept, Structure, and Methodology," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 25, pp. 551-560, April 2010.

[48] K. Ting, M. Lucente, G. S. Fung, W. Lee, and S. Hui, "A Taxonomy of Load Signatures for Single-Phase Electric Appliances," in *IEEE PESC - Power Electronics Specialist Conference*, 2005, pp. 1-6.

[49] G. W. Hart, "Nonintrusive appliance load monitoring," *Proceedings of the IEEE,* vol. 80, pp. 1870-1891, 1992.

[50] L. Jian, S. Ng, G. Kendall, and J. Cheng, "Load Signature Study—Part II: Disaggregation Framework, Simulation, and Applications," *IEEE Transactions On Power Delivery,* vol. 25, pp. 561-569, April 2010 2010.

[51] W. Lee, G. Fung, H. Lam, F. Chan, and M. Lucente, "Exploration on load signatures," in *International conference on electrical Engineering (ICEE)*, Japan, 2004, pp. 1-5.

[52] M. N. Valero Pérez, "A non-intrusive appliance load monitoring system for identifying kitchen activities," Automation and System Technology, Universidad Autónoma de Madrid, Faculty of Electronics, Communications and Automation, 2011.

[53] M. Kizilcay and P. La Seta, "Digital simulation of fault arcs in medium-voltage distribution networks," presented at the 15th PSCC, Liege, Belgium, 2005.

[54] J. Lezama, P. Schweitzer, S. Weber, E. Tisserand, and P. Joyeux, "Modeling of a Domestic Electrical Installation to Arc Fault Detection," in *Electrical Contacts (Holm), 2012 IEEE 58th Holm Conference on*, Portland, USA, 2012, pp. 1-7.

[55] IEC61000-3-2, "IEC 61000-3-2," in *Compatibilité électromagnétique* ed. International Electrotechnical Commission: IEC second edition, 2000.

[56] T. J. Ribarich and J. J. Ribarich, "A new high-frequency fluorescent lamp model," in *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting.*, Missouri, USA, 1998, pp. 2094-2098.

[57] J. Koprnicky, "Modèles de conductivité électrique pour lampes à décharge," Thèse de doctorat, LAPLACE, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, 2008.

[58] S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas, and S. Glozman, "Statics and dynamics of fluorescent lamps operating at high frequency: Modeling and simulation," *IEEE Transactions on Industry Applications,* vol. 38, pp. 1486-1492, 2002.

[59] M. Perdigão and E. Saraiva, "Electronic Ballast with Wide Dimming Range: Matlab-Simulink Implementation of a Double Exponential Fluorescent-Lamp Model," pp. 1-6, 2005.

[60] Z. Ping, J. R. Brauer, S. Stanton, Z. J. Cendes, and R. N. Ebben, "Dynamic modeling of universal motors," in *Electric Machines and Drives, 1999. International Conference IEMD '99*, 1999, pp. 419-421.

[61] H. Grop, "Modelling of a universal motor with speed control," Master, Department of Electrical Engineering Electrical Machines and Power Electronics, Royal Institute of Technology, Stockholm, 2006.

[62] C. E. Restrepo, "Arc Fault Detection and Discrimination Methods," in *Electrical contacts - 2007, the 53rd ieee holm conference on*, Pittsburgh, PA, USA, 2007, pp. 115-122.

[63] H. Bruce Land III, C. L. Eddins, and J. M. Klimek, "Evolution of arc fault protection technology at APL," *Johns Hopkins APL technical digest,* vol. 25, pp. 140-153, 2004.

[64] G. Parise, L. Martirano, U. Grasselli, and L. Benetti, "The arc-fault circuit protection," in *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the IEEE*, 2001, pp. 1817-1822.

[65] V. Babrauskas, "How do electrical wiring faults lead to structure ignitions," in *Fire and Materials Conference*, London, 2001, pp. 39-51.

[66] A. Kolker, S. Campolo, and N. DiSalvo, "A study of Time/Current Characteristics of the Ignition Processes in Cellulosic Material Caused by Electrical Arcing for Application in 240V Arc-Fault Circuit Interrupters," in *Electrical contacts - 2007, the 53rd ieee holm conference on*, Pittsburgh, PA, USA, 2007, pp. 105-114.

[67] S. J. Balser, K. A. Clements, and D. J. Lawrence, "A Microprocessor-Based Technique for Detection of High Impedance Faults," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 1, pp. 252-258, 1986.

[68] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, H. A. Darwish, A. M. I. Taalab, and M. A. Izzularab, "A novel selectivity technique for high impedance arcing fault detection in compensated MV networks," *European Transactions on Electrical Power,* vol. 18, pp. 344-363, May 2008.

[69] N. Hadziefendic, M. Kostic, and Z. Radakovic, "Detection of series arcing in low-voltage electrical installations," *European Transactions on Electrical Power,* vol. 19, pp. 423-432, Apr 2009.

[70] T. Kien Nguyen, O. Zammit, E. Dekneuvel, B. Nicolle, V. Cuong Nguyen, and G. Jacquemod, "An innovative non-intrusive load monitoring system for commercial and industrial application," in *Advanced Technologies for Communications (ATC), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 23-27.

[71] C. J. Kim, "Electromagnetic Radiation Behavior of Low-Voltage Arcing Fault," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 24, pp. 416-423, 2009.

[72] B. G. Moffat, M. P. Y. Desmulliez, K. Brown, C. Desai, D. Flynn, and A. Sutherland, "A micro-fabricated current sensor for arc fault detection of aircraft wiring," in *Electronics System-Integration Technology Conference, ESTC.*, 2008, pp. 299-304.

[73] J. A. Momoh and R. Button, "Design and analysis of aerospace DC arcing faults using fast fourier transformation and artificial neural network," in *Power Engineering Society General Meeting, 2003, IEEE*, 2003, pp. 788-793.

[74] P. Muller, S. Tenbohlen, R. Maier, and M. Anheuser, "Characteristics of Series and Parallel Low Current Arc Faults in the Time and Frequency Domain," in *Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, Charleston, SC, USA, 2010, pp. 1-7.

[75] K. Phipps, T. Cooke, D. Dorr, and P. Keebler, "Frequency phenomenon and algorithms for arc detection," in *Electromagnetic Compatibility (EMC), 2010 IEEE International Symposium on*, Fort Lauderdale, FL, USA, 2010, pp. 183-188.

[76] L. Wen-Jun and L. Yuan-Chun, "Arc fault detection based on wavelet packet," in *Machine Learning and Cybernetics. Proceedings of International Conference on*, Guangzhou, 2005, pp. 1783-1788.

[77] K. Wook Hyun, L. Gi Wen, P. Young Moon, Y. Man Chul, and Y. Myeong Ho, "High impedance fault detection utilizing incremental variance of normalized even order harmonic power," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 6, pp. 557-564, 1991.

[78] D. C. Yu and S. H. Khan, "An adaptive high and low impedance fault detection method," *Power Delivery, IEEE Transactions on,* vol. 9, pp. 1812-1821, 1994.

[79] J. Lezama, P. Schweitzer, S. Weber, E. Tisserand, P. Joyeux, and M. Rabla, "Frequency Analysis to Arcing Detection and Prototyping FPGA Approach," in *IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM)*, Newport, RI, USA, 2013, pp. 1-6.

[80] M. Rabla, E. Tisserand, P. Schweitzer, and J. Lezama, "Arc Fault Analysis and Localisation by Cross-Correlation in 270 V DC," in *IEEE 59th Holm Conference on Electrical Contacts (HOLM)*, Newport, RI, USA, 2013, pp. 1-6.

[81] G. Liu, Y. N. Cao, Y. Liu, and Z. Liu, "A survey on arc fault detection and wire fault location for aircraft wiring systems," *SAE International Journal of Aerospace,* vol. 1, pp. 903-914, 2009.

[82] B. D. Russell, R. P. Chinchali, and C. J. Kim, "Behaviour of low frequency spectra during arcing fault and switching events," *IEEE Transactions on Power Delivery,* vol. 3, pp. 1485-1492, 2002.

[83] R. Patterson, W. Tyska, B. D. Russell, and B. M. Aucoin, "A microprocessor-based digital feeder monitor with high-impedance fault detection," in *47th Annual Conference for Protective Relay Engineers–Texas A&M University*, 1994.

[84] H. Cheng, X. Chen, W. Xiao, and C. Wang, "Short-time fourier transform based analysis to characterization of series arc fault," in *2nd International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System (PEITS)*, Shenzhen, 2009, pp. 185-188.

[85] S. J. Hall, J. K. Hooker, K. V. Grigoryan, and S. Changali, "Arc detection using detailed and approximate coefficients from discrete wavelet transforms," U.S. Patent 8,159,793, 17 April, 2012.

[86] D.-w. Park, I.-k. Kim, S.-y. Choi, and G.-s. Kil, "Detection algorithm of series arc for electrical fire prediction," in *International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD 2008.*, Beijing, 2008, pp. 716-719.

[87] I.-k. Kim, D.-w. Park, S.-y. Choi, and G.-s. Kil, "Detection and Analysis of Series Arc Discharge in Indoor Wiring Systems," in *Proceedings of the 7th WSEAS International Conference on Power Systems*, Beijing, China, 2007, pp. 267-271.

[88] B. M. Aucoin and B. D. Russell, "Distribution High Impedance Fault Detection Utilizing High Frequency Current Components," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on,* vol. PAS-101, pp. 1596-1606, 1982.

[89] R. F. Dvorak and K. B. Wong, "Arc fault circuit interrupter system," U.S. Patent 7,253,637, 7 Aug., 2007.

[90] R. Zhang and Z. Song, "Arc Fault Detection Method Based on Signal Energy Distribution in Frequency Band," in *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific*, Shanghai, 2012, pp. 1-4.

[91] H. Ji, G. Kil, S. Kim, S. Choi, D. Park, and K. Rhyu, "Series Arc Detection in Inverter-Driven Air Conditioners," presented at the The international conference on electrical Engineering, 2009.

[92] X. Zhou, J. J. Shea, K. L. Parker, and T. J. Miller, "Arc fault circuit interrupter and series arc fault detection method using plural high frequency bands," U.S. Patent 7,633,727, 15 dec., 2009.

[93] A. A. Haun, B. G. Grattan, K. B. Wong, R. F. Dvorak, and G. W. Scott, "Arc fault circuit interrupter," U.S. Patent 6,414,829, 2 july, 2002.

[94] J. Shea and J. B. Carrodus, "RF Current Produced from Electrical Arcing," in *Electrical Contacts (Holm), 2011 IEEE 57th Holm Conference on*, 2011, pp. 1-9.

[95] J. M. Martel, M. Anheuser, and F. Berger, "A Study of Arcing Fault in the Low-Voltage Electrical Installation," in *Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, 2010, pp. 1-11.

[96] J. Shea and X. Zhou, "RF Currents Produced from AC Arcs with Asymmetrical Electrodes," in *Electrical Contacts (HOLM), 2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on*, 2010, pp. 1-11.

[97] C. Restrepo, P. Staley, A. Nayak, V. Mikani, H. Kinsel, S. R. Titus*, et al.*, "Systems and methods for arc fault detection," U.S. Patent 7,864,492, 4 jan., 2011.

[98] H. Zbigniew and B. Andrzej. (2007, consulté le 17 sept 2014). *Inter-harmoniques (Leonardo Energy ed.)*. Available: http://fr.leonardo-energy.org/wp-content/uploads/2008/01/3_1_1_harmoniques_inter-harmoniques.pdf

[99] Z. Hanzelka and A. Bien, "Harmonics–interharmonics," presented at the Leonardo Power Quality Application Guide–Part 3.3, 2004.

[100] J. Johnson and J. Kang, "Arc-fault detector algorithm evaluation method utilizing prerecorded arcing signatures," in *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2012 38th IEEE*, Austin, TX, USA, 2012, pp. 1378-1382.

[101] A. Dabroom and H. K. Khalil, "Numerical differentiation using high-gain observers," in *Decision and Control, 1997., Proceedings of the 36th IEEE Conference on*, 1997, pp. 4790-4795.

[102] D. d. Wit. (consulté le 14 juillet 2014). *Analyse Numérique*. Available: http://lpc2e.cnrs-orleans.fr/~ddwit/enseignement/cours_analnum.pdf
[103] H. Daqing, "Detection of high-impedance faults in power distribution systems," in *Power Systems Conference: Advanced Metering, Protection, Control, Communication, and Distributed Resources, 2007. PSC 2007*, 2007, pp. 85-95.
[104] P. Duvaut, "Influence des moments d'ordre trois sur la structure d'un algorithme adaptatif lin eaire-quadratique," *Traitement du Signal,* vol. 7, pp. 477-488, 1990.
[105] A. Abdi, C. Tepedelenlioglu, M. Kaveh, and G. Giannakis, "On the estimation of the K parameter for the Rice fading distribution," *Communications Letters, IEEE,* vol. 5, pp. 92-94, 2001.
[106] B. F. Zoko, "Location of arcing faults using a radio measurement," Helsinki University of Technology, 2009.
[107] S. Arunachalam, "A new approach to arc fault detection for AC and DC systems," M.S., ETD Collection for University of Texas, El Paso, United States - Texas, 2005.
[108] M. Parker, C. V. Pellon, M. D. Rabiner, and C. A. Nicolls, "Arc fault detection based on a correlation of the absolute current and the differential current," EP Patent 1,772,936, 2007.
[109] P. Rajamani, D. Dey, and S. Chakravorti, "Cross-correlation aided wavelet network for classification of dynamic insulation failures in transformer winding during impulse test," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on,* vol. 18, pp. 521-532, 2011.
[110] J. Hine and G. B. Wetherill, "Coefficient of correlation," in *A Programmed Text in Statistics Book 4: Tests on Variance and Regression*, ed: Springer Netherlands, 1975, pp. 32-41.
[111] C. Kim and B. Russell, "Analysis of distribution disturbances and arcing faults using the crest factor," *Electric power systems research,* vol. 35, pp. 141-148, 1995.
[112] D. Istrate, "Détection et reconnaissance des sons pour la surveillance médicale," Thèse de doctorat, Communication Langagière et Interaction Personne - Système CLIPS-IMAG, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2003.
[113] G. SICOT and S. HOUCKE, "Etude statistique du seuil dans la détection d'entrelaceur," presented at the 20° Colloque sur le traitement du signal et des images, France, 2005.

Résumé

Les défauts d'arcs électriques sont souvent la cause du déclenchement d'un incendie dans l'habitat. Les détecter constitue une amélioration de la sécurité électrique domestique.

La contribution de cette thèse porte sur la problématique de l'identification et de la détection de défauts d'arcs électriques sur le réseau basse tension domestique (charge simple et combinée). Dans ce travail de thèse, le premier axe de recherche porte sur la mise en œuvre d'un modèle de simulation de réseau. Sur le modèle de réseau l'objectif est d'introduire à volonté et de manière graphique des charges de nature différentes associées à un défaut d'arc électrique série. La modélisation porte sur la source de tension, des charges domestiques, le défaut d'arc et le bloc d'analyse numérique du courant et de la tension pour la commande d'un disjoncteur. Le second axe de recherche porte la mise au point de méthodes de détection robuste d'un défaut d'arc électrique Quatre méthodes originales de détection portant sur la tension et le courant de ligne ont été développées dans le cadre de ce travail de thèse. Elles sont toutes basées sur l'analyse des caractéristiques fréquentielles et temporelles du courant de ligne. Toutes les méthodes produisent une information dont l'amplitude tend à s'accroître en présence d'un arc électrique. Toutefois, le caractère non déterministe et très variable des signaux produits par un arc électrique ainsi que la grande variabilité des charges et des perturbations qu'elles introduisent rendent la détection très difficile. L'ensemble des études s'est donc systématiquement composé d'une comparaison entre la situation avec et sans arcs. Le résultat a abouti à une approche combinée de plusieurs méthodes et d'un modèle simple de décision basé sur un simple seuil. Un prototype implémentant une partie de l'algorithme a montré la faisabilité d'un circuit en temps réel.

Mots-clés : défauts d'arcs, modélisation de charges domestiques, réseau électrique basse tension, détection de défauts d'arcs, AFDD.

Abstract

The electrical arc faults are the cause of electrical home fire. Detecting them is an improvement of domestic electrical safety.

The thesis contribution focuses on the problem of the electrical arc fault identification and detection in the domestic low voltage network. In this thesis, the first research objective is the modeling of a domestic electrical network. The aim of the modeling is to recreate graphically the loads and the topology of the real domestic electrical network associated with a series electrical arc fault. The modeling is made on the AC voltage source, domestic loads, arc fault model and a block of current and voltage analysis to control a circuit breaker. The second research objective is the development of a robust method for detecting arcing fault. Four detecting methods were developed as part of this thesis; they are based on the current analysis of frequency and time characteristics. All methods generate information whose amplitude tends to increase in the presence of an electric arc. However, the non-deterministic and random feature of the signals produced by the electrical arc fault as well as the large number and variability of loads and the disturbances which they introduce make the arc detection very difficult. All the studies consistently are composed of a comparison between the normal operation and arc fault signals. The result has resulted in a combined approach of some methodologies and a simple decision model based on a threshold. A prototype which contains a part of the algorithm was shown the feasibility of a circuit in real time.

Keywords: arcing faults, domestic loads modeling, electrical network, arc fault detection, AFDD.