Nancy-Université
Université Henri Poincaré

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 SCD Nancy 1 : theses.sciences@scd.uhp-nancy.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

Nancy-Université
Université Henri Poincaré

École doctorale IAEM Lorraine

U.F.R. Sciences et Techniques, Mathématiques, Informatiques, Automatique
Département de formation Doctorale Electronique Electrotechnique

Génération, modélisation et détection des défauts d'arc électrique : application aux systèmes embarqués aéronautiques

Présentée et soutenue le 16 mai 2011

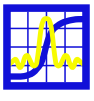
pour l'obtention du

Doctorat de l'université Henri Poincaré - Nancy 1
spécialité systèmes électroniques

par

Jonathan ANDREA

Rapporteurs :	M. Eric MONMASSON	Professeur, Université Cergy Pontoise
	M. Hubert RAZIK	Professeur, Université de Lyon
Examinateurs :	M. Emmanuel ODIC	Professeur, Supélec, Campus de Gif
	M. Dominique PLACKO	Professeur, ENS de Cachan
	M. Patrick SCHWEITZER	MCU- HDR, Nancy Universités
	M. Etienne TISSERAND	MCU- HDR, Nancy Universités
	M. Serge WEBER	Professeur, Nancy Universités
Invité:	M. Marc BOURNAT	Esterline Power Systems



Laboratoire d'Instrumentation Electronique de Nancy
Faculté des Sciences - 54506 Vandoeuvre-lès-Nancy

A ma famille

Faire simple n'est pas toujours facile,
Maître Yoda

Remerciements

Je tiens à saluer ici les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la concrétisation de ce travail de thèse de doctorat.

Tout d'abord, mes remerciements s'adressent aux personnes qui m'ont proposé le sujet de thèse et qui m'ont encadré tout au long de ces années d'étude : M. Bournat et J.M. Stocklouser. Au travers de nos discussions, ils m'ont apporté une compréhension plus approfondie des divers aspects du sujet ainsi que les moyens financiers de cette réussite.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à S. Weber, directeur du Laboratoire d'Instrumentation Electronique de Nancy. Ses précieux conseils concernant les aspects scientifiques mais également humains ont contribués significativement à la réussite de ce travail.

Je suis très reconnaissant envers P. Schweitzer d'avoir accepté la direction de ce travail de thèse. Bien plus qu'un encadrant, Patrick a su devenir un vrai partenaire et un collègue de travail efficace. Je ne crois pas me tromper en disant que Patrick Schweitzer est probablement le meilleur directeur de thèse qu'il soit donné d'avoir. Je souhaite à tous thésard d'être encadré par une personne ayant ses qualités.

Je remercie E. Tisserand, qui a notablement contribué à ma compréhension des problèmes liés à la détection des défaut d'arcs. En outre, je lui suis reconnaissant de l'accueil, de la patience, et de la disponibilité dont il a fait preuve pour discuter certains des aspects scientifiques et techniques du sujet.

Je souhaite également remercier les personnels du laboratoire sans qui la réalisation des expérimentations réalisées durant cette thèse n'aurai eu lieu : P. Roth et P. Schmitt.

Je remercie également S. Calvi pour l'aide à la conception des différents systèmes électroniques élaborés durant ce travail, mais également pour le temps qu'il a consacré à m'aider.

Je clos enfin ces remerciements en dédiant cette thèse de doctorat à mes parents, à mes frères ainsi qu'aux quelques amis que j'ai eus la chance d'avoir à mes côtés, et qui m'ont soutenu tout au long de ces années de travail.

Table des matières

1 Introduction **11**
1.1 Problématique . . . 13
1.1.1 Caractérisation des signaux d'arc . . . 13
1.1.2 Production des arcs . . . 14
1.1.3 De la nécessité d'un modèle... . . . 14
1.1.4 Algorithmes de détection . . . 15
1.2 Contenu du document . . . 16

2 État de l'art **17**
2.1 Système de distribution électrique . . . 18
2.1.1 Réseau électrique dans un avion . . . 18
2.1.2 Câbles électriques d'un avion . . . 20
2.2 Défauts d'arcs sur les câbles électriques . . . 21
2.2.1 Causes d'apparitions . . . 21
2.3 Systèmes de protection . . . 23
2.3.1 Maintenance préventive . . . 23
2.3.2 AFCB . . . 25
2.3.3 SSPC . . . 30

3 Modélisation des arcs électriques dans un circuit **33**
3.1 Introduction . . . 34
3.1.1 Problématique . . . 34
3.1.2 Modèles d'arcs dans l'histoire . . . 35
3.1.3 Les arcs électriques et leurs modèles . . . 36
3.2 Physique de l'arc . . . 38
3.2.1 Généralités sur les plasmas . . . 38
3.2.2 Décharge électrique DC . . . 38
3.2.3 Caractéristique statique . . . 40
3.2.4 Décharge électrique AC . . . 42
3.2.5 Caractéristique dynamique . . . 42
3.3 Modèles existants . . . 44
3.3.1 Les modèles d'impédance . . . 44
3.3.2 Modèles comportementaux . . . 48
3.3.3 Performances comparées des modèles d'arc . . . 55
3.4 Élaboration d'un méta-modèle . . . 61
3.4.1 Hypothèses pour la modélisation . . . 61
3.4.2 Principe du méta-modèle . . . 62
3.4.3 Méta-modèle utilisant le modèle d'Ayrton . . . 63
3.4.4 Modification de l'équation de Mayr . . . 65
3.5 Simulation du méta-modèle . . . 67
3.5.1 Implantation du méta-modèle sous Spice . . . 67
3.5.2 Implantation du méta-modèle sous Matlab . . . 69
3.6 Résultats de simulation . . . 70
3.6.1 Performances du méta-modèle en régime DC . . . 70
3.6.2 Performances du méta-modèle en régime AC . . . 71

4 Génération de défauts d'arc **79**
4.1 Introduction . . . 80
4.1.1 Problématique générale . . . 80
4.1.2 Méthodes d'amorçage couramment employées . . . 81
4.1.3 Amorçage par surtension . . . 85
4.2 GDARC . . . 87
4.2.1 Présentation du GDARC . . . 87
4.2.2 Principe d'amorçage du GDARC . . . 88
4.2.3 Composants du GDARC . . . 94
4.2.4 Partie mécanique du GDARC . . . 99
4.3 Résultats Expérimentaux . . . 104
4.3.1 Mesures à vide . . . 104
4.3.2 Mesures AC avec charges RL série . . . 105
4.3.3 Mesures DC avec charges RL série . . . 106
4.3.4 Relevés des caractéristiques statiques . . . 106
4.3.5 Caractéristique dynamique V(I) . . . 109
4.4 Conclusion sur la génération des défauts d'arc . . . 110

5 Détection de défauts d'arc **111**
5.1 Introduction . . . 112
5.1.1 Classification des algorithmes de détection . . . 113
5.1.2 Proposition d'un système de détection . . . 114
5.1.3 Méthodologie de conception du disjoncteur . . . 115
5.2 Transformée en ondelette des signaux électriques . . . 117
5.2.1 Généralité sur la transformée en ondelettes . . . 117
5.2.2 Application à la détection d'arcs électriques . . . 121
5.2.3 Résultats . . . 123
5.2.4 Ondelette pour la détection . . . 124
5.2.5 Simulation sous Matlab . . . 125
5.2.6 Conclusion sur l'exploitation de la DWT pour la détection d'arc . . . 126
5.3 Détection par analyse spectrale . . . 129
5.3.1 Principe de fonctionnement . . . 129
5.3.2 Détection des harmoniques . . . 129
5.3.3 Schéma du système de détection . . . 132
5.3.4 Logique de discrimination . . . 133
5.3.5 Conclusion . . . 133
5.4 Méthode par différenciation temporelle . . . 134
5.4.1 Principe de fonctionnement . . . 134
5.4.2 Application à la détection de défaut d'arc . . . 135
5.4.3 Application sur un signal leurre . . . 135
5.4.4 Simulation sous Matlab . . . 137
5.5 Algorithme d'interpolation pour la détection . . . 140
5.5.1 Équations de Lagrange . . . 140
5.5.2 Application pour le traitement du signal . . . 140
5.5.3 Architecture de Farrow . . . 142
5.5.4 Application à la détection . . . 143
5.6 Algorithme de détection basé sur la dérivée . . . 148
5.7 Comparaison des simulations des algorithmes . . . 151

5.7.1 Simulation Matlab 151
5.7.2 Comparaison des performances 152
5.7.3 Simulation et comparaisons sur des signaux réels AC 153
5.8 Logique de discrimination 160
5.8.1 Discrimination 160
5.8.2 Courbe de disjonction 160

6 Conclusion générale et perspectives 163

7 Annexes 167
7.1 Valorisation et communication scientifique 168
7.2 Réalisation d'un prototype d'AFCB 169
7.3 Gallerie de signaux d'arc 170
7.4 Gallerie de photo d'arc 173

Chapitre 1

Introduction

Dépêche AFP, le 11 Novembre 2010 :

*« **Boeing suspend les vols d'essai du 787**. Le constructeur aéronautique américain Boeing a annoncé que les vols d'essai de son nouvel avion 787, dit "Dreamliner", étaient suspendus, le temps d'éclaircir les circonstances d'un incendie en vol qui a conduit à un atterrissage d'urgence mardi au Texas. »*
42 personnes étaient à bord, principalement des ingénieurs et des personnels de la FAA. L'incident s'est produit sur l'un des six Dreamliner d'essais. Tous ont été suspendus de vol durant l'investigation.

Le 29 novembre 2010, David Barrie, www.aeroweb-fr.net :

*« **Boeing : Modification du panneau électrique sur le 787.** Boeing a procédé à des changements sur les panneaux de distribution électrique sur les 787. Des mises à jour des logiciels des systèmes gérant et protégeant la distribution du courant vont aussi être réalisés pour palier aux problèmes rencontrés lors d'un début d'incendie d'origine électrique sur l'avion de test. Les raisons de ce feu ont aussi été identifiées : **un arc électrique** [...] a démarré dans le panneau, probablement à cause de débris d'origine étrangère. »*

Le 18 janvier 2011, François Duclos, www.air-journal.fr :

*« **Le Boeing 787 reprend les vols de certification.** Le constructeur américain Boeing a annoncé la reprise des vols de certification du 787 Dreamliner, pour la première fois depuis un incendie électrique qui avait immobilisé la flotte en novembre 2010. »*

Cette mésaventure qu'a connu Boeing, et qui est livrée ici sous forme de courtes informations, s'est terminée il y a quelques jours à peine avant que ces lignes ne soient écrites. Fort heureusement, cet incident n'a eu aucune conséquences pour les personnes.
Ce n'est pas la première fois qu'un arc électrique est à l'origine d'incidents ou d'accidents aériens graves par incendie ou par destruction d'organes électriques fondamentaux (ex : actionneurs, panneau supérieur,...). Deux cas sont souvent cités, celui du vol TWA 800 en 1996 et celui du Vol Swiss Air 11 en 1998, dont les conséquences furent dramatiques. On comprend aisément que prévenir et détecter les arcs électriques est une nécessité pour la sécurité en aéronautique.

Ces arcs ou plutôt, ces défauts d'arc, ont pour causes principales le vieillissement et la détérioration des câbles. En effet, au cours du temps et à cause de fortes contraintes environnementales telles que la température ou les vibrations, on observe l'apparition d'arcs électriques dans deux situations :

- sur les câbles parcourant la structure de l'avion. Les arcs ainsi produits peuvent s'auto entretenir et conduire à un phénomène dit arc tracking sur les câbles conduisant à des incendies.
- sur les organes de commutation (contacteurs, disjoncteurs) dont les vis de fixation se desserrent sous l'effet des vibrations.

Le vieillissement des câbles n'est cependant pas la seule cause d'apparition des arcs, un débris, comme dans le cas du boeing 787, ou même une simple contamination par un liquide (huile, eau, eau salée...) sont susceptibles d'engendrer un défaut d'arc.

Bien que le problème soit connu depuis longtemps, les premiers systèmes de détection d'arcs pour l'avionique sont très récents. Le principe d'un tel détecteur est relativement simple : lorsqu'un arc est détecté, on coupe l'alimentation du circuit qui « engendre » l'arc avant que ce dernier ne provoque un incendie.

1.1 Problématique

Il n'existe que peu ou pas de normes qui proposent une catégorie de tests qui reproduisent des arcs pour qualifier les disjoncteurs. Deux normes principales sont pour le moment utilisées : l'AS5692 [AS08] pour le domaine de l'aéronautique et l'UL1699 [UL08] pour le domaine de l'habitat.
En ce qui concerne les algorithmes de détection, une première étude bibliographique a permis d'identifier immédiatement un algorithme particulier : la transformée en ondelettes. En effet, cet algorithme est très souvent cités dans des travaux récents [LDIT07][STRD][SMUB06][MRL05][LSL06] [LSL03][LL05][LDIT07][JM05]. Il est relativement complexe et son implantation nécessite des ressource matérielles importantes. D'autres algorithmes ont été cités dans cette première étude [LR01] [BP07] ; leur complexité est équivalente à celle de la transformée en ondelettes. Par généralisation, on émet l'hypothèse qu'un algorithme de détection nécessite donc une quantité importante de ressources matérielles. La problématique est ciblée egalement sur la recherche d'architecture permettant de réaliser des algorithmes complexes avec un minimum de ressources.

A partir de ces points clés : le test des détecteurs, le principe et la complexité de l'algorithme ; la démarche adoptée s'est donc imposée d'elle-même : après une caractérisation de l'arc selon les tests usuels, on étudie en détails les algorithmes existants afin de développer et de simuler un algorithme fiable. Cette étape une fois terminée, on réalise un prototype avec un FPGA afin de rechercher les architectures possibles pour l'implantation.

1.1.1 Caractérisation des signaux d'arc

Lorsque l'étape de caractérisation de défaut d'arc fut initiée pour extraire des signaux de courant et de tension d'arc, il s'agissait de reproduire les tests demandés par la norme UL1699 et l'AS5692. Dans cette optique, il a fallu créer un premier banc de génération de défaut d'arc décrit par la normes. Il s'est donc posé la question du dimensionnement d'un tel banc et précisément : quel courant et quelle tension d'arc doivent être considérés ? A l'issus d'une étude bibliographique sur les signaux d'arc et leur allure, on conclut que l'arc dans un circuit est défini par :

- sa caractéristique statique : il existe peu de caractéristiques statiques dans la littérature. Ce sont soit des courbes d'allure non chiffrées [SV00][IP02][JMR05], soit des courbes dont les valeurs sont contradictoires [JL03][FK09][ZS10][CB10].
- sa caractéristique dynamique : on répertorie dans la littérature des courbes également non chifrées [DB01] ou qui concernent des grandeurs sans interêt pour notre application, comme par exemple les fours à arc [GMT07], les arcs sur les lignes haute tension [EL07], ou encore les « bobines Tesla » [LL].

On relève peu d'articles qui décrivent les signaux d'un défaut d'arc proches de notre application [CBTBJ09][JJS06][MB10][GS98]. Lorsque l'on recoupe ces rares informations, il est difficile de construire une classification, mais plus important, il presque impossible de déterminer des valeurs d'amplitudes typiques de courant et de tension d'arc. Ainsi on peut observer des arc allant à 1000 A [DL05], comme des arcs de 1 A.

En conclusion, il n'est donc pas aisé d'évaluer les grandeurs des signaux de tension et de courant d'arc à partir des relevés de la littérature. Il est donc hasardeux de dimensionner un banc de test, mais surtout il n'est pas judicieux de commencer une recherche sur les algorithmes de détection à partir de ces signaux. Il est donc impératif de réaliser des enregistrements de signaux d'arc afin de déterminer les caractéristiques statiques et dynamiques d'un défaut d'arc.

1.1.2 Production des arcs

Les tests usuels décrit par les normes UL1699 ou AS5692 ne sont pas définis pour permettre de tracer en toute rigueur les caractéristiques statiques et dynamiques. Ces tests abordent le problème du défaut d'arc d'un point de vue pragmatique. La démarche qui consiste à répertorier tous les cas possibles susceptibles de provoquer un arc : que ce soit dans un avion ou dans la maison. Cette identification se fait de manière statistique à partir de l'historique des accidents déjà qui se sont déjà malheureusement produits, on en déduit une liste non-exhaustive représentant les cas les plus courants :

- ouverture ou fermeture de contacts [BCR98][E08],
- sectionnement des câbles [UL08][GMGB01],
- surchauffe des câbles [JW03],
- vibrations induisant des pertes de connexions [MB10][AS08].

Un disjoncteur doit détecter un défaut d'arc dans toutes ces situations. Toujours de manière pragmatique, on choisit de reproduire ces défauts dans des conditions proches de la réalité. D'où les tentatives de normalisations UL1699, AS5692, NEC. Ces normes définissent une liste de tests pour reproduire un arc, ce sont principalement le test de la guillotine, le test des plots vibrants...
Ces normes constituent une manière efficace de tester les disjoncteurs. Cependant, lorsque l'on étudie les protocoles expérimentaux décrits soit par l'UL1699 soit par l'AS5692, trois problèmes majeurs empêchent toute caractérisation rigoureuse des signaux d'arc :

- Les protocoles décrits ne sont pas reproductibles : d'une manière générale, ils ne permettent pas d'anticiper la longueur de l'arc produit car elle est trop aléatoire. Comme la tension d'arc est proportionnelle à la longueur d'arc en régime stable, il n'est pas possible d'anticiper la tension d'arc non plus.
- Les défauts reproduits ne peuvent être calibrés précisément : dans un circuit série, l'amplitude du courant d'arc dépend principalement de la valeur de la résistance série utilisée et de la tension d'arc. Cette dernière étant aléatoire, il est encore une fois impossible d'estimer une valeur exacte du courant d'arc.
- Certains tests induisent des phénomènes indésirables pour une caractérisation : par exemple le test des plots vibrants où les arcs s'amorcent aléatoirement ; le test de la guillotine [JW03] [UL08] provoque une perte de matière (production d'étincelle) et augmente la longueur d'arc au cours du test. Le test par surchauffe provoque des flammes, or une décharge qui se fait dans une flamme ne se comporte pas de la même manière que dans l'air ou dans un isolant.

Une conséquence importante, est que, d'un point de vue scientifique, il n'est pas envisageable de concevoir un algorithme de détection déterministe basé sur des mesures peu reproductibles. Si on le faisait, on ne pourrait pas garantir un fonctionnement correct du disjoncteur lorsqu'il apparaît un arc qui ne faisait pas partie de la liste des tests.
Il convient donc d'éviter l'amalgame entre les tests utilisés pour la qualifications des disjoncteurs et les tests pour la caractérisation des défauts d'arc.
La problématique consiste dans un premier temps à concevoir un système de test qui autorise des mesures reproductibles et calibrées pour établir une caractérisation rigoureuse.
Nous proposons une nouvelle approche de test qui permet de réaliser des défauts d'arc électriques calibrés et reproductibles. Le principe d'amorçage est basé sur la production d'une sur-tension.

1.1.3 De la nécessité d'un modèle...

A défaut de posséder des enregistrements réels de défauts d'arc, il est possible de les simuler par l'intermédiaire d'un modèle. En effet, utiliser un modèle fiable pour les défauts d'arc permet de comprendre finement le comportement d'un arc dans un circuit donné et donc d'en déduire les

phénomènes qui influent sur la tension et le courant dans le circuit. Il permet surtout de développer et de tester les algorithmes de détection ainsi que le détecteur dans son ensemble.
Dans les domaines de l'électronique et l'électrotechnique, on décrit un système dans un circuit par son modèle de conductance. En effectuant des analogies entre le comportement du système et des composants électriques, il est possible d'extraire un schéma électrique qui est un modèle de conductance du dit système (ex : modèle du moteur, de l'électrolyse[PV56], du haut parleur[OC02]). L'avantage est de pouvoir simuler directement le système lorsqu'il est connecté à un circuit plus complexe.
Il existe plusieurs types de modèles d'arc : les modèles microscopiques et mésoscopique [JMR05] [SV00] [JMR05] issus de la science des plasmas et les modèles de conductances [H89][SVDS00] [C39][M43] qui sont des modèles macroscopiques. Les modèles de conductances, comme les modèles de Mayr et de Cassie présentent des résultats parfois éloignés de la réalité expérimentale [C39][M43]. Par ailleurs, les conditions d'amorçage et de ré-amorçage d'un arc dans un circuit électrique ne sont pas, ou peu prisent en compte [MRL05][LSL03], les décharges de type couronne précédant l'arc par exemple sont également ignorées.
Avec une camera rapide, nous avons observé la décharge d'arc alternative, notamment au passage à zéro du courant. Ce qui nous a permis de proposer une amélioration du modèle macroscopique couramment utilisé de type Mayr-Cassie.

1.1.4 Algorithmes de détection

Un algorithme en particulier constitue un des axes de recherche actuels pour la détection défauts d'arc : la transformée en ondelettes [STRD][MRL05][LSL06][HHH98]. De lui seul, cet algorithme peut constituer l'objet de recherches de plusieurs années. Nous avons cependant identifier un certain nombre d'autres algorithmes de la littérature :

- analyse temporelle : dérivation, corrélation, prédiction... [S99][LR01][P99],
- analyse fréquentielle : filtrage « in-beetween » , transformée de Fourier [MB03][JL03],
- analyse temps-fréquence : spectrogramme [LR01], transformée en ondelettes [LL05] [ZCL06] [JM05] [FR02][SMUB06][LDIT07][STRD] [SMUB06][MRL05][LSL06] [LSL03]
- analyse électrique : comparaison à la modélisation électrique,
- les méthodes de reconnaissance de forme [LR01],
- codage génétique : réseaux de neurones [BP07],
- ...

Il va de soit que pour le choix des algorithmes de détections il est nécessaire d'effectuer une comparaison des performances de chacun. Or, l'étude des publications et des brevets récents ne permet pas d'extraire des critères de comparaison. Seules les normes UL1699 et l'AS5692 fournissent des méthodes d'évaluation d'un détecteur qui fasse consensus. Indirectement, un ou plusieurs algorithmes de détection peuvent être évalués avec ces normes.

Nous proposons malgré tout deux critères simples pour l'évaluation :

- le taux de détection,
- le taux de fausse détection.

Certains [GS98][GWD03] tentent également de construire une courbe de disjonction d'arc électrique qui serait analogue en quelque sorte à une courbe de disjonction classique de type I^2t . Nous pensons que cette approche est intéressante, bien que peu explorée. C'est pourquoi, nous proposons de répondre à ce manque au travers d'un système appelé « logique de discrimination » qui serait capable de réaliser une courbe de disjonction d'arc. Il existe cependant un brevet qui propose une approche similaire [C07].

1.2 Contenu du document

Afin de répondre aux différentes problématiques énoncées précédemment, les trois phases d'études suivantes ont été suivies chronologiquement dans ce travail de thèse :

- la réalisation d'un banc de production et de caractérisation des grands types d'arcs électriques (AC et DC),
- la recherche de modèles électriques fiables expliquant les phénomènes d'arcs,
- l'élaboration, l'étude et la proposition d'algorithmes de détection en vue de l'implantation sur circuit électronique suffisamment réduit pour être implanté dans un disjoncteur.

Cependant, l'organisation de ce document est sensiblement différente. En pratique, le modèle proposé est issus de l'observation des arcs réalisés avec le banc de test conçu durant ce travail de thèse. Ce banc, appelé GDARC (Générateur de Défaut d'Arc Reproductible et Calibré) a fait l'objet d'un dépôt de brevet. Cependant, les résultats obtenus avec le modèle développé permettent d'expliquer en partie le fonctionnement du GDARC. Par conséquent, après un premier chapitre sur l'état de l'art des disjoncteurs d'arc et des principes de disjonction appliqués à l'aéronautique, nous décrivons les aspects théoriques de la décharge électrique ainsi que le modèle d'arc que nous avons développé dans un deuxième chapitre. L'étude des différents principes d'amorçage proposés par l'UL1699 et l'AS5692, ainsi que l'étude du principe du GDARC sont restituées dans une quatrième partie. Enfin, nous proposons dans un dernier chapitre, l'étude des différents algorithmes de détection élaborés durant ce travail de thèse, ainsi que l'étude d'un système de détection à logique de discrimination.

Chapitre 2

État de l'art

Les avionneurs manifestent un intérêt particulier pour le développement de système de protection de circuit et particulièrement de systèmes de protection qui permettent, en plus des fonctions classiques déjà réalisées, de détecter les défauts d'arc. Dans ce chapitre, nous décrivons succinctement le système de distribution de l'énergie électrique dans un avion et nous présentons quelques solutions utilisées actuellement pour répondre à la problématique de détection des arcs électriques dans les systèmes avioniques.

2.1 Système de distribution électrique

Il existe trois sources d'énergie embarquées dans un avion : les énergies hydraulique, pneumatique et électrique. Ces sources d'énergie sont toutes obtenues à partir du réacteur par la combustion du kérosène :

- l'énergie hydraulique est fournie par une pompe hydraulique couplée mécaniquement à l'arbre du réacteur. Cette énergie sert principalement pour alimenter les commandes de vol, le train d'atterrissage et le freinage.
- L'énergie pneumatique est obtenue par prélèvement d'air chaud sur le réacteur. Cette énergie est utilisée pour la pressurisation de l'air de la cabine et du cockpit et le dégivrage des bords d'attaque des ailes.
- L'énergie électrique est fournie par un alternateur entraîné mécaniquement par le réacteur. Cette énergie est utilisée pour de nombreux systèmes de l'avion.

L'énergie électrique est une source qui est de plus en plus utilisée pour les systèmes embarqués, et principalement pour la distribution d'énergie. Le besoin en puissance électrique a augmenté significativement [IBSFZ09] : de plus d'un facteur 10 depuis les années 80. De plus, le développement des services médias à bord comme le cinéma, les jeux,... n'ont fait qu'augmenter la demande en puissance électrique embarquée.
Les avantages des réseaux de distribution électrique, comparés à l'hydraulique ou le pneumatique, sont entre autres : la simplicité de la maintenance qui peut s'effectuer directement sur l'avion [WEI93], mais surtout le gain de poids apporté par les systèmes électriques. A terme, on envisage même la disparition de l'énergie hydraulique et pneumatique à bord des avions. On parle alors de l'avion « tout électrique » .

Cependant ce passage à l'énergie électrique ne se fait pas sans inconvénients, comme par exemple l'augmentation du nombre de connectivités du réseau et indirectement, l'augmentation du risque d'apparition de défauts d'origine électrique. Parmi ces défauts on rencontre le défaut d'arc électrique. Dans l'avenir, compte-tenu de l'accroissement de la puissance demandée par le réseau, les alimentations DC, actuellement à 28 V, passeront progressivement à 270 V. Cela signifie que la probabilité d'apparition d'un défaut d'arc sera accrue car un arc est plus facilement amorçable lorsque la tension est élevée.

2.1.1 Réseau électrique dans un avion

Dans les années 1970, le réseau électrique principal est passé à 115 V AC triphasé à 400 Hz en plus du réseau DC 28 V. La raison de ce choix est que plus la fréquence du système est élevée, moins la taille des matériaux magnétiques utilisés pour les machines électriques est importante. Jusqu'à présent, la fréquence était fixée autour de 400 Hz, mais à l'avenir les équipements devront être capables de fonctionner à fréquence variable. La figure 2.1 ci-après présente une architecture simplifiée du réseau de distribution d'un avion.

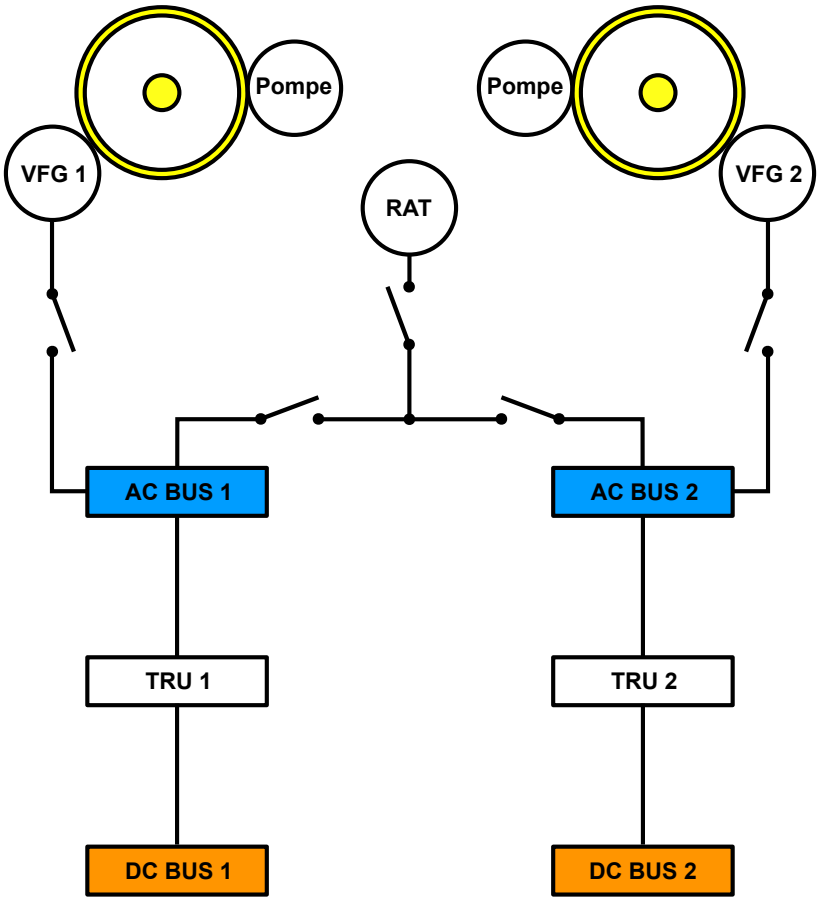


FIG. 2.1 – Architecture simplifiée du réseau électrique dans un avion.

Réseau AC

Comme nous l'avons dit, la source d'énergie du réseau électrique est prise sur les réacteurs de l'avion représenté par les cercles jaunes de la figure 2.1. Un IDG (Integrated Drive Generator) qui est un alternateur est couplé sur chaque réacteur et permet la génération électrique normale (115/200 V AC). L'IDG est entraîné en rotation par un compresseur, tout comme la pompe hydraulique. Une différence majeure introduite avec l'Airbus A380 est l'utilisation d'un VGF (Variable Frequency Generator, figure 2.1) pour générer le réseau alternatif à la place des IDG. La fréquence est maintenant variable et est comprise entre 360 et 800 Hz. La fréquence variable permet de réduire considérablement les dimensions et la masse des VFG. En effet, le système de régulation mécanique de vitesse est supprimé.

Afin de distribuer l'énergie issue du VFG, des « barres bus » sont utilisés. Ce sont des éléments conducteurs sur lesquels plusieurs autres circuits peuvent être connectés. Ils sont souvent réalisés avec des barres de conducteurs, comme le cuivre sur lequel on adjoint des bornes ou des trous de raccordement. Typiquement, le courant qui circule sur ces barres est de l'ordre de 450 A en régime permanent.

Chaque générateur alimente un des « barres bus » alternatifs principaux (AC BUS). On remarque que le réseau, dans l'exemple de la figure 2.1, est doublé afin de s'assurer de la continuité du service dans l'éventualité où une des génératrices ne serait plus capable de fournir l'énergie. L'énergie dans ce cas est redirigée d'un bus à l'autre.
Il existe cependant d'autres générateurs additionnels, comme le RAT (Ram Air Turbine) qui permettent d'alimenter le réseau si les deux génératrices sont hors service, ou alors comme l'APU (Auxiliary Power Unit). Ce dernier non représenté sur la 2.1 est un groupe électrogène qui fonctionne au kérosène et qui permet le démarrage des moteurs au sol.

Réseau DC

Il est constitué par une alimentation continue 28 V produite à partir des bus AC sur lesquels sont placés le BCRU (Batteries Charger Rectifier Unit) ou TRU (Transformer Rectifier Unit) sur la figure 2.1.

2.1.2 Câbles électriques d'un avion

Les câbles électriques qui acheminent l'énergie aux composants et sous-composants de l'avion, mais aussi les bus, sont soumis à des conditions environnementales sévères. Ces conditions peuvent engendrer des dégradations et indirectement des défauts d'arc électrique. Pour assurer un service satisfaisant, les câbles de l'avion sont inspectés chaque année afin de détecter les éventuels abrasions et défaut d'isolant. Une inspection de l'état des connexions est effectuée avec un avis potentiel sur leur niveau de corrosion. Une attention particulière est portée sur la vérification des branchements de la masse des alimentations, sur les équipements de distribution et ainsi que les blindages électromagnétiques. L'objectif est de s'assurer que la résistance de liaison électrique entre équipement n'a pas augmentée significativement par corrosion ou par défaut des connexions.

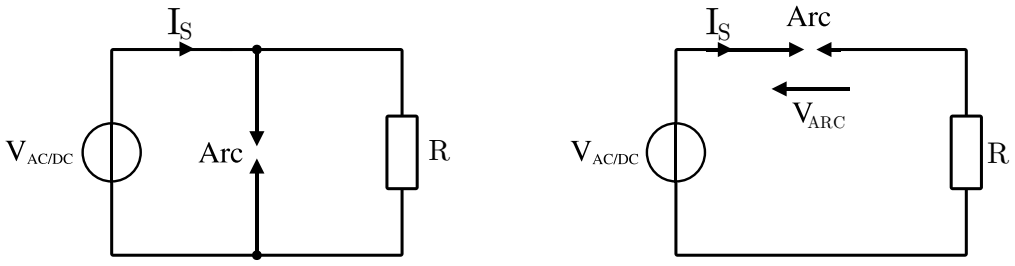
Il y a trois enjeux de conception lors du câblage des avions :

1. Utiliser la quantité minimale de câbles et faire en sorte que la longueur d'un câble ne soit pas plus grande que nécessaire. Car, d'une part les câbles sont lourd, et d'autre part plus un câble est court plus il est facile de le câbler, de le connecter, et surtout de le protéger.
2. Utiliser un câble suffisamment large pour minimiser la chute de tension en bout de câble.
3. Maintenir une marge de sécurité adéquate. Par exemple, éviter de créer des faisceaux de câbles autant que possible.

Ce dernier point est d'autant plus important que les faisceaux de câbles sont plus aisément sujets aux défauts d'arc de par la proximité entre les câbles. Par ailleurs, il est important de souligner que plus la conception des chemins de câbles et des bus est soignée, moins la probabilité d'apparition d'un défaut est importante. L'exemple typique est celui de la distance entre deux parties conductrices non-isolées (comme par exemple un barre bus et la masse) qui n'est pas suffisamment élevée pour s'assurer qu'aucun arc ne puisse être amorcé.

2.2 Défauts d'arcs sur les câbles électriques

Les défauts d'arc surviennent généralement dans les installations électriques conventionnelles dans laquelle un générateur principal alimente une charge. Le type d'arc est défini par la structure du circuit. Les arcs peuvent donc être classés en quatre catégories en fonction de la nature AC ou DC de l'alimentation d'une part, et de la configuration série ou parallèle de l'arc par rapport à la charge, d'autre part. Cette première classification est résumée figure 2.2.



Arc parallèle AC ou DC Arc série AC ou DC

FIG. 2.2 – Types d'arc.

2.2.1 Causes d'apparitions

Parmi les causes d'apparitions de défaut d'arc, on peut citer de manière non exhaustive :
- le vieillissement des câbles,
- les effets thermiques comme la dilatation thermique,
- les défauts d'origine électrique,
- les tensions mécaniques, statiques et dynamiques entre les câbles,
- l'abrasion des parties conductrices,
- les vibrations des plots de fixations,
- la contamination par produits chimiques et liquides d'aéronef (nettoyage, fluides hydrauliques, lubrifiants, liquides de dégivrage, etc)
- l'humidité,
- les oxydants (ozone, NOx, SOx, etc),
- etc

La figure 2.3 donne les relevés statistiques effectués par sur les causes et les lieux d'apparition des défauts d'arc. On note que plus d'un tiers des arcs sont provoqués par un défaut de l'isolant de l'équipement sujet à l'arc.

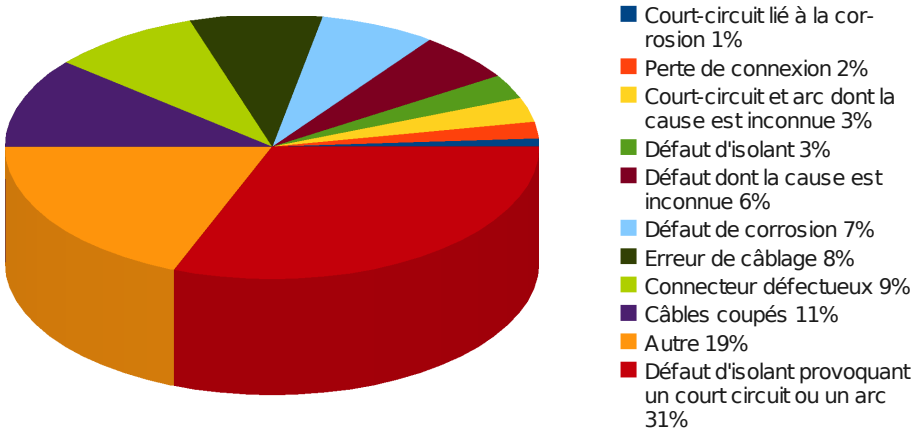


FIG. 2.3 – Causes et lieux d'apparition des défauts d'arc.

La figure 2.4 qui liste les composants et organes où sont produits les arcs confirme que les câbles sont encore une fois à l'origine des défauts d'arc pour environ 30 % des défauts répertoriés.

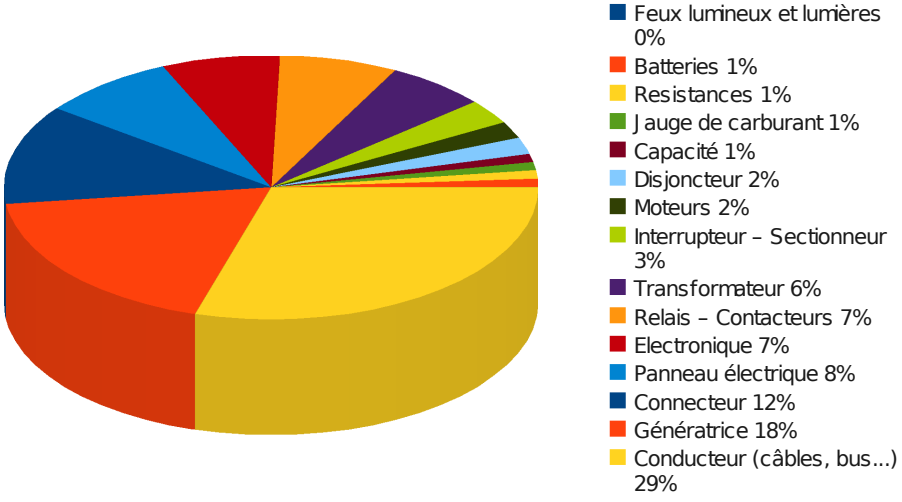
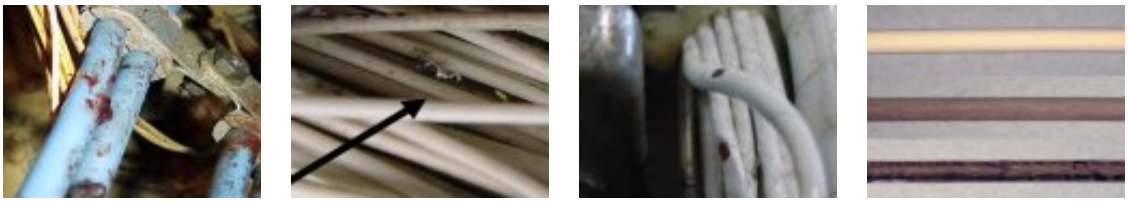


FIG. 2.4 – Organes et composants sujets aux défauts d'arc.

On comprend que prévenir ce type de défaut nécessite une amélioration significative de la part des fournisseurs de câbles en matière d'isolant et de robustesse. Un exemple illustré est donné figure 2.5 avec quelques causes types de défaut d'arc sur les câbles identifiées par la FAA.



Liquide Débris Isolation Vieillissement

FIG. 2.5 – Situations susceptibles d'amorcer un défaut d'arc.

2.3 Systèmes de protection

La présence d'un défaut d'arc dans une installation se manifeste par l'apparition de différents phénomènes :

- les perturbations des grandeurs électriques telles que le courant et la tension,
- l'émission acoustique de bruits caractéristiques,
- la production de parasites électromagnétiques,
- l'émission d'ondes lumineuses tels que les ultra-violets,
- le rayonnement thermique,
- la production d'espèces chimiques comme l'ozone et les fumées issues de la carbonisation.

De nombreuses techniques ont été développées pour détecter les arc séries ou parallèles basées sur l'observation des phénomènes cités précédemment. La grande majorité de ces techniques nécessitent des capteurs dédiés comme par exemple : un thermomètre, un microphone, ou encore une antenne. Dans le cadre d'une mise en application d'un détecteur en milieu industriel, ces méthodes imposent l'utilisation d'au moins un capteur pour chaque ligne que l'on souhaite protéger. Ainsi, parmi la liste des phénomènes observables seuls deux répondent à une contrainte supplémentaire qui est celle de la faisabilité tant économique qu'industrielle :

- les perturbations des grandeurs électriques tels que le courant et la tension.
- la production de parasites électromagnétiques.

Le travail présenté dans ce chapitre traite exclusivement des systèmes basés sur la mesure du courant et/ou de la tension d'une ligne que l'on souhaite protéger.

2.3.1 Maintenance préventive

Le premier principe de détection existant régulièrement effectué repose sur une inspection visuelle des fils. Cette méthode n'est pas adaptée à une détection systématique des défauts pouvant apparaître sur des fils électriques comme pour AFCB. Une inspection visuelle lors des phases de maintenance des avions permet de détecter entre 25 et 39 % des défauts.
Lors des étapes de maintenance des appareils avioniques, des instruments portables de détection sont généralement utilisés. Ces multi-mètres sont utiles pour la détection des circuits ouverts ainsi que des courts circuits. Les fonctions réalisées par ce type d'appareils sont :

- l'identification des conducteurs sujet aux court circuits et aux arcs,
- la localisation spatiale d'un défaut,
- l'indication de dégradations des câbles et des défauts d'isolant.

Un exemple d'appareil commercialisé sur le marché est le multi-mètre portable illustré en figure 2.6. L'utilisation des multi-mètres portables ne permet cependant pas de mesurer, de détecter et de situer avec précision tous les défauts apparaissant sur les fils électriques. Comme cité précédemment, seulement 30% des défauts sont détectés avec cette méthode.



FIG. 2.6 – MetraHIT 27I produit par GMC qui permet de verifier l'état des isolants et la conductance des câbles.

Méthodes réflectométriques

La méthode TDR (Time domain Reflectometry) constitue une méthode d'analyse temporelle d'un câble électrique. Une impulsion de courte durée (comparée au temps de vol à travers l'ensemble du câble) est envoyée sur le câble électrique. Ce type d'appareil bien que plus performant que le multi-mètre portable est cependant plus volumineux. La figure 2.7 présente un de ces appareils.



FIG. 2.7 – Réflectométre TDR produit par Megger.

Le fonctionnement d'un TDR est assez simple dans le principe : le coefficient de réflexion d'une ligne peut être exprimé en fonction de Z_0 (impédance de la ligne de transmission) et de Z_t (impédance de fin de ligne). Une ligne desadaptée (modification de Z_t) donne naissance à un écho de ligne (discontinuité d'impédance). L'analyse de l'impulsion réfléchie permet de localiser le défaut.

Cette méthode nécessite un générateur fonctionnant en émetteur-récepteur sur un bout de ligne. Les limites de cette méthode sont liées :

- au procédé même de mesure : il faut en effet déconnecter une extrémité de câble pour effectuer l'analyse. De plus les endroits de tests ne sont pas toujours accessibles facilement dans un avion.
- Au type de signal : cette méthode nécessite d'injecter des impulsions de tension élevée (1000 volts et de l'ordre du ns) qui peuvent endommager les dispositifs électroniques sensibles.

De plus, ces méthodes réflectométriques ne peuvent être utilisées que lors des phases de maintenance de l'avion, lorsque ce dernier est à l'arrêt. Elles ne peuvent détecter que des défauts qui sont déjà survenus et ne constituent pas des méthodes préventives.

Il existe une variété d'autres méthodes de test basées sur la réflectométrie :

1. les méthodes SWR (Standing Wave Reflectometry) et FDR (Frequency Domain Reflectometry) sont basées sur l'envoi d'une série de trains d'ondes sinusoïdales sur la ligne électrique à analyser. La mesure est faite sur l'amplitude et la phase du signal réfléchi.
2. Les métodes STDR (Sequence Time Domain Reflectometry) et SSTDR (Spread Spectrum Time Domain Reflectometry) sont inspirées des méthodes de codage en télécommunication. Elles sont toutes les deux basées sur l'envoi d'un code PN (Pseudo Noise code), comme signal de test permettant de détecter des discontinuités d'impédance ainsi que des désadaptations d'impédances.

Ces méthodes ont été testées avec succès pour localiser des circuits ouverts, des courts circuits ou d'autres défauts intermittents avec une précision de +/- 40 cm sur des câbles de plus de 4 mètres de long. La durée nécessaire pour effectuer le test est de l'ordre de 1 ms.

2.3.2 AFCB

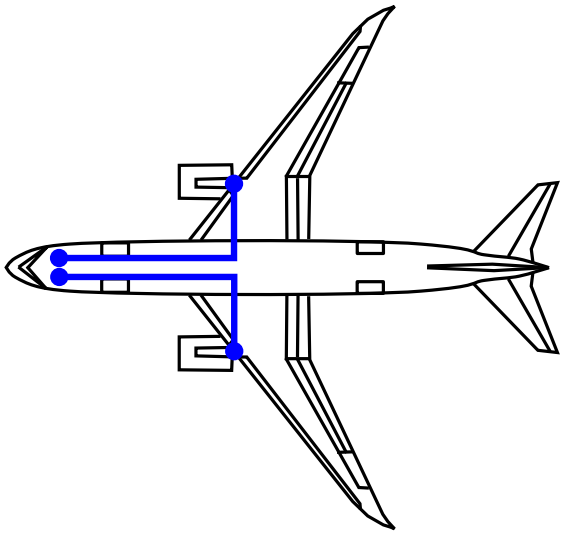
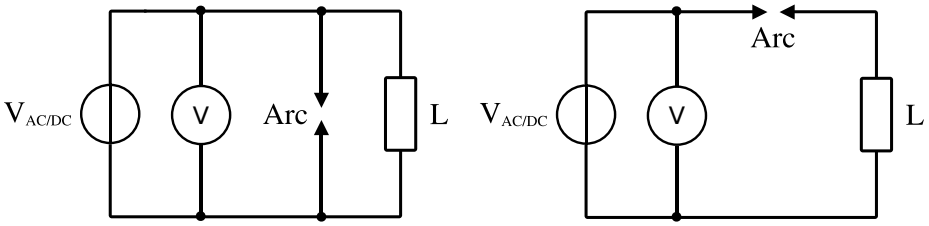


Fig. 2.8 – Position des AFCB.

L'AFCB, pour « Arc Fault Circuit Breaker » ou disjoncteur de défaut d'arc est un composant qui permet de couper l'alimentation en cas de détection d'un défaut sur une ligne. Il se situe principalement à proximité du poste de pilotage dans un panneau principal comme indiqué sur la figure

2.8. Les lignes du réseau sont donc acheminées à partir du réacteur jusqu'à ce panneau principal.

Il existe deux architectures pour un AFCB qui se basent sur la manière de prendre la mesure de tension et de courant dans le circuit. La mesure de tension d'arc ne peut donc se faire qu'aux bornes de la source d'alimentation comme le montrent les schémas donnés figures 2.9 et 2.11.



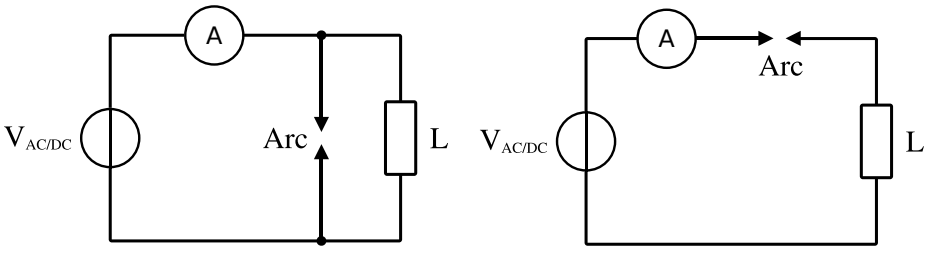
(a) Arc parallèle (b) Arc série

FIG. 2.9 – Mesure de tension effectuée par le détecteur.

Ainsi seule la tension d'un arc parallèle survenant directement entre les bornes du générateur sera détectable. Ceci est lié à la résistance interne du générateur : l'arc est dit parallèle mais en réalité, c'est la charge du générateur qui fait office de charge série. Donc si un arc se produit en parallèle il y aura bien une chute de tension mesurée par le capteur de tension. En revanche, là où se situe le point de mesure de tension, il n'y a pas de chute de tension quand l'arc est en série. Ceci constitue un contrainte majeure du détecteur. Il serait possible éventuellement de déporter la mesure de tension à un autre endroit dans le circuit. Mais cela implique que l'on sait à l'avance que l'arc se produira entre les deux points de mesure de la tension. Bien évidement, cette technique n'est utilisable que si l'on suspecte réellement qu'un arc a de fortes probabilités de se produire à un emplacement précis. Par ailleurs, déporter cette mesure implique inévitablement l'apparition de câbles supplémentaires qui, rappelons-le, est à éviter à tout prix.

La mesure de courant, quant à elle, peut se faire de deux manières :
- soit **directement** sur la ligne (figure 2.10),
- soit **indirectement** au travers d'une boucle de courant qui fournie une différence de courants (figure 2.11).

Ces deux procédés ont leurs propres avantages et inconvénients : la première méthode ne permet d'identifier des arcs séries ou parallèles dans le circuit que lorsqu'ils se produisent entre la phase et le neutre. Cependant, un arc série peut être conforme au fonctionnement normal du circuit. En effet, les arcs inévitables produits dans un contacteur à l'ouverture d'un circuit sont parfaitement maitrisés et ne constituent pas un danger.



(a) Arc parallèle (b) Arc série

FIG. 2.10 – Méthode directe de mesure du courant effectuée par le détecteur.

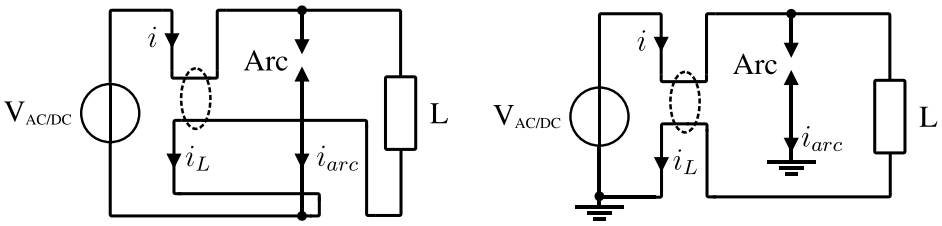
La deuxième méthode, indirecte, ne permet d'identifier que les courants d'arcs parallèles entre la phase et la masse. La mesure de courant est effectuée au moyen d'un capteur torique qui réalise la différence des courants qui le traverse. Ce tore est représenté en pointillé sur la figure 2.11. La différence δi peut donc s'écrire :

$$\delta i = i - i_L \tag{2.1}$$

S'il n'y a pas d'arc qui apparaît dans le circuit, cette différence δi est nulle. Tout le courant est lié uniquement à la charge du circuit. En revanche, s'il existe un arc alors la mesure de δi donne :

$$\delta i = i - i_L = i_L + i_{arc} - i_L = i_{arc} \tag{2.2}$$

La différence de courant mesurée est bien celle du courant d'arc : $\delta i = i_{arc}$. Elle nécessite d'utiliser une masse de référence afin de permettre la mesure. La figure 2.11 (b) montre la modification du schéma avec la masse. On pourra noter qu'avec cette méthode le câble venant de la charge et qui est relié à la masse ne peut pas être soumis à un arc. Cette méthode ne permet donc que de mesurer des arcs entre la phase et un éventuel objet métallique environnant comme un débris par exemple. Ce débris étant évidement relié à la masse du circuit. Ainsi il n'est pas possible de détecter ni les arcs série ni les arcs parallèles entre les deux câbles alimentant la charge.



(a) Principe de mesure du courant (b) Représentation avec masse

FIG. 2.11 – Méthode indirecte de mesure du courant effectuée par le détecteur.

On peut résumer les méthodes de mesure sous la forme d'un tableau en fonction de ce que l'on souhaite détecter :

Mesures/Types d'arc	Arc série	Arc parallèle
Mesure directe du courant	✓	✓
Mesure indirecte du courant	✗	✓
Mesure de tension	✗	✓

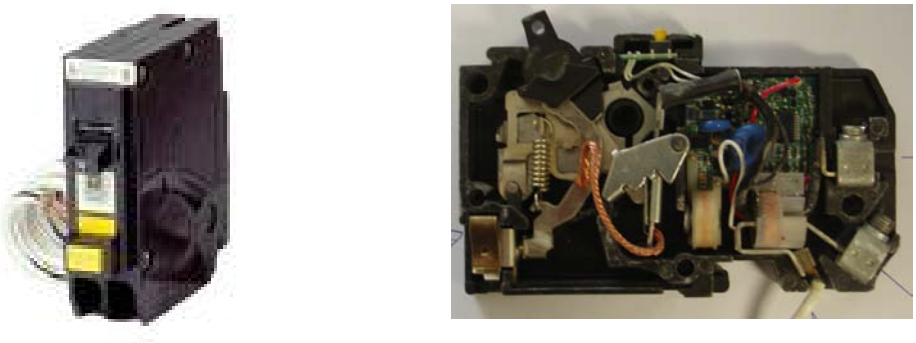
TAB. 2.1 – Capacité d'une architecture à détecter un type d'arc.

La plupart des algorithmes de détection sont fonctionnels quelque soit le type de méthode choisie. Il faudra toutefois les adapter à la situation.

Exemple d'un AFCB commercialisé par Eaton

Les AFCB pour l'aéronautique sont assez difficiles à se procurer car d'une part, il ne sont pas généralisés à tous les systèmes puisque c'est un produit récent. Et d'autre part, les sous-traitants de ce type d'appareils ne souhaitent pas fournir leurs équipements sauf à leur clients, par soucis de confidentialité. Cependant, comme l'AFCB existe pour le domaine de l'habitat aux États-Unis [JW03],

nous proposons d'étudier leur fonctionnement à partir de l'exemple d'un AFCB du constructeur Eaton. Cet AFCB est présenté figure 2.12.



(a) Vue externe (b) Vue interne

FIG. 2.12 – AFCB BR12AF de la marque Eaton.

L'AFCB se compose d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique est relativement classique et fonctionne comme un disjoncteur habituel : lorsque le courant devient trop important, l'une des pièces mécaniques se contracte sous l'effet de la chaleur et provoque le déclenchement du disjoncteur.
La partie électrique se compose de plusieurs organes dont les principaux sont répertoriés sur la figure 2.13.

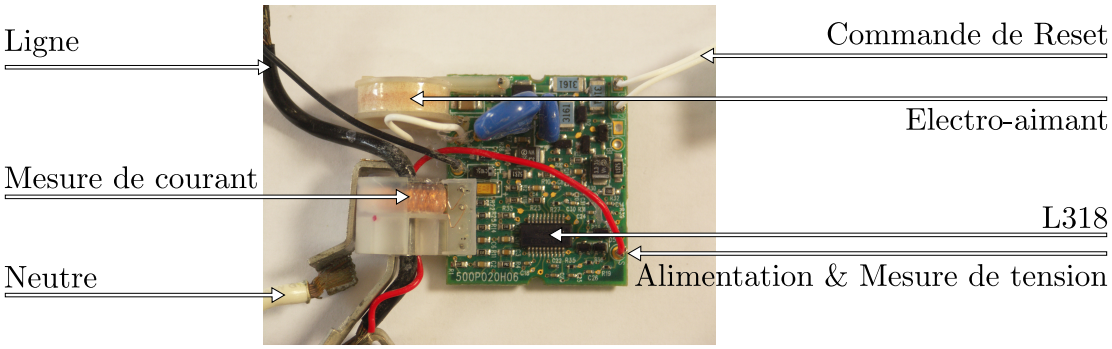
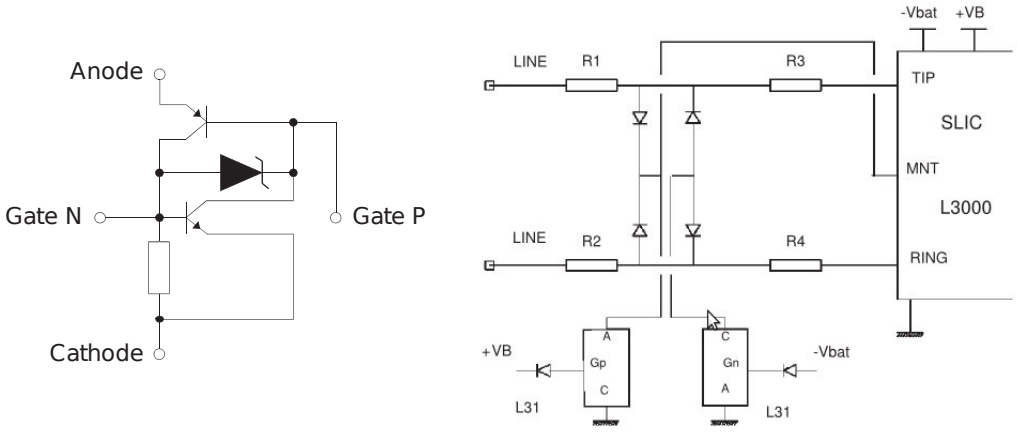


FIG. 2.13 – Position des SSPC.

Comme la démarche utilisée ici pour la présentation de l'AFCB s'apparente à celle du « reverse engineering » , nous n'affirmons pas que le fonctionnement du disjoncteur soit exactement celui décrit ici ; la détection de l'arc s'effectue au moyen d'une puce produite par ST Microelectronics : le L318 dont le schéma interne est donné en figure 2.14. Ce circuit réalise une fonction similaire à celui d'une diode Transil sauf que le courant de protection est configuré par la résistance présente sur le schéma. La tension de claquage maximale est également programmable à l'aide d'une diode Zener.



(a) L318 (b) Exemple d'application

FIG. 2.14 – Schéma interne du L318 [STM03] et exemple d'application [BRE98].

Le L318 est un composant typiquement utilisé pour la protection contre les sur-tensions dans le domaine de la téléphonie, notamment contre les éventuels impacts de foudre. Un exemple d'application est donné figure 2.14.
L'AFCB réalise la mesure du courant avec un transformateur de courant selon les schémas donné 2.11 et 2.15. Il réalise également les fonctions de protection classiques comme la protection contre les sur et sous-tensions ainsi que les sur et sous-intensités. En cas de détection d'un défaut, un électroaimant est utilisé pour actionner le système mécanique qui ouvre le circuit.

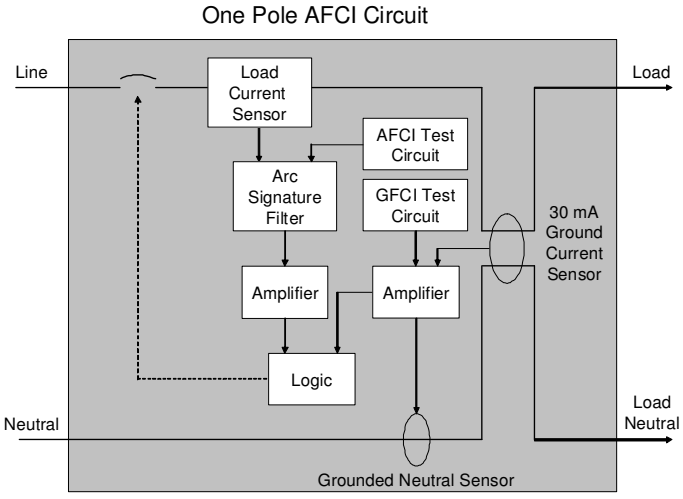


FIG. 2.15 – Shéma de principe interne d'un AFCB de marque Eaton. Figure extraite de [EAT08].

Il semble que cet AFCB réalise une protection analogue à celle d'un GFCB (Ground Fault Circuit Breaker). Le système disjonctera lorsqu'un défaut à la terre apparaît, que ce soit un arc ou non. Autrement dit, il n'y a pas de discrimination faite entre un défaut d'arc et un défaut à la

terre. L'AFCB réalise également la détection des arcs parallèles mais pas des arcs séries. La table 2.2 présente les types d'AFCB existant ainsi que leur gamme de courant.

Type de protection	Arc Parallèle	Fuite à la terre	GFCB	Gamme de courant
AFCB	✓	✗	✗	50 A pic
AFCB EL	✓	✓	✗	50 A pic, 30 mA
AGFCB	✓	✗	✓	50 A pic, 5 mA

TAB. 2.2 – Types de protections réalisées par un AFCB. Table extraite de [JW03]

2.3.3 SSPC

Les « Solide State Power Controler » (SSPC) sont des dispositifs à semi-conducteurs qui permettent de contrôler la puissance fournie à une charge par surveillance de la tension et/ou du courant qui alimentent la charge. Destinés à remplacer les disjoncteurs mécaniques tels que les AFCB, ils remplissent plusieurs fonctions de surveillance et de diagnostic afin d'identifier les cas de surcharges et de court-circuits. Il existe des versions de SSPC pour les lignes AC ou DC ou les deux. A la différence des AFCB, les SSPC sont en général placés à proximité des systèmes à protéger comme le montre la figure 2.16.

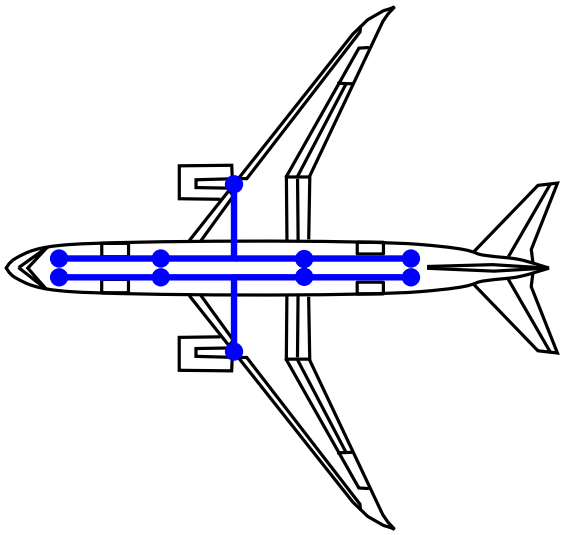


FIG. 2.16 – Position des SSPC.

Les SSPC sont construit autour d'un élément commutatif de type transistor et effectuent une mesure du courant qui circule sur la ligne à protéger. Différents modèles de SSPC ont été développés, un exemple est donné en figure 2.17.

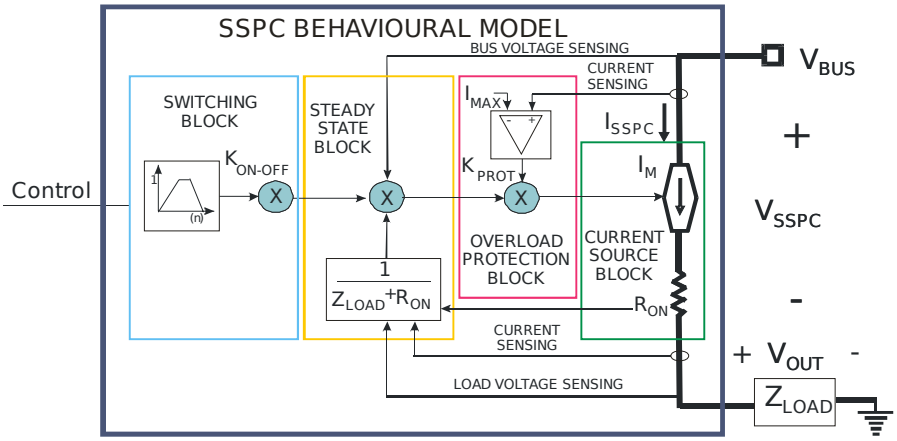


FIG. 2.17 – Modèle comportemental d'un SSPC. Figure extraite de [IBSFZ09]

Le système de commutation est représenté par la source de courant et la résistance R_{on}. Les fonctions du SSPC sont désignées par les blocs « Voltage and current sensing » , « OverLoad protection Bloc » . La charge à protéger est représentée par l'impédance Z_{LOAD}.
Les SSPC intègrent un système numérique à base de micro-contrôleur afin de réaliser les fonctions du modèle figure 2.17. La programmation s'effectue à partir de périphériques externes et l'utilisateur peut programmer différentes loi de disjonction de la plus simple comme la courbe en I^2t donnée figure 2.18, à la plus complexe. I représente le courant de charge et t est le temps. Cette courbe définit la zone de fonctionnement admissible de dissipation de l'énergie dans un conducteur (en jaune sur la figure 2.18) avant que des dommages se produisent. Plus la surcharge est importante, plus le temps de conduction autorisé est court.

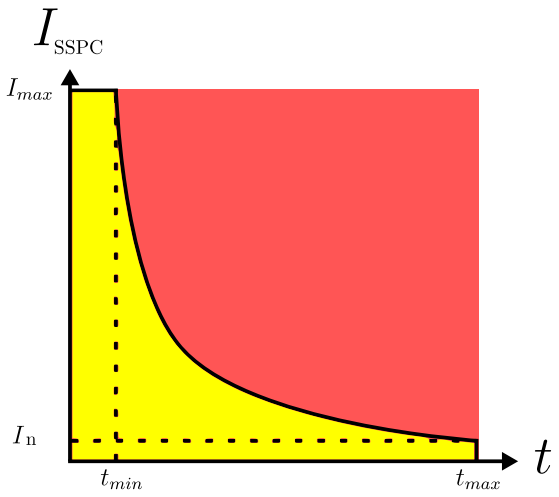


FIG. 2.18 – Représentation de la courbe de disjonction I^2t d'un SSPC.

Un exemple de SSPC est donné figure 2.19. Ce SSPC multi-voies est capable de distribuer et de contrôler 300 A pour 4 systèmes différents à protéger. Chaque voie peut être configurée pour un courant de 75 A. Il permet d'utiliser une courbe de disjonction de type I^2t programmable et autorise une gestion complète de la puissance délivrée à partir de la mesure du courant. La tension de ligne ainsi que la température sont transmises à l'aide d'une interface à bus CAN.



Fig. 2.19 – RP-263XXN0 Solid State Power Controller

Le SSPC est un produit d'avenir et il possède un avantage pour notre application : un algorithme de détection d'arc peut-être directement ajouté au programme existant qui est exécuté par le processeur du SSPC.

Chapitre 3

Modélisation des arcs électriques dans un circuit

3.1 Introduction

L'arc électrique est un phénomène qui a été longuement observé et étudié dans l'histoire. Avant que les arcs ne puissent être reproduits artificiellement, la majeur partie des observations concernait les arcs issus de phénomènes soit atmosphériques, soit statiques. Cherchant à fournir une explication à ces phénomènes d'arcs, les anciens ont généralement assimilé l'arc à des manifestations divines. Par exemple, pour les grecs de l'antiquité, la foudre était considérée comme une action du dieu Zeus, dieu des phénomènes atmosphériques. Zeus lance des éclairs et fait rouler le tonnerre. La foudre constitue encore aujourd'hui le phénomène d'arc le plus impressionnant rencontré dans la nature. Impressionnant de part sa taille et sa puissance. Bien que compris en partie, l'arc électrique laisse encore en suspens de nombreuses interrogations. Et parmi elles, celle qui nous concerne plus particulièrement : comment se comporte l'arc électrique dans un circuit électrique ?

Afin de décrire le comportement de l'arc électrique dans un circuit, il existe de nombreux modèles d'arc, et plus précisément des modèles d'impédance. L'analyse de ces différents modèles d'arc nous a permis d'élaborer un modèle plus performant appelé méta-modèle. L'approche particulière empruntée à la science des plasmas que nous avons retenue consiste à considérer un arc électrique comme une succession de décharges électriques particulières. Cette démarche nous a conduit à proposer un modèle macroscopique de la décharge précédant la décharge d'arc. Ce nouveau modèle est l'objet de ce chapitre. Après une description des aspects théoriques de la physique des décharges qui sont développés dans une première partie, nous décrivons le modèle proposé.

Compte tenu du nombre important de modèles existants, seuls les modèles les plus significatifs et les plus couramment utilisés sont exposés dans une seconde partie. Une classification des modèles est proposée et accompagnée d'une description des qualités et défauts de chacun d'entre eux. Les deux parties suivantes seront consacrées à l'étude du méta-modèle proposé. Elles traitent de l'aspect physique du modèle avec la description des équations associées et de leur simulation avec l'outil Matlab. Enfin, dans une dernière partie, les résultats de simulation prenant en compte plusieurs types de décharges sont comparés aux résultats expérimentaux.

3.1.1 Problématique

Les modèles d'arcs électriques sont souvent applicables à des cas particuliers d'expérimentations. Ainsi, les modèles de type Mayr-Cassie [M43] [C39] sont la plupart du temps utilisés pour modéliser les courants d'arcs dans les disjoncteurs et les sectionneurs [ORRM03] [LSW05], souvent pour des arcs en courant continu, soit à l'ouverture du circuit par le sectionneur, soit à sa fermeture. Les modèles de types High Impedance Fault (HIF), sont utilisés pour la modélisation sur les lignes haute tension [HKZ05][MRL05]. Chaque modèle possède donc un domaine de validité déterminé par l'expérience qu'il tente de décrire. Dans notre cas, nous nous limitons à des arcs dont le courant est inférieur à plusieurs centaines d'ampères et dont la tension est celle que le réseau de distribution fournit. Soit : 220 Volts pour le réseau domestique, 380 volts pour le réseau industriel, 115 volts pour le réseau aéronautique AC et 28 volts pour le réseau DC. Ces limitations peuvent être qualifiées comme étant celles d'un système de basse puissance.

Dans un système de type aéronautique, plusieurs paramètres vont influer sur l'apparition d'un arc électrique. Ces paramètres sont la température, la pression, les niveaux de courant et de tension ainsi que la charge du circuit. Ils peuvent être considérés comme des paramètres macroscopiques de

l'arc. C'est pourquoi, un modèle fiable qui les intègre et qui est applicable dans notre cas permet, d'une part, d'améliorer la compréhension des phénomènes d'arc pouvant survenir dans un avion. D'autre part, ce modèle permet de tester et d'évaluer la qualité d'un algorithme de détection avant d'effectuer des tests expérimentaux.

3.1.2 Modèles d'arcs dans l'histoire

La foudre est probablement l'un des premiers phénomènes d'arcs observés, sinon le premier. En dehors du caractère divin imputé à ce phénomène, les premières réflexions sur l'électricité et la foudre sont généralement attribuées à Thalès en 600 avant Jésus Christ. Ce dernier mit en évidence l'électricité à l'aide d'une pierre d'ambre dont le nom grecque est « électron » . Mais c'est à une époque plus récente qu'il faut s'attarder pour découvrir les premiers relevés scientifiques sur les arcs électriques et la foudre. Ces relevés datent du Moyen Age où le clergé, impuissant à fournir une explication quant à la foudre, répertorie soigneusement tous les impacts de foudre observés [JDYL87]. Ainsi on trouve nombre de registres paroissiaux énumérant ces impacts. C'est seulement à partir du 18ème siècle que le phénomène d'arc est réellement étudié. En 1767, Benjamin Franklin réalise une première expérience avec un cerf-volant : lorsqu'un câble conducteur suspendu par un cerf-volant est placé au cœur d'un nuage d'orage, alors on constate de petits éclairs se produisant entre le sol et la fixation du câble. Le 18ème et le 19ème siècles voient une profonde transformation de la société avec l'avènement de l'électricité et des premiers réseaux de distribution. De nombreux scientifiques à l'origine de la science de l'électromagnétisme (Volta, Ampère, Coulomb, Maxwell, Faraday, Edison, Tesla...) sont contemporains de cette période. Ainsi, dans les rues, avant l'invention de la lampe à incandescence, il était courant de voir des lampes à arc électrique (figure 3.1, ici l'intensité lumineuse obtenue est égale à celle de 1200 bougies.).



FIG. 3.1 – Lampadaire à arc du 18ème siècle.

Au cours des années 1880–1890, l'usage des lampes à arc se répand massivement pour l'éclairage urbain. Elles servent aussi à décorer les édifices et monuments. La découverte de cette lampe est attribuée à Sir Humphry Davy, en 1809. En reliant deux morceaux de charbon à une pile volta, Sir Davy réussit à obtenir un arc de 8 cm de long. Ces lampes furent une des premières applications de l'arc avec le four à arc.

La figure 3.2 expose le principe de fonctionnement d'une telle lampe : deux tiges de carbone sont directement reliées à une source d'électricité. Un contact bref est provoqué entre les deux tiges, puis celles-ci sont écartées pour créer un arc. Lorsque les extrémités des tiges sont espacées de la bonne distance, le courant électrique s'écoule à travers un arc qui vaporise du carbone pour obtenir une lumière blanche intense. La tige de carbone c' utilisée se vaporise au fur et à mesure du temps. La longueur de l'arc est maintenue constante à l'aide d'un système de contrepoids. De telles lampes sont

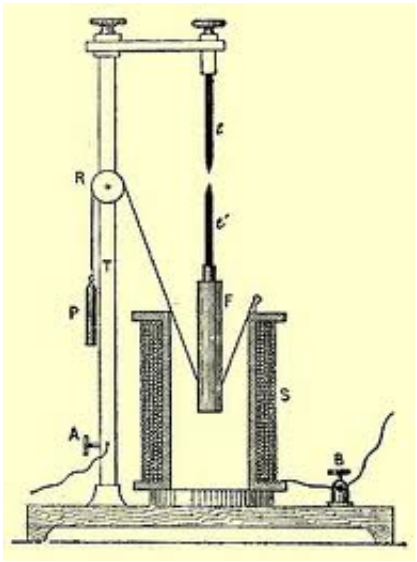


FIG. 3.2 – Lampe à arc du 18ème siècle.

encore utilisées aujourd'hui par exemple pour le théâtre, mais d'autres gaz que l'air sont utilisés. Une évolution est la lampe fluorescente faussement appelée « tube néon » . AE Becquerel a étudié la lampe fluorescente en 1857 ainsi que les lampes à arc à basse pression.

C'est en 1902 que le premier modèle d'arc est décrit par Hertha Ayrton dans un livre intitulé : « The Electric Arc » . Il inclut des descriptions et de nombreuses illustrations de ses expériences sur les lampes à arc. Il contient également la définition d'un modèle mathématique expliquant la relation entre le courant et la tension d'arc. Ce modèle sera repris et utilisé de nombreuses fois. Il souffre cependant d'un défaut majeur : il ne décrit pas le caractère temporel de l'arc. Plus précisément, il ne décrit pas la manière dont l'arc évolue au cours du temps. L'explication temporelle sera apportée en 1939 par J.M. Cassie puis amélioré par Otto Mayr en 1943. Ces trois célèbres modèles forment la base de la modélisation dite de Mayr-Cassie couramment utilisée aujourd'hui. Ces modèles électriques sont dit modèles 0D ou modèles de conductance. Ils sont considérés comme macroscopiques et tentent de décrire un arc par un composant dans un circuit électrique. Dans ce mémoire, seuls les modèles de types 0D sont traités. Les autres modèles 1D, 2D et 3D, issus de la physique des plasmas et de la thermodynamique ne sont pas pris en considération.

3.1.3 Les arcs électriques et leurs modèles

Classification des différents types d'arc

Bien que le phénomène d'arc dans un circuit soit observé et étudié depuis longtemps, il n'existe que très peu d'enregistrements et de mesures des caractéristiques d'un arc (courant, tension, température,...) disponibles dans la littérature. De sorte que la plupart des modèles de conductance récents sont élaborés à partir de cas particuliers, lors d'expériences uniques (par exemple un arbre sur une ligne [EL07]) ou difficilement reproductibles à l'identique (test de la guillotine). Proposer une classification s'avère d'autant plus compliqué car le caractère macroscopique de ces modèles leurs confèrent souvent un degré d'approximation élevé. De plus, beaucoup de simplifications physiques sont nécessaires pour aborder l'aspect macroscopique du modèle. Le comportement aléatoire d'un arc dans l'air (variation de distance, de température,...) augmente également la difficulté d'une modélisation électrique.

Dans une première approche, il nous faut établir une classification générale des types d'arcs et de leurs modèles. Cette classification doit s'affranchir au maximum de la contrainte aléatoire de certains paramètres liés à l'arc.

La deuxième approche, que nous avons choisi d'adopter, consiste à classer les arcs suivant les différents modèles capables de les simuler. Certains de ces modèles ne sont utilisables que lorsque la constante de temps d'arc (définie par la suite) est faible, d'autres sont alors nécessaires lorsque la constante de temps sera forte. D'autres encore prennent en compte le déphasage entre le courant d'arc et la tension du générateur.

Classification des différents modèles d'arc

Les modèles peuvent être également classés selon l'approche utilisée pour leur élaboration. On distingue alors trois grandes classes de modèle électrique :

- Les modèles de conductance : ces modèles visent à décrire la conductance de l'arc.
- Les modèles mathématiques : ils sont obtenus à partir de l'analyse mathématique des grandeurs d'arc à savoir le courant et la tension d'arc
- Les modèles comportementaux : ils sont souvent utilisés pour la description des arcs alternatifs. Ils découlent de l'analyse logique des signaux de l'arc électrique.

Enfin, on peut rajouter une dernière catégorie qui est présenté dans ce travail de thèse à savoir : les méta-modèles, issus de la combinaison des modèles précédents. En construisant un méta-modèle, il est possible d'étendre le domaine de validité et donc d'augmenter le nombre de cas de figure ou celui-ci est applicable. Le méta-modèle que nous proposons s'appuie sur une nouvelle démarche prenant en compte la décharge corona dans la modélisation. Cette approche a été initiée à partir de l'observation d'arcs électriques effectuée à l'aide d'une caméra rapide. Nous montrons que cette nouvelle modélisation de la décharge corona permet d'augmenter de manière significative les performances du modèle, et plus particulièrement lors de la phase du passage à zéro du courant.

3.2 Physique de l'arc

3.2.1 Généralités sur les plasmas

Afin de fournir une explication et une description du méta-modèle, on se propose d'étudier succinctement les décharges électriques selon l'approche utilisée par la physique des plasmas. Une décharge électrique survient lorsque l'air devient conducteur. Par exemple, lorsque la tension aux bornes de deux tiges ou électrodes devient très élevée. L'air est alors ionisé localement autour des électrodes sous l'action du champ électrique intense. Si le champ électrique est suffisant alors l'air commence à conduire l'électricité, on dit que l'air « claque » . Un chemin se créé permettant le passage du courant électrique.
Il existe trois principaux types de décharges électriques dans un gaz, à savoir :

- les décharges luminescentes,
- les décharges couronne,
- les arcs électriques.

Les gaz contenus dans l'air (principalement azote et oxygène) sont ionisés et forment ce que l'on appelle un plasma.
Un plasma est un milieu gazeux globalement neutre composé d'ions et d'électrons. On distingue les plasmas « chaud » et les plasmas « froid » :

- les plasmas chauds (ou thermique) : dans lesquels toutes les espèces de particules (ions, électrons) ont des températures proches.
- les plasmas froids (ou hors d'équilibre) : seuls les électrons présentent une énergie suffisante pour dissocier et ioniser le milieu, rendant ce dernier très réactif. Tandis que les particules lourdes gardent une température voisine de la température du milieu ambiant.

Les défauts d'arc que l'on rencontre dans les systèmes électriques sont des défauts qui prennent soit la forme d'une décharge corona soit la forme d'une décharge d'arc. La première étant un plasma froid, la seconde un plasma chaud.

3.2.2 Décharge électrique DC

Mécanisme d'une décharge

La décharge peut être décomposée en plusieurs étapes successives décrites figure 3.3 qui se rapportent à la caractéristique courant-tension donnée figure 3.4.

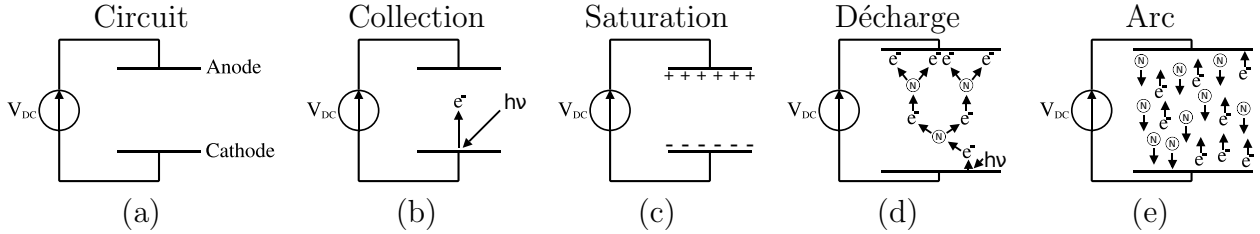


FIG. 3.3 – Les 5 étapes du processus de décharge DC.

Si une tension V_{DC} est appliquée aux bornes de deux électrodes séparées par un gaz (figure 3.3 (a)), aucun courant ne circule car le gaz est un bon isolant.

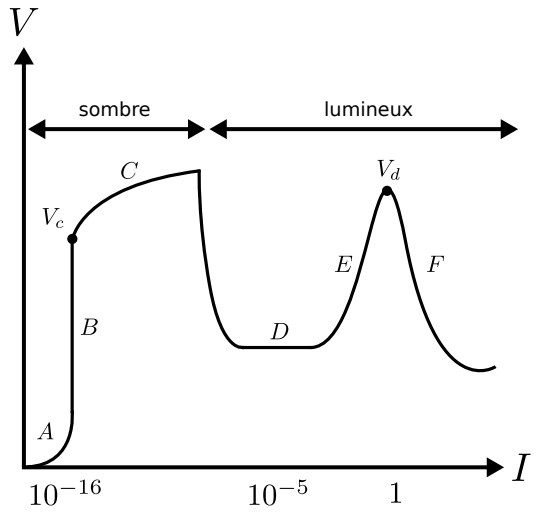


FIG. 3.4 – Caractéristique courant-tension aux bornes des électrodes.

Une décharge électrique peut cependant être amorcée selon les étapes de la figure 3.3 :
– collection (b), saturation (c),
– décharge de Townsend (d),
– décharge corona (d),
– décharge d'arc (d-e).

Régime de collection

Par procédé thermique, ou par rayonnent électromagnétique d'énergie hv (figure 3.3), on provoque une émission d'électrons à la cathode. Peu d'électrons arrivent à l'anode et leur énergie est insuffisante pour ioniser le milieu (collision élastique). La majorité des électrons reste autour de la cathode et forme une charge d'espace (zone A de la figure 3.4).
Lorsque la tension augmente, le courant ne varie plus et le nombre d'électrons ainsi collectés à la cathode augmente (zone B de la figure 3.4). Au moment où toute la surface des électrodes est chargée, il y a saturation (figure 3.3 c).

Decharge de Townsend

A la saturation, la différence de potentiel a atteint la tension de claquage V_c. Le champ électrique est suffisamment important pour que tous les électrons soient attirés par l'anode et pour qu'ils puissent ioniser les particules environnantes par collisions inélastiques. La figure 3.3 (d) montre un exemple de collision d'un électron avec une molécule d'azote. Cette collision libère un électron supplémentaire également attiré par l'anode et qui rentre également en collision avec une autre particule environnante. Ce processus entraine l'apparition de l'effet d'avalanche appelé décharge de Townsend (zone D de la figure 3.4). A cause de cet effet, il n'est pas nécessaire d'augmenter la tension pour voir le courant augmenter. Cette décharge n'est pas auto-entretenue, elle peut être stoppée à tout moment.

Décharge Couronne

Lorsque la condition d'auto-entretien [FK09] est respectée, la décharge ne s'éteint plus. On dit que la décharge passe en régime autonome car cette dernière est auto-entretenue. Cette décharge est appelée décharge couronne ou décharge corona (zone E de la figure 3.4). La décharge couronne se caractérise par sa couleur bleue électrique et sa faible température.

Décharge d'arc

Jusqu'à cette étape la température est considérée comme constante. Mais lorsque l'émission de courant devient importante, la température augmente localement. La tension disruptive V_d est alors franchie (zone F de la figure 3.4). Il n'est plus nécessaire de conserver une tension d'alimentation élevée pour que le régime d'arc soit maintenu. La surface émettrice d'électrons à la cathode se réduit pour former un spot appelé spot cathodique souvent très mobile. Lorsque le courant devient important, les ions deviennent alors également mobiles (figure 3.3 e).

La figure 3.5 montre l'évolution de la décharge à partir de la décharge corona jusqu'à l'apparition d'un arc.

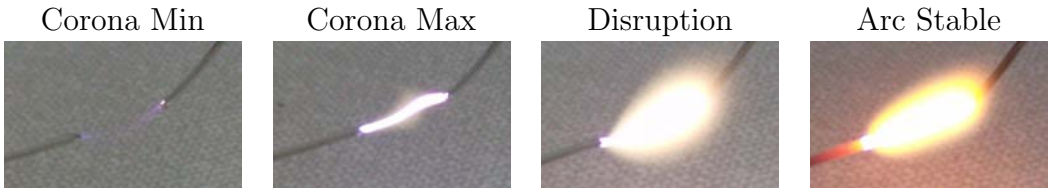


Fig. 3.5 – Phases d'apparition d'un arc électrique. Photographies réalisées au LIEN.

3.2.3 Caractéristique statique

Pour caractériser une décharge DC, l'arc qui se produit est considéré comme un élément du circuit. Ainsi il est possible de déterminer l'équation de charge de l'arc à partir des composants du circuit dans lequel il apparait. Cette équation de charge imposera la tension d'arc, mais ceci n'est valable que lorsque la tension d'arc est stable, c'est pourquoi on l'appelle charge statique. La topologie du circuit, mais aussi la nature des composants de ce dernier influent sur la caractéristique de l'arc mais dans le cas d'un arc parallèle avec charge résistive, celle-ci n'a que peu d'influence sur l'arc électrique. En effet, dans un système réel, le générateur possède toujours une résistance interne qui joue le rôle de charge série, la charge parallèle devient négigeable devant cette charge série. Il en est de même si la charge parallèle est fortement capacitive. Très souvent la charge parallèle est donc négligée. En conséquence, l'étude de la charge statique se limite à considérer uniquement le cas des arcs séries selon le montage de la figure 2.2 (b). La figure 3.6 (a) présente la droite des charges et la caractéristique statique de l'arc électrique.

La tension d'arc évolue selon la droite des charges du circuit représentée en figure 3.6. Cette dernière coupe la courbe caractéristique d'arc en deux points A et B. La pente de la droite des charges statique correspond à la valeur de la résistance de charge. Cette représentation présente l'inconvénient d'ignorer complètement l'aspect temporel de la décharge.

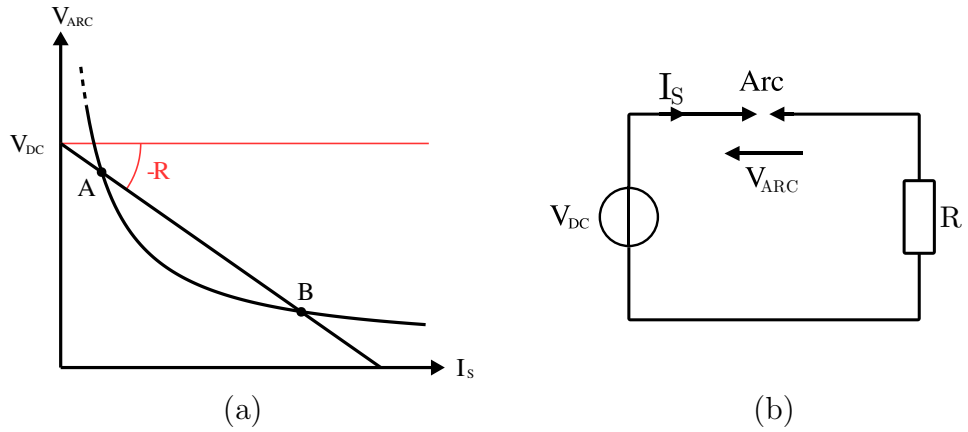


FIG. 3.6 – Caractéristique statique de l'arc et droite des charges.

L'équation de la droite des charges peut-être obtenue en effectuant une simple loi des mailles à partir du circuit de la figure 2.2 (b).

$$V_{ARC} = V_{DC} - RI_S \tag{3.1}$$

On peut démontrer que seul B est un point de fonctionnement stable qui correspond à l'arc entretenu :

$$V_{DC} = V_{ARC} + RI_S \tag{3.2}$$

Ainsi, lorsqu'une variation ΔI_S du courant se produit, cela implique une variation sur V_{ARC} car V_{DC} est supposée constante d'où :

$$\Delta V_{ARC} = \frac{dV_{ARC}}{dI_S}\Delta I_S \tag{3.3}$$

On considère que le générateur utilisé possède une impédance interne inductive. Dans le cas du GDARC (générateur d'arc décrit chapitre 4), cette impédance est représentée par l'inductance L_s du secondaire du transformateur interne associée à sa résistance série. Ainsi une variation de la tension de la bobine secondaire implique une variation de la tension d'alimentation telle que :

$$\Delta V_{DC} = -L_s\frac{d(\Delta I_S)}{dt} \tag{3.4}$$

On a donc :

$$V_{DC} + \Delta V_{DC} = V_{ARC} + \Delta V_{ARC} + R(I_S + \Delta I_S) \tag{3.5}$$

Soit :

$$L_s\frac{d(\Delta I_S)}{dt} = -\left(R + \frac{dV_{ARC}}{dI_S}\right)\Delta I_S \tag{3.6}$$

La solution de cette équation est :

$$\Delta I_S = (\Delta I_S)_0 exp\left[-\frac{1}{L_S}\left(R + \frac{dV_{ARC}}{dI_S}\right)t\right] \tag{3.7}$$

On peut distinguer deux types de situation :

– si $R + \frac{dV_{ARC}}{dI_S} < 0$ alors ΔI_S croit et le courant également.
– si $R + \frac{dV_{ARC}}{dI_S} > 0$ alors ΔI_S décroit vers zéro et le courant se stabilise.

On constate que seul le point B (figure 3.6) correspond à une stabilisation de la décharge. Donc lorsqu'un arc s'amorce, le courant augmente progressivement, la tension d'arc suit le courant selon la droite des charges jusqu'à atteindre le point stable B. La caractéristique constitue une représentation de tous les points stables B pour un ensemble de charges. Comme indiqué précédemment, la principale limitation de cette courbe réside dans l'absence de données concernant le temps qu'il faut pour atteindre le point stable (car le terme $\frac{dV_{ARC}}{dI_S}$ dépend de t).

3.2.4 Décharge électrique AC

La décharge électrique AC sous-entend une variation continue du champ électrique entre les électrodes. Les électrons oscillent alors entre l'anode et la cathode (figure 3.3 e). Une décharge AC n'est possible que si la fréquence d'oscillation des électrons est très rapide devant le parcours moyen d'un électron entre les électrodes. Les fréquences minimales à utiliser pour de telles décharges débutent dans la gamme RF. Cependant, dans les systèmes de puissance basse-tension où la fréquence est fixée à 50 Hz (ou 60 Hz), on constate tout de même l'apparition d'arcs AC. La fréquence est suffisamment basse pour permettre à un électron de rejoindre l'anode. Dans ce cas, la particularité d'une décharge alternative AC est d'être composée en réalité de deux décharges DC successives de sens opposés. Il existe donc deux seuils de tension disruptive l'un positif et l'autre négatif.

3.2.5 Caractéristique dynamique

La caractéristique dynamique correspond à l'évolution en fonction du temps de l'impédance de l'arc dans un circuit. De plus elle n'est pas issue de la caractéristique statique (partie 1 de la figure 3.7).

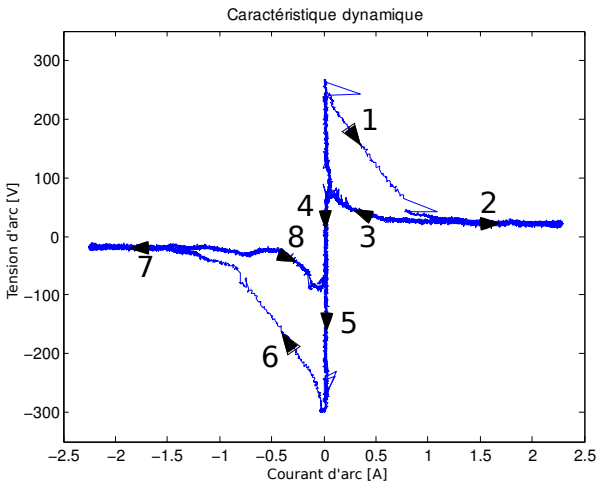


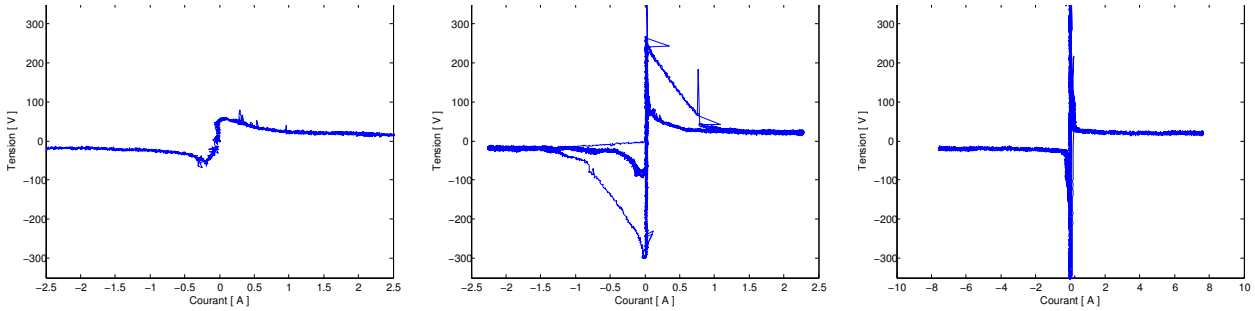
FIG. 3.7 – Caractéristique dynamique obtenue au laboratoire.

La caractéristique dynamique dépend fortement des paramètres physiques de l'arc (pression, distance inter-électrode, constante de temps...) mais également du type et de la composition du circuit

dans lequel l'arc apparaît. La comparaison de deux caractéristiques dynamiques ne peut-être effectuée que sous des conditions expérimentales rigoureusement identiques. La caractéristique est obtenue à partir de la mesure du courant et de la tension d'arc pour une période complète de la tension du générateur. En parcourant la courbe de la figure 3.7 suivant un temps croissant, on peut mettre en évidence 8 parties distinctes par cycle soit 4 par alternance :

1. L'arc s'amorce dès que la tension atteint une certaine valeur appelée tension de ré-amorçage. La tension de l'arc en fonction du courant décroît linéairement jusqu'à atteindre une valeur de tension constante. Le point de charge du circuit est alors atteint.
2. La tension d'alimentation continue d'augmenter, le courant d'arc croît et la tension d'arc reste constante. Après être passée par son maximum, la tension d'alimentation diminue à nouveau. La tension d'arc est toujours quasiment constante à mesure que le courant décroît.
3. Lorsque l'énergie fournie à l'arc devient inférieure à celle qu'il dissipe, c'est à dire lorsque la tension d'alimentation est insuffisante pour maintenir un courant minimum, alors l'arc commence son extinction.
4. La tension d'arc chute jusqu'à atteindre une valeur nulle, l'arc est définitivement éteint.

Les parties de 5 à 8 correspondent à l'évolution de la tension et du courant lors de l'alternance négative.
La figure 3.8 montre l'évolution de la caractéristique dynamique pour trois situations différentes.



(a) (b) (c)

FIG. 3.8 – Exemple de caractéristiques dynamiques expérimentales.

– Figure 3.8 a : la constante de temps d'arc est faible, le déphasage courant-tension introduit par le circuit est faible,
– Figure 3.8 b : la constante de temps est faible, le déphasage est élevé,
– Figure 3.8 c : la constante de temps est forte, le déphasage est élevé.

3.3 Modèles existants

De nombreux modèles microscopiques (physique des particules) et macroscopiques (thermique, dynamique, électrique) ont été développés. Notre attention se porte tout particulièrement sur les modèles macroscopiques électriques qui permettent de décrire le comportement de l'arc dans un circuit. Certains de ces modèles sont très connus comme le modèle d'Ayrton (1884) ou les modèles de Mayr et Cassie (1939). Une classification de ces modèles électriques peut-être réalisée selon deux types :

- les modèles électriques comportementaux qui décrivent mathématiquement le mécanisme de l'arc à partir d'une analyse du courant et de la tension [WLSS05].
- les modèles d'impédance, dans lesquels le courant et la tension sont utilisés pour le calcul de l'impédance équivalente de l'arc [M43] [C39].

On se propose dans cette partie de décrire succinctement les modèles de base utilisés pour la détermination de notre propre modèle.

3.3.1 Les modèles d'impédance

Modèle d'Ayrton

Bien que le modèle d'Ayrton ne soit pas tout à fait un modèle d'impédance, il est considéré comme tel car il tente de décrire la caractéristique statique de l'arc. Cette dernière est représentée comme une image de l'impédance de l'arc. Herta Ayrton a étudié à la fin du XIX ème siècle les arcs brulants dans l'air et notamment pour les lampes à arc [A02]. La loi qu'elle propose exprime la valeur de la tension d'arc V_{ARC} en fonction du courant d'arc I_{ARC} et de la distance inter-électrodes d :

$$V_{ARC} = A + B \cdot d + \frac{C + D \cdot d}{I_{ARC}} \tag{3.8}$$

Les coefficients A,B,C et D sont obtenus de manière empirique.
Cette formule n'est valable que pour une gamme de courant d'une centaine d'ampères. Les limites de ce modèle sont rapidement atteintes car celui-ci ne prend pas en compte le caractère temporel de la variation de V_{ARC}. Utilisé dans un circuit, il ne permet pas d'expliquer comment la décharge se stabilise pour atteindre le point de charge du circuit. Ce modèle sera utilisé comme une des hypothèses du modèle de Mayr et peut être réduit à sa forme hyperbolique :

$$V_{ARC} = \frac{P_0}{I_{ARC}} + V_0 \tag{3.9}$$

P_0 est la puissance de refroidissement de l'arc, V_0 le seuil de tension d'arc.
Ce modèle est également utilisé avec des modèles comportementaux de type modèles à diodes car il est facile de simuler le seuil de tension d'arc à l'aide d'une source de tension continue. A partir de l'observation de la droite des charges statique, il est possible de déterminer la valeur expérimentale des paramètres P_0 et V_0 du modèle. La caractéristique statique possède deux asymptotes : l'une verticale lorsque le courant se rapproche de zéro, l'autre horizontale lorsque le courant augmente de manière significative (figure 3.9). La constante V_0 correspond à la valeur minimale de la tension d'arc. Elle est abusivement appelée tension d'arc car si le courant est suffisamment grand alors le terme P_0/I_{ARC} est négligeable, d'où $V_{ARC} = V_0$. L'impédance globale de l'arc correspond alors à une force électromotrice dans un circuit. Le modèle équivalent électrique dans ce cas est une simple pile.
P_0, la puissance de refroidissement, correspond à la quantité d'énergie que dissipe un arc dans le milieu extérieur sous forme de chaleur et de rayonnement. Si la droite des charges croise la

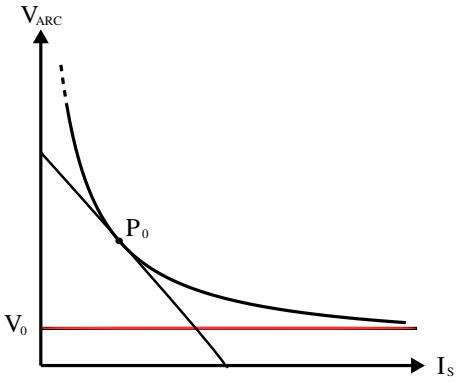


FIG. 3.9 – Asymptotes de la caractéristique statique.

caractéristique statique au point P_0, cela signifie que la puissance globale fournie à l'arc par le circuit est égale à la puissance dissipée par l'arc. Si le courant diminue à partir de ce point, l'arc s'éteint car la puissance fournie à l'arc devient inférieure à la puissance dissipée. Ce point est donc appelé « point d'extinction » .

On peut observer sur les caractéristiques obtenues expérimentalement (données chapitre suivant) que la puissance de refroidissement P_0 et la tension d'arc V_0 dépendent de la longueur de l'arc. Communément, l'évolution de V_0 et de P_0 en fonction de la longueur d'arc d proposée par Ayrton est considérée comme purement linéaire suivant les équations 3.10 et 3.11. Les quatre coefficients sont des constantes réelles.

$$V_0 = A + Bd \tag{3.10}$$

$$P_0 = C + Dd \tag{3.11}$$

La modélisation ne prend toutefois pas en compte certains paramètres physique comme la pression et la température du milieu.

Modèles de Mayr et Cassie

Les modèles de Mayr [M43] et de Cassie [C39] sont fondés sur l'évaluation du bilan d'énergie de la décharge lorsque le courant est proche de zéro. Afin d'effectuer ce bilan, on admet généralement que la variation d'énergie accumulée par l'arc est égale à la différence d'énergie entre la puissance fournie P_{in} et la puissance dissipée à l'environnement P_{out} :

$$\frac{dW}{dt} = P_{in} - P_{out} \tag{3.12}$$

La puissance dissipée ne peut pas être supérieure à la puissance maximale fournie par le circuit. Lorsque la puissance dissipée se rapproche de ce point maximal, l'énergie de l'arc ne varie plus ($P = cte$) donc l'arc est stable. Le ré-amorçage, quant à lui, intervient lorsque la quantité d'énergie apportée à l'arc est supérieure à celle qui est dissipée par le milieu ($P_{in} > P_{out}$).

Modèle de Mayr : Mayr a supposé que l'arc est assimilable à un cylindre de rayon constant pour lequel l'évacuation de l'énergie est uniquement due à la conduction thermique. Mayr postule ensuite que l'impédance électrique Z de l'arc (ou la conductance Y) dépend de l'énergie W accumulée par l'arc :

$$Y = \frac{1}{Z} = F(W) \tag{3.13}$$

Si l'on dérive cette expression on obtient :

$$\frac{d(1/Z)}{dt} = \frac{d(1/Z)}{dW}\frac{dW}{dt} \tag{3.14}$$

$$\frac{1}{Z}\frac{dZ}{dt} = -\frac{F'(W)}{F(W)}\frac{dW}{dt} \tag{3.15}$$

où :

$$F'(W) = d\frac{F(W)}{dW} \tag{3.16}$$

Soit :

$$\frac{1}{Z}\frac{dZ}{dt} = \frac{F'(W)}{F(W)}\left(P_{out} - P_{in}\right) \tag{3.17}$$

Mayr démontre que l'admittance Y est une fonction exponentielle de l'énergie contenue dans l'arc selon l'équation :

$$F(W) = K\exp\left(\frac{W}{W_0}\right) \tag{3.18}$$

K et W_0 sont deux constantes.
Enfin, la puissance de refroidissement P_{out} est considérée comme constante et égale à P_0.
En calculant l'expression $F'(W)/F(W)$ à partir de l'équation 3.18 et en remplaçant cette expression dans l'équation 3.17 on obtient :

$$\frac{dZ}{dt} = Z\frac{P_0}{W_0}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) \tag{3.19}$$

On peut constater que le terme W_0/P_0 est homogène à un temps et qu'il est constant. Ce terme est appelé constante de temps d'arc. Cette valeur conditionne fortement l'évolution temporelle à l'amorçage et à l'extinction de l'arc. En posant la constante de temps $\Theta = W_0/P_0$, on obtient la forme finale de l'équation d'impédance de Mayr :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) \tag{3.20}$$

Remarquons que si la puissance P_{in} est négligeable devant la puissance de refroidissement alors l'equation 3.20 possède une solution simple :

$$Z = Z_0\exp\left(\frac{t}{\Theta}\right) \tag{3.21}$$

De plus l'équation 3.20 montre que le sens de variation de l'impédance de l'arc dépend du signe de l'expression :

$$\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) \tag{3.22}$$

Si le ratio P_{in}/P_0 est supérieur à 1 alors le circuit fournit de l'énergie supplémentaire à l'arc, la variation d'impédance de l'arc est alors négative. Cela signifie que l'impédance diminue au fur et à mesure que l'énergie fournie à l'arc augmente.
Dans le cas de l'amorçage, la valeur de l'impédance tend vers zéro à mesure que la puissance fournie augmente. Le modèle de Mayr permet de calculer la tension d'arc suivant la relation donnée par l'équation 3.23.

$$V_{ARC} = \frac{P_0}{I_{ARC}} \tag{3.23}$$

A la différence du modèle d'Ayrton, cette relation montre que l'arc est uniquement composée d'une impédance sans force électromotrice. Cette dernière a été négligée par Mayr.
Dans la composition du modèle, la constante de temps d'arc est également un paramètre qui influe significativement sur le comportement de l'arc dans un circuit. Cette constante dépend de nombreux facteurs, dont notamment la géométrie des électrodes. Par exemple, si la géométrie des électrodes est telle que la constante de temps d'arc est très grande devant la demi-période de la tension du générateur AC, alors l'arc ne s'amorcera pas ou alors uniquement sur une seule alternance.
La constante de temps définit également le temps nécessaire à un arc pour atteindre la puissance maximale disponible. Elle impose une limite à la fréquence de la tension du générateur alimentant le circuit et de ce fait elle impose une fréquence de fonctionnement maximale lors de l'utilisation d'un générateur AC.

Modèle de Cassie : Les hypothèses de Cassie sont quelques peu différentes de celles proposées par Mayr. Cassie modélise également l'arc avec un cylindre, mais de rayon variable et de température interne constante. Cette dernière étant constante, les pertes d'énergie deviennent proportionnelles à la section de l'arc. Dans ce cas, l'impédance de l'arc est liée à la constante de temps par la relation suivante :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{V_{ARC}^2}{U_0}\right) \tag{3.24}$$

La plupart des applications de ces modèles concernent les phénomènes d'arc apparaissant lors de l'ouverture ou de la fermeture d'un circuit. Les modèles de Mayr et de Cassie sont très largement traités et de nombreuses améliorations ont été apportées par Habedank [SVDS02].
La figure 3.10 présente d'une part les résultats de simulations Matlab obtenus à partir des modèle de Mayr (trait plein) et de Cassie (trait discontinu), et d'autre part les courbes expérimentales (courbe grise).

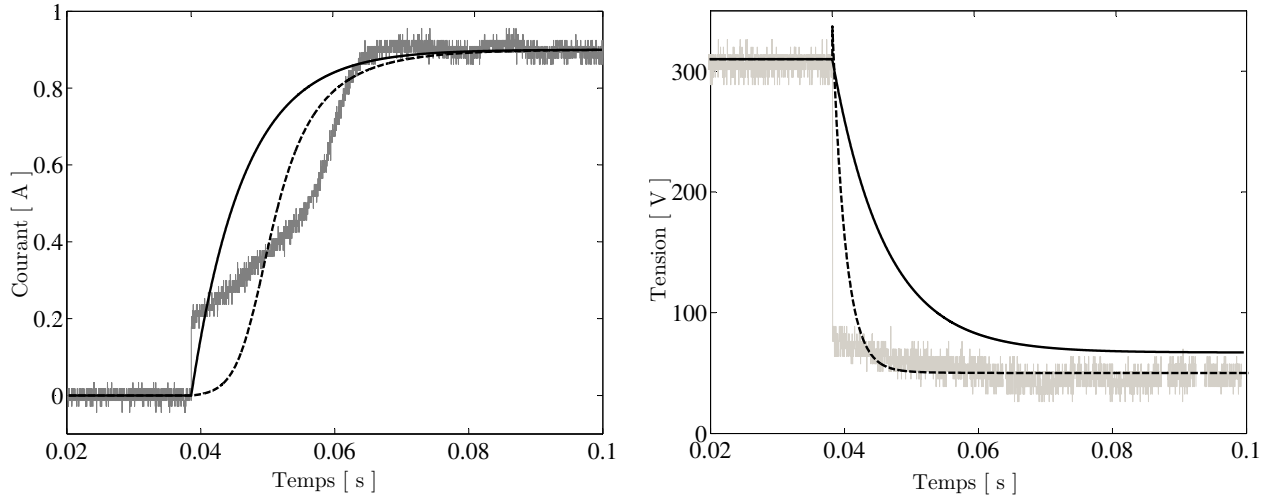


FIG. 3.10 – Courant et tension d'arc simulés à l'amorçage de l'arc DC avec les modèles de Mayr (trait plein) et Cassie (trait pointillé) comparés aux mesures expérimentales (trait gris).

Il apparait des écarts importants entre les modèles simulés et la réalité expérimentale. En effet, P_0 et Θ sont considérés par Mayr et Cassie comme des grandeurs constantes, ce qui n'est pas le cas dans la réalité.

3.3.2 Modèles comportementaux

Les modèles comportementaux sont tirés soit de l'analyse mathématique du phénomènes d'arc [WLSS05] [DA05] soit de l'analyse de la caractéristique dynamique ou statique d'arc. Ces analyses fournissent la plupart du temps une ou plusieurs équations liées à des conditions d'utilisation.

Modèle exponentiel-hyperbolique

Le modèle exponentiel-hyperbolique [BHE09] [MK98] est une généralisation du modèle d'Ayrton. Il permet de différencier de manière analytique les phases d'amorçage et d'extinction. Les conditions sont déterminées à partir de l'observation du courant d'arc I_{ARC}. Ainsi, si l'arc est dans une phase d'amorçage, le courant augmente et la tension suit une loi hyperbolique. Si l'arc est dans une phase d'extinction alors la tension suit une loi exponentielle. Cela se traduit par le jeu d'équations conditionnelles suivant :

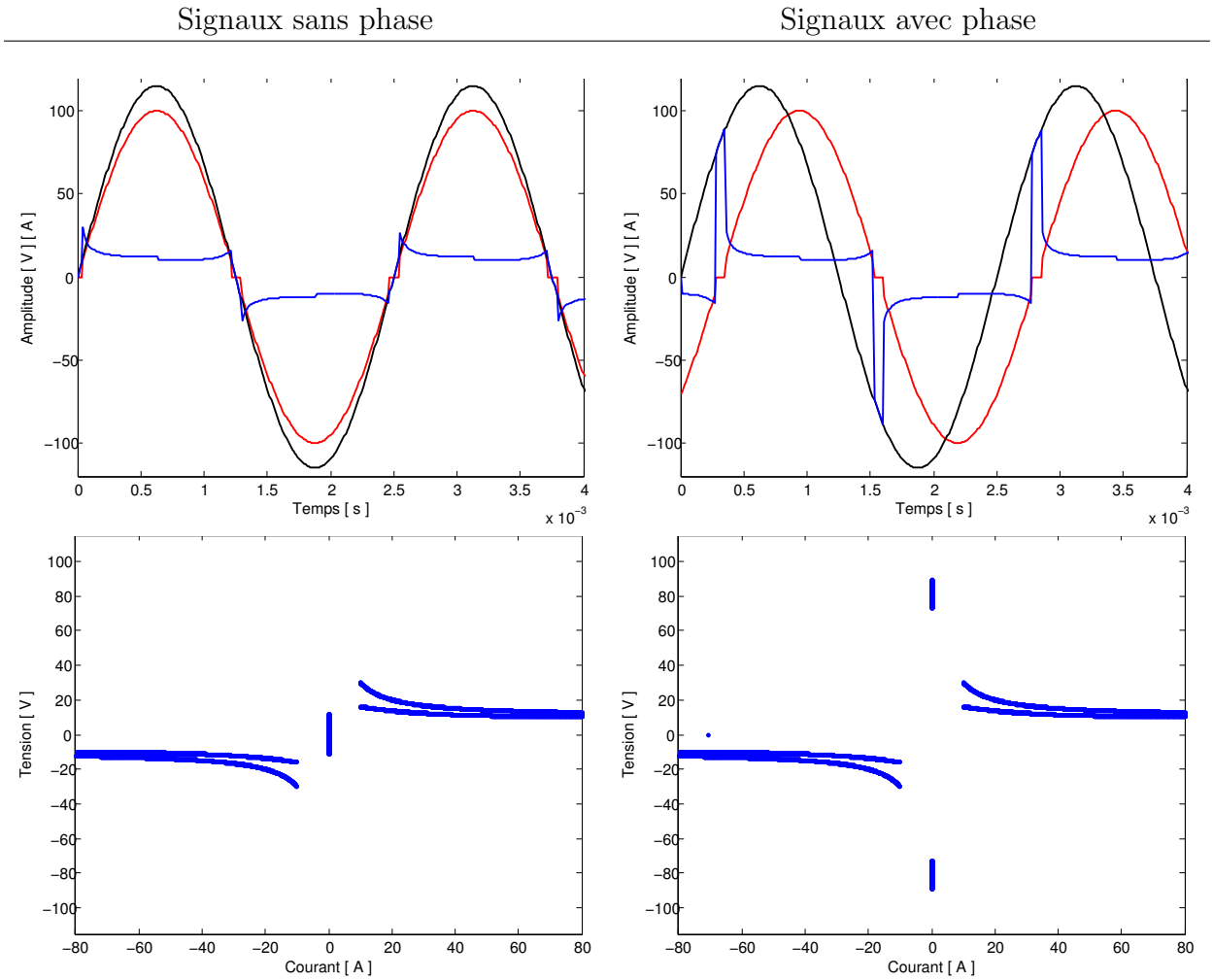
$$V(I_{ARC}) = \begin{cases} V_0 + \frac{C}{D+I_{ARC}} & \frac{dI_{ARC}}{dt} > 0, I_{ARC} > 0 \\ V_0(1 - e^{-I_{ARC}/I_0}) & \frac{dI_{ARC}}{dt} < 0, I_{ARC} > 0 \\ -V_0 - \frac{C}{D+I_{ARC}} & \frac{dI_{ARC}}{dt} > 0, I_{ARC} < 0 \\ -V_0(1 - e^{-I_{ARC}/I_0}) & \frac{dI_{ARC}}{dt} < 0, I_{ARC} < 0 \end{cases} \tag{3.25}$$

Afin de prendre en considération l'aspect temporel, ce modèle se base sur le sens du courant d'arc et de sa dérivée. Ce modèle possède également une pseudo constante de temps qui prend la forme du paramètre I_0 homogène à un courant. Cette modélisation se révèle précise lorsque les paramètres du modèle sont correctement calculés à partir des mesures expérimentales. Les paramètres C, D, V_0 et I_0 du modèle sont déterminés directement à partir du tracé de la caractéristique statique. Donc, le caractère temporel n'est pas pris en compte dans la modélisation.

La table 3.1 ci-après représente les différents signaux obtenus à partir du modèle exponentiel hyperbolique :

- les tracés des signaux de tension du générateur sont représentés en noir, la tension d'arc en bleue et le courant d'arc en rouge,
- les tracés de la caractéristique dynamique.

La table 3.1 possède deux colonnes. Ces deux colonnes représentent deux types d'allures d'arc parmi quatre identifiées (les types sont décrits au paragraphe 3.3.3). La colonne de gauche représente un arc à faible constante de temps dit en phase avec la tension du générateur (type 1). La colonne de droite représente un arc à faible constante de temps déphasé avec la tension du générateur (type 2). Il sera question des types d'arc par la suite. Seuls les deux types d'arc cités sont représentés car ce sont les seuls qui sont simulables avec ce modèle. Une telle table sera présentée pour chaque modèle décrit.



TAB. 3.1 – Tension du générateur (noir), courant d'arc (rouge), tension d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle exponentiel-hyperbolique.

Modèle à diodes

La décharge est considérée ici comme un phénomène non linéaire et asymétrique [MRL05][LSL03]. On observe les formes d'onde particulières pour les demi-cycles positifs et négatifs du courant et de la tension décrites en figure 3.11. Le modèle est construit à partir du mécanisme observé : le claquage de l'air n'apparait pas tant que la tension appliquée est inférieure à la tension de claquage de l'air. Si le point de rupture est franchi, l'arc s'amorce, le courant circule et atteint un maximum. Lorsque le courant diminue en fin de cycle, l'extinction se produit. Pour se réamorcer avec une polarité inverse, la tension doit franchir à nouveau un point de rupture, plus faible, appelé tension de ré-amorçage. Le mécanisme, répété cycliquement, explique la forme typique de tension et de courant d'un arc illustrée figure 3.11.

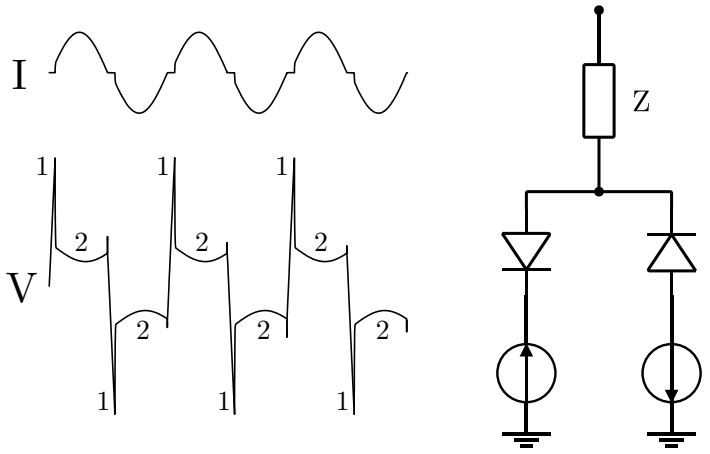
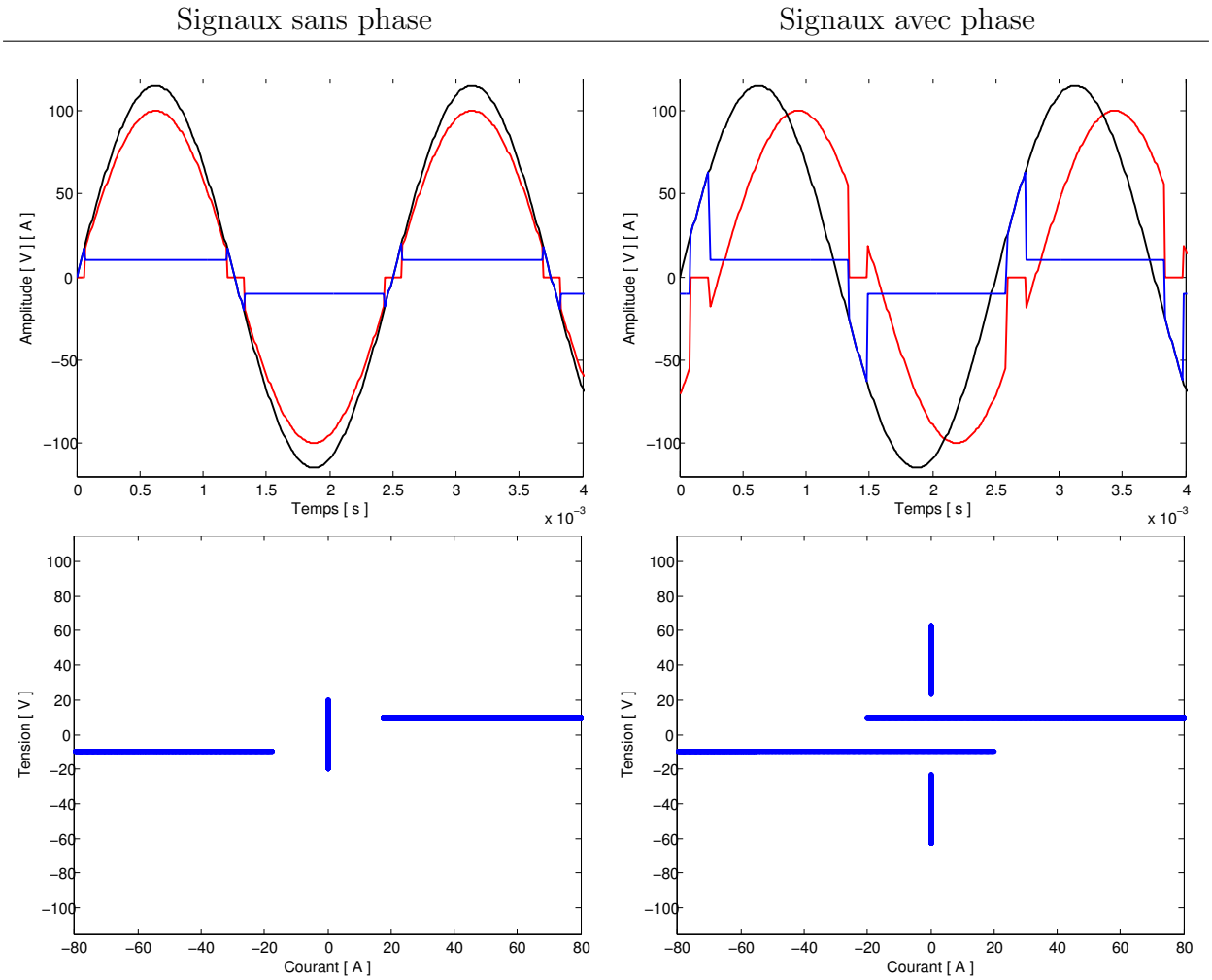


FIG. 3.11 – Allure de la tension et du courant d'arc et modèle simple à diode.

On peut constater d'après l'allure du courant que lorsque ce dernier s'annule, alors la tension d'arc a pour valeur celle du générateur (phase 1 de la figure 3.11). Lorsque l'arc s'amorce ou se réamorce, la tension d'arc chute rapidement à une valeur quasi constante (phase 2 de la figure 3.11) qui peut être représentée par une simple force électromotrice. Le courant durant cette étape augmente pour atteindre le point de charge du circuit puis prend une allure sinusoïdale qui dépend de l'impédance série du circuit (une résistance en l'occurrence). On peut également constater que la tension quasi constante d'arc devient une force contre-électromotrice opposée au sens du courant. Cette caractéristique à deux quadrants se traduit naturellement par un circuit d'aiguillage à diode comme le propose le schéma de la figure 3.11. Chaque diode est utilisée pour simuler un sens de courant. Une impédance Z est ajoutée pour simuler le caractère temporel du modèle d'arc.

Ce modèle comporte des limitations importantes comme par exemple l'utilisation des diodes pour la logique du passage en courant. Les caractéristiques des diodes sont telles que ces dernières ne laissent passer le courant que lorsque la tension à leurs bornes dépasse leur seuil de conduction, cela ne correspond pas à une réalité physique. On peut observer sur les deux figures de la table 3.2 qu'à cause de cette approximation, les signaux de courant et de tension deviennent non conformes à la réalité au moment du passage à zéro du courant.



TAB. 3.2 – Tension du générateur (noir), courants d'arc (rouge), tensions d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle le modèle à diodes.

Modèle de Matthews

En 1993, Matthews a développé un modèle généralisé basé sur la méthode de détermination de l'angle de conduction de la puissance [GM99]. Le circuit considéré peut être décrit par l'équation différentielle suivante :

$$V_{max}\sin(\omega t) = Ri_{arc}(t) + L\frac{di_{arc}(t)}{dt} + V_{arc}(t) \tag{3.26}$$

La solution générale pour le courant est donnée selon Matthews :

$$i_{arc}(t) = \frac{V_{max}}{|Z|}\left[\sin(\omega t - \varphi) - \frac{m}{\cos\varphi} + \left(\frac{m}{\cos\varphi} - \sin(\omega t_a - \varphi)\right)\varepsilon^{\frac{-\omega(t-t_a)}{\tan\varphi}}\right] \tag{3.27}$$

avec γ l'angle de conduction qui peut-être évalué par :

$$\varepsilon^{\frac{-\gamma}{\tan\varphi}} = \frac{\frac{m}{\cos\varphi} - \sin(\omega t_a + \gamma - \varphi)}{\frac{m}{\cos\varphi} - \sin(\omega t_a - \varphi)} \tag{3.28}$$

Les allures des signaux calculés par ce modèle sont donnée figure 3.12.

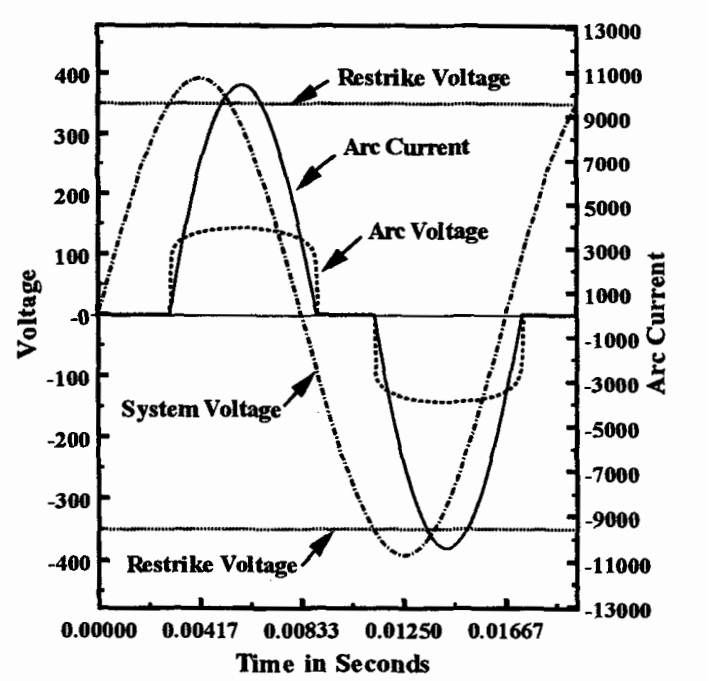


FIG. 3.12 – Allure de la tension et du courant d'arc selon le modèle de Matthiews (figure extraite de [GM00]).

Par la suite, pour effectuer la comparaison avec les autres modèles lors des simulations Matlab, on utilisera une variante proposée par Gammon [GM00], dans laquelle le courant est donné par l'expression :

$$V_{max} \sin(\omega t) = R i_{arc} + L \frac{di_{arc}}{dt} + (25\sqrt{g})\, i_{arc}^{0.15} \tag{3.29}$$

Les courants d'arc prédits par le modèle de Matthews sont indépendants de la longueur de l'arc ce qui implique que la tension d'arc est considérée comme constante quelque soit la variation de l'écart inter électrodes. Le désavantage majeur de cette approche est que les signaux obtenus, bien que possédant une allure proche de la réalité, diffèrent de manière importante sur certains points. Ainsi comme ce modèle est considéré comme symétrique (c'est à dire que l'allure lors d'une alternance positive est la symétrique de celle obtenue lors d'une alternance négative) cela signifie que ce modèle souffre du même problème que le modèle à diode : lorsque l'on introduit un déphasage φ trop important entre le signal de tension du générateur $V_{max} \sin(\omega t)$ et le courant d'arc i_{arc} alors le modèle fournit des signaux qui s'écartent de la réalité comme le montre la comparaison figure 3.13. De plus, le modèle étant purement mathématique, la constante de temps d'arc n'est pas prise en compte. L'allure générale des signaux obtenus à l'aide de ce modèle se rapproche de celle d'un arc à faible constante de temps.

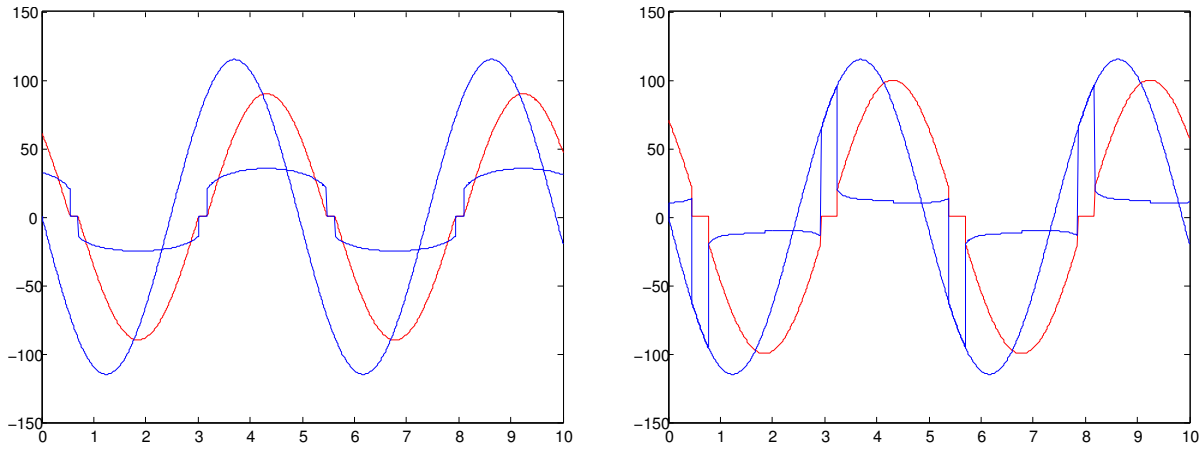
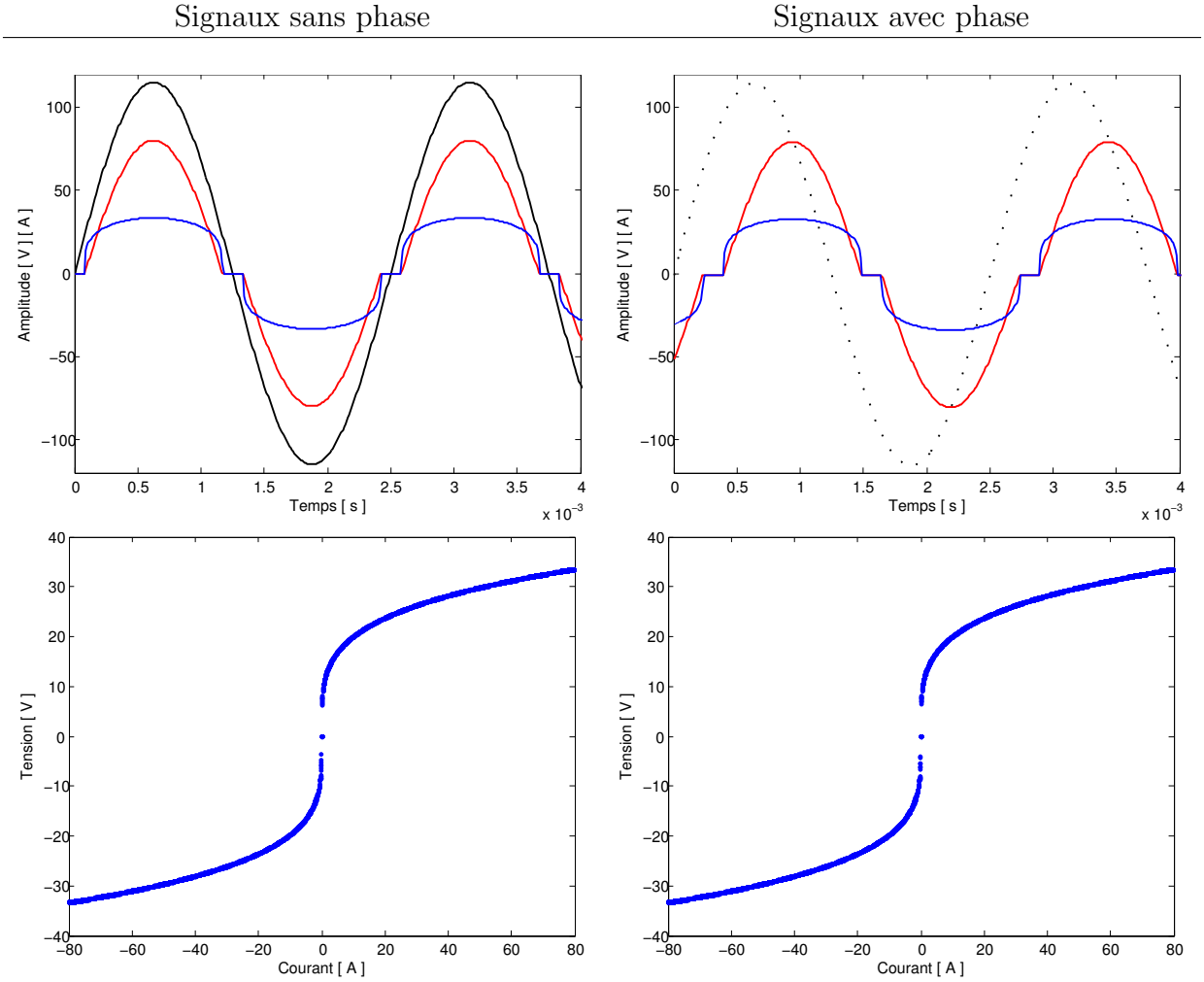


FIG. 3.13 – Signaux de tension et de courant d'arc obtenus par simulation Matlab. A gauche les signaux issus du modèle de Matthiews, à droite l'allure attendue des signaux d'arc.



TAB. 3.3 – Tension du générateur (noir), courant d'arc (rouge), tension d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle de Matthews.

Modèle de Kauffman et Page

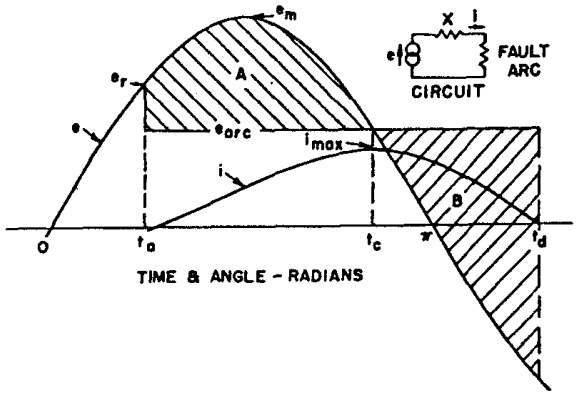
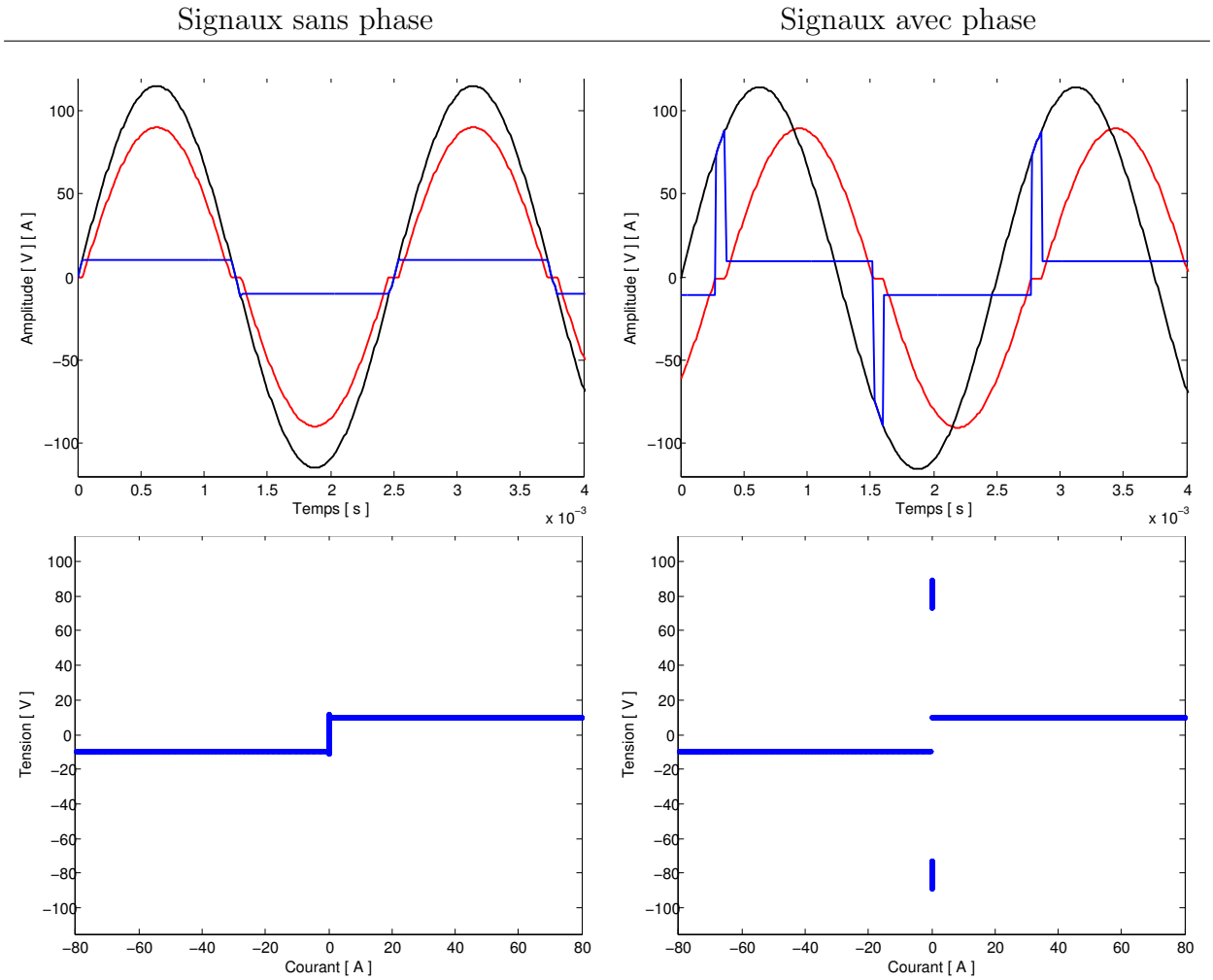


FIG. 3.14 – Allure de la tension et du courant d'arc selon le modèle de Kauffman (extraite de [MK98]).

Dans ce modèle, le circuit considéré est constitué d'une source de tension e, d'une impédance $X = wL$ ainsi que d'une tension d'arc e_{arc}. Le courant d'arc, comme le montre la figure 3.14, est généré de la manière suivante : au départ de la demi-période, le courant d'arc est nul. La source de tension atteint la tension e_r au temps t_a. Cette tension e_r est appelée tension de ré-amorçage. Lorsque cette tension e_r est franchie, l'arc s'amorce. Le courant d'arc apparaît et s'établit de manière sinusoïdale de t_a jusqu'à t_d. Durant ce temps, la tension d'arc est supposée constante. L'allure des signaux proposés par ce modèle sont donnés figure 3.14. Les simulations Matlab sont données table 3.4.



TAB. 3.4 – Tension du générateur (noir), courants d'arc (rouge), tensions d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle de Kauffman.

3.3.3 Performances comparées des modèles d'arc

La comparaison proposée ici est effectuée à partir de l'étude des signaux de courant et de tension d'arc. Les modèles présentés précédemment ne permettent pas de simuler des arcs en mode DC, seuls les arcs AC sont traités. Ainsi on établit une classification de ces signaux, à la fois en tension mais également en courant.

Classification des signaux d'arc pour la comparaison des modèles

La constante de temps d'arc est un paramètre de modélisation qui conditionne fortement l'allure des signaux de tension et de courant. On peut donc classer un arc selon la durée de sa constante de temps ; soit faible : de l'ordre de la microseconde ou soit forte : de l'ordre de la milliseconde. De la même manière, le déphasage dans un circuit série entre le courant d'arc et la tension du générateur est également un paramètre qui influe sur l'allure des signaux.
Tous les modèles ne sont pas adaptés à toutes les allures de signaux possibles. Il est à noter qu'à l'exception des modèles de Mayr, de Cassie et de leurs variantes, la plupart des modèles sont dans l'incapacité de prendre en compte la constante de temps d'arc. Proposer une classification des modèles revient à proposer une classification des signaux d'arc autre que la simple classification

série-parallèle utilisée jusqu'ici.
Nous proposons une classification simple qui met en avant les allures d'arcs rencontrées le plus souvent lors d'expériences mais également dans la littérature. Cette classification se résume à quatre allures principalement nommées types 1, 2, 3 et 4. :

Type 1 : allures d'arc à faible constante de temps et sans déphasage avec la tension d'alimentation.
On parle de déphasage lorsque le courant d'arc est déphasé avec la tension du générateur. **La tension d'arc quant à elle est toujours en phase avec le courant d'arc et cela sans exception**.

Type 2 : allures d'arcs à faible constante de temps d'arc en présence de déphasage avec la tension d'alimentation.
Ce déphasage introduit de manière importante un changement dans l'allure de la tension d'arc. En effet, l'arc se réamorçant, la tension d'arc est égale à la tension d'alimentation jusqu'a ce que la tension de ré-amorçage soit franchie. Si le courant d'arc est en phase avec la tension d'alimentation, alors, au moment du passage à zéro du courant, la tension d'arc sera nulle. Sinon, la tension d'arc présente une valeur différente de zéro. On comprend donc que l'allure de la tension d'arc dépend directement de ce déphasage.

Type 3 : allures d'arcs à forte constante de temps avec déphasage avec la tension d'alimentation.
Si la constante de temps est trop grande, alors le courant n'a pas eu le temps d'atteindre le point de charge. Ainsi, à partir de la moitié de la demi-période, le courant diminue. Dans ce dernier cas, la fréquence du signal délivré par le générateur est plus élevée que celle de l'arc. Il est préférable pour le contrôle d'un générateur d'arc d'essayer de garder une constante de temps rapide de sorte que la fréquence du signal d'arc soit inférieure à celle du générateur. Cette constante se modifie par la géométrie des électrodes. Dans le cas d'une caractérisation pour la détection, il faut une géométrie d'électrodes différente pour chaque constante de temps.

Type 4 : allure d'arc à faible courant d'arc avec déphasage avec la tension d'alimentation.
L'allure à faible courant, qu'elle soit à fort déphasage ou non, avec une forte constante de temps d'arc ou non, fait apparaître une symétrie sur la forme de la tension d'arc. Cet effet intervient car le point de charge est rapidement atteint quelque soit la valeur de la constante de temps. De plus l'allure de la tension à l'amorçage de l'arc est quasi identique à celle de l'extinction de l'arc en fin de demi-période.

Signaux expérimentaux de référence

Les signaux d'arc dépendent des caractéristiques intrinsèques de l'arc mais également de la nature du circuit dans lequel il apparaît. C'est pourquoi toutes les comparaisons sont effectuées pour un arc survenant dans un circuit série où la charge est composée d'une résistance et d'une inductance. Les signaux expérimentaux sont donc obtenus dans ces conditions à l'aide du générateur GDARC. Les types de signaux sont présentés figure 3.15.

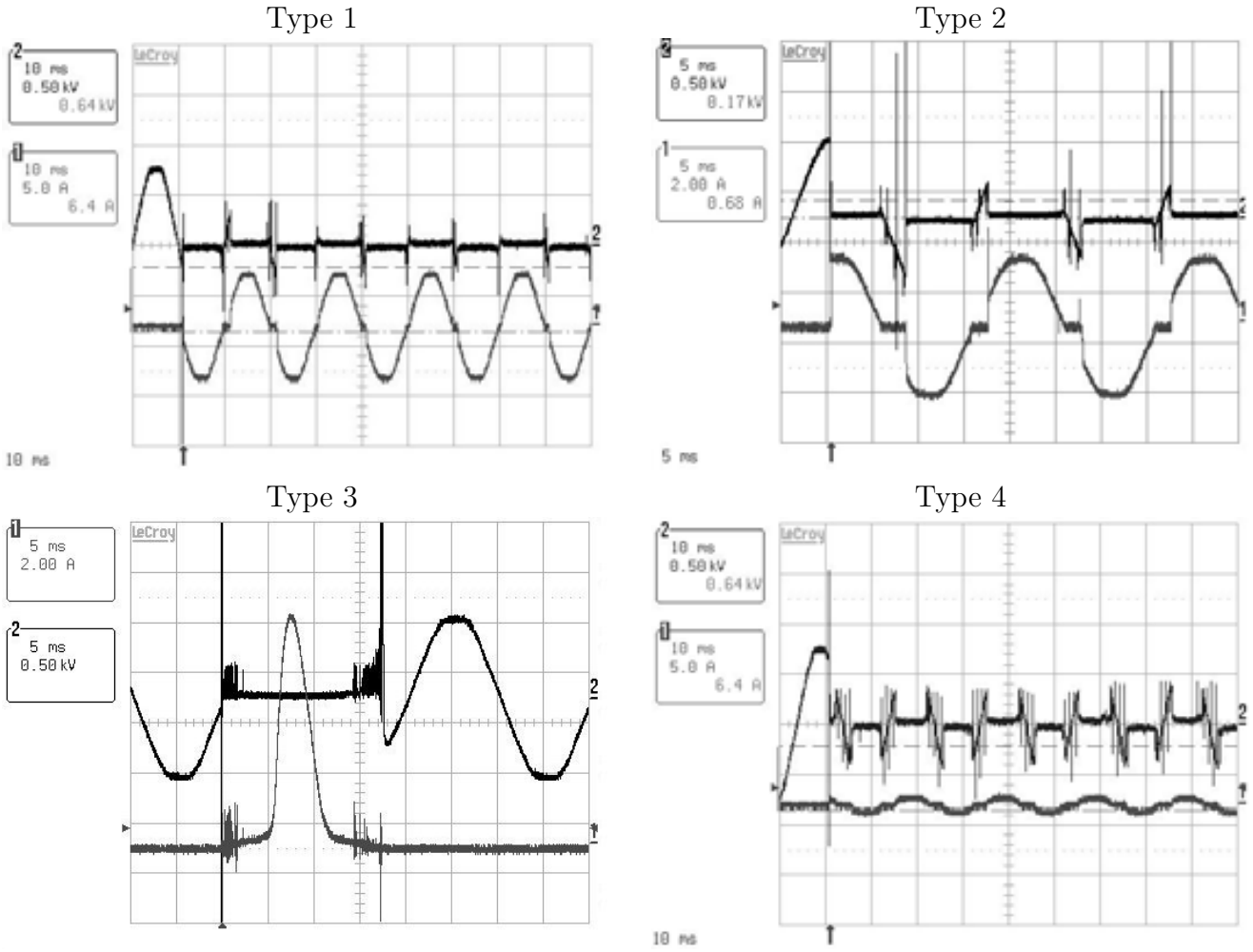
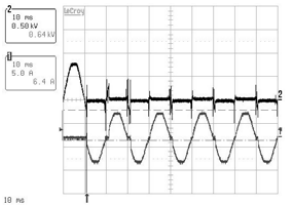
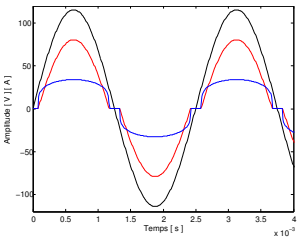
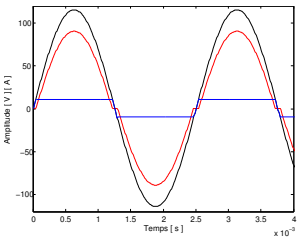
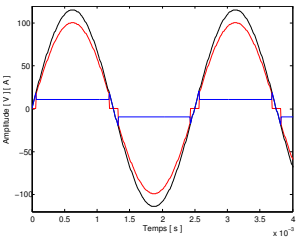
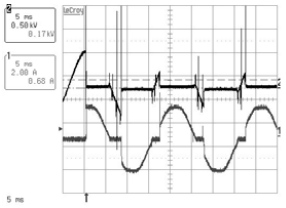
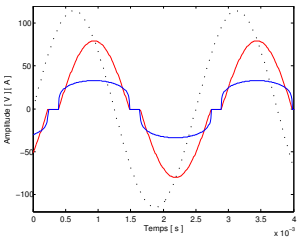
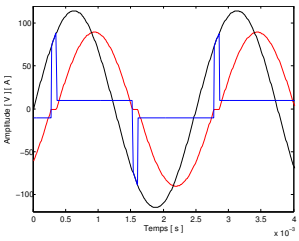
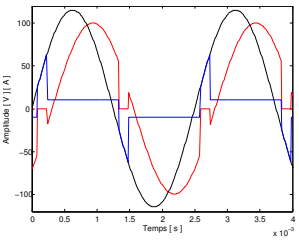
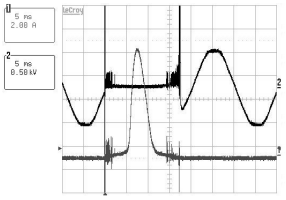
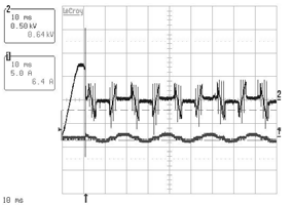
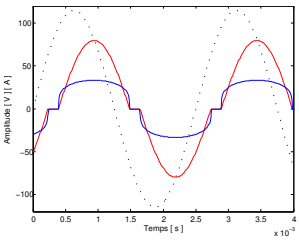
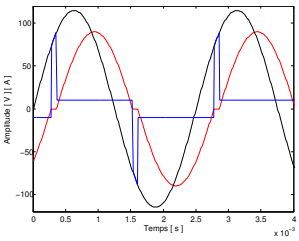
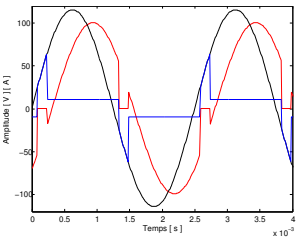


FIG. 3.15 – Type de signaux d'arc rencontrés expérimentalement.

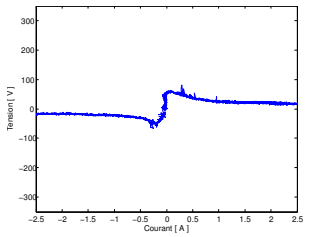
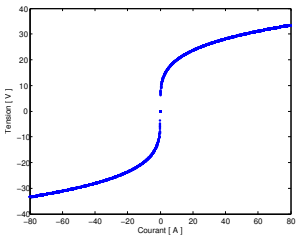
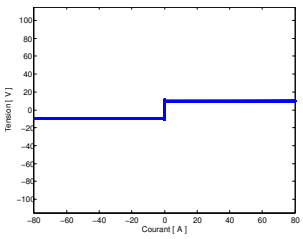
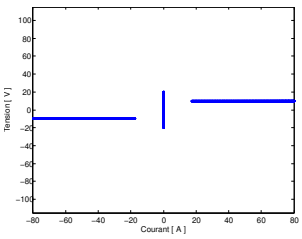
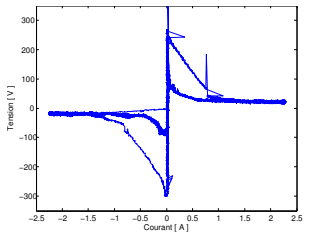
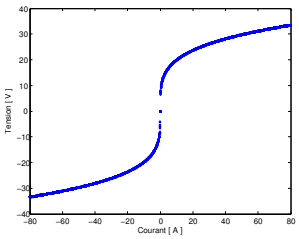
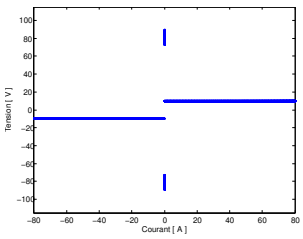
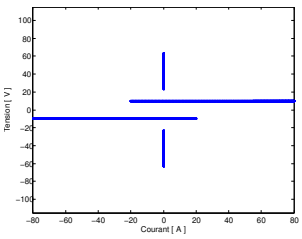
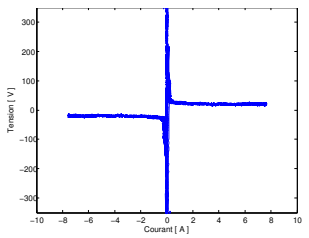
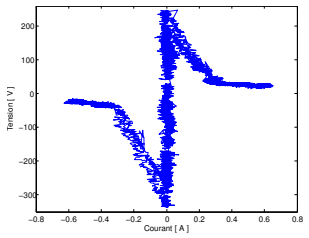
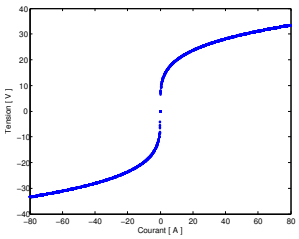
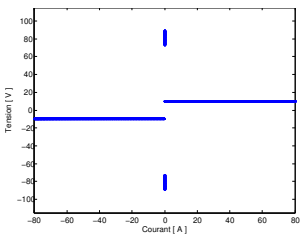
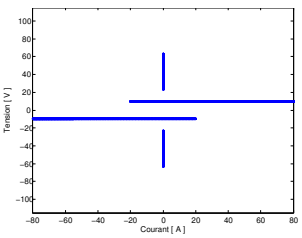
Comparaison des signaux délivrés par les modèles

Les résultats de simulation obtenus pour quatre types d'arc avec les modèles de Matthews, Kauffman et à diodes sont donnés dans le tableau suivant.

Allures	Matthiews	Kauffman	Modèle à diodes
 Type 1			
 Type 2			
 Type 3	Impossible	Impossible	Impossible
 Type 4			

TAB. 3.5 – Tableau comparatif des allures de tension et de courant d'arc expérimentales et simulées.

Il est également possible de comparer les caractéristiques dynamiques V(I) de chaque simulation pour tous les types d'arc.

Caractéristiques	Matthews	Kauffman	Modèle à diodes
 Type 1			
 Type 2			
 Type 3	Impossible	Impossible	Impossible
 Type 4			

TAB. 3.6 – Tableau comparatif des caractéristiques dynamiques expérimentales et simulées.

On notera que les simulations pour les modèles hyperboliques-exponentiels n'apparaissent pas dans les tableaux 3.5 et 3.6. Ce modèle, combiné au modèle à diodes constitue le plus performant des modèles existants. Par la suite, il sera amélioré et renommé modèle d'Ayrton étendu. C'est pourquoi nous avons choisi de présenter les résultats de simulation associés à ce modèle comparés à ceux du méta-modèle proposé. Il en est de même pour les modèles de Mayr et de Cassie qui ne peuvent être simulés en AC sans être combinés à un modèle comportemental.

Les résultats de comparaison sont donnés sous la forme de deux tableaux. Le premier tableau 3.7 permet de comparer le domaine de validité de chaque modèle par rapport aux quatre types d'arcs rencontrés. Le second compare les modèles par rapport au type d'alimentation utilisée.

Allures/Modèles	Matthiews	Kauffman	Modèle à diode	Mayr/Cassie	hyperbolique
type 1	✓	✗	✓	✓	✓
type 2	✗	✗	✗	✓	✓
type 3	✗	✓	✗	✓	✗
type 4	✓	✓	✓	✓	✓

TAB. 3.7 – Possibilités de modélisation suivant les types d'arcs.

Allures/Modèles	Matthiews	Kauffman	Modèle à diode	Mayr/Cassie	hyperbolique
AC	✓	✓	✓	✗	✓
DC	✗	✗	✓	✓	✓

TAB. 3.8 – Possibilités de modélisation suivant le mode d'alimentation.

D'après les tableaux ci-dessus, aucun modèle ne permet de simuler à lui seul toutes les configurations possibles. Le modèle hyperbolique donne de bon résultats dans tous les cas excepté pour le type 3 car il ne prend pas en compte la constante de temps d'arc. C'est pour ces raisons que nous nous sommes dirigés vers l'élaboration d'un nouveau modèle basé sur la combinaison des modèles de Mayr-Cassie et du modèle à diodes.

3.4 Élaboration d'un méta-modèle

3.4.1 Hypothèses pour la modélisation

Lorsque l'on observe un arc AC avec une caméra rapide, nous pouvons relever trois phases distinctes. La figure 3.16 montre des photographies de ces trois phases extraites de la vidéo réalisée au laboratoire (http ://www.youtube.com/user/djho123). La tension du générateur utilisé est de 400 V, l'arc est produit en série avec une charge purement résistive. Le courant d'arc maximum durant une alternance est de 300 mA.

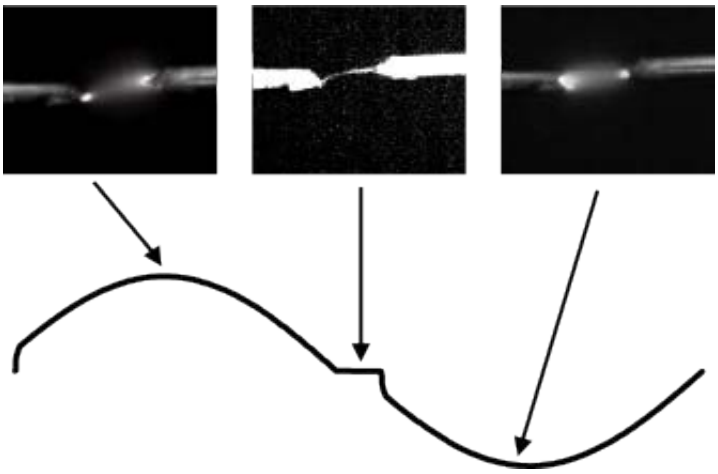


FIG. 3.16 – Étapes successives de la décharge en fonction du courant d'arc.

Les trois images de la figure 3.16, échantillonnées à 5000 fps, montrent le phénomène d'arc AC qui peut être décrit en trois étapes :

- Image 1 : la décharge d'arc est positive, le courant d'arc diminue jusqu'à provoquer son extinction.
- Image 2 : la polarisation aux bornes des électrodes change de sens pour devenir négative. La tension de claquage est franchie mais pas la tension disruptive. La décharge se situe entre le régime de Townsend et la décharge corona.
- Image 3 : la tension disruptive est franchie. Les phénomènes thermiques entrant en jeu provoquent une décharge d'arc

L'observation a permis de suggérer trois hypothèses de départ pour l'élaboration de notre méta-modèle :

1. Si le phénomène observé sur l'image 2 est proche d'une décharge corona d'un point de vue macroscopique, alors les deux autres images correspondent à des phases d'arc dont les courants sont opposés.
2. A un unique courant de ré-amorçage correspond une unique tension de ré-amorçage. Afin d'éviter les erreurs, nous verrons qu'il est préférable de considérer un courant de ré-amorçage plutôt qu'une tension. Dans cette optique le modèle classique à diodes doit être modifié car il prend en compte un seuil de tension pour le ré-amorçage et non un seuil de courant.
3. Les modèles de types Mayr-Cassie ne sont pas complets. Ils décrivent une décharge d'arc mais ne décrivent pas une décharge corona. Il convient donc de modifier l'approche de ces modèles pour y un intégrer la décharge corona.

3.4.2 Principe du méta-modèle

Le méta-modèle découle de l'observation de l'arc AC et propose de résoudre les problèmes liés à la modélisation du passage à zéro du courant lorsque l'alternance du courant change de sens. Cette observation est principalement focalisée sur l'amorçage de l'arc, précisément où se situe la décharge couronne avant la décharge d'arc.
Premièrement, la décharge corona peut être modélisée par une simple résistance de forte valeur dans une zone de fonctionnement précise en courant. On obtient une représentation graphique de la décharge en dupliquant la caractéristique statique figure 3.4 sur le quadrant négatif comme le montre la figure a de la table 3.17 (a). On constate que le régime de décharge corona (E) se situe à faible courant, de l'ordre du milliampère. Les phases antérieures à cette décharge (A,B,C,D) peuvent être entièrement négligées d'un point de vue macroscopique car le courant est inférieur au microampère. Cela se traduit par l'approximation donnée figure 3.17 (b) où seules les phases E et F sont considérées. Dans la zone ou se situe la décharge corona, le régime est fortement linéaire. Comme le courant est faible (quelques milliampères), alors cette décharge peut être assimilée à une fuite de courant dans un système basse puissance. Une fuite de courant est modélisée généralement par une résistance de forte valeur, ce que nous faisons précisément ici. On obtient la valeur de cette résistance corona par la pente de la caractéristique statique comme indiqué sur la courbe de la figure 3.17 (b).
Deuxièmement, on peut distinguer sur la figure 3.17 (b) les trois étapes correspondant aux trois

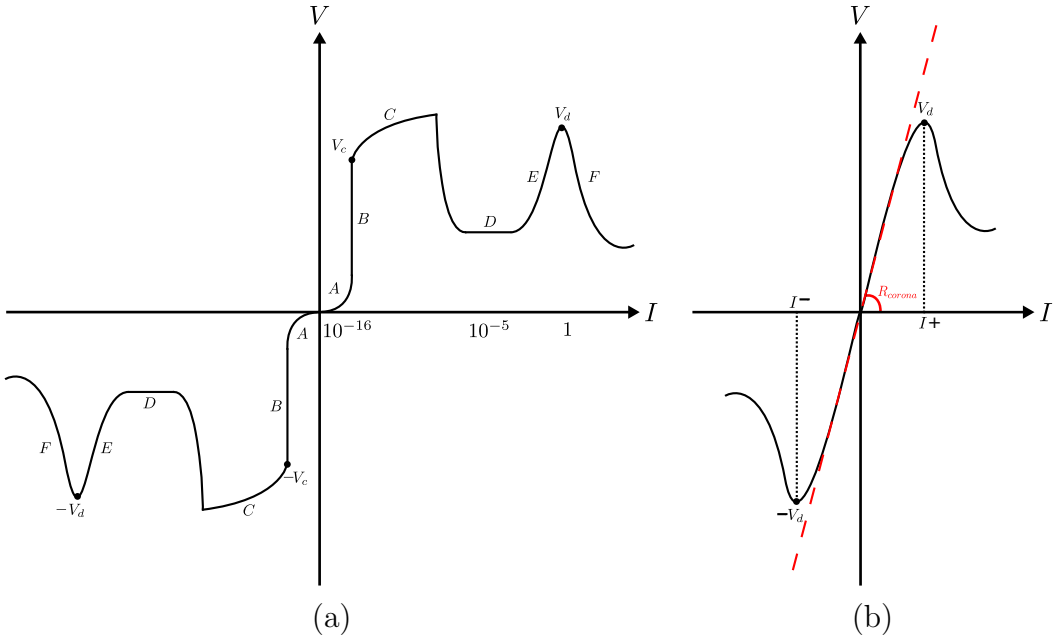


FIG. 3.17 – Modélisation de la caractéristique statique AC.

images de la table 3.5. Pour décrire graphiquement le franchissement de ces trois étapes, on peut utiliser soit les deux seuils de courants I^+ et I^-, soit les deux seuils de tension $+Vd$ et $-Vd$. Ces seuils sont, dans les autres modélisations, appelés courant et tension de ré-amorçage. Mais comme ici ils décrivent la transition d'une étape à l'autre, nous les nommons seuils de transition. En remarquant graphiquement sur la courbe de la figure 3.17 (a) ou (b) que si $V = f(I)$ est bien une fonction injective, la fonction réciproque $I = g(V)$ ne l'est pas. Autrement dit, pour un seuil de courant correspond un unique seuil de tension. Alors que pour un seuil de tension correspond plusieurs seuils de courant de ré-amorçage. Tout naturellement seuls les seuils de courants doivent être

pris en compte.
Le comportement général de l'impédance Z de l'arc est décrit mathématiquement en fonction des trois phases :

- $Z = Z_M^+$ si $I > I^+$
- $Z = Z_C$ si $I^- \leq I \leq I^+$
- $Z = Z_M^-$ si $I < I^-$

Z_M est l'impédance de décharge d'arc, Z_C est l'impédance de décharge corona. Ce système d'équation peut également se traduire sous la forme du schéma électrique donné figure 3.18. Chaque interrupteur du montage est fermé dans une gamme de courant I défini par les seuils I^+ et I^-. Par la suite, on représentera cet interrupteur commandé en courant par une diode en précisant la condition de courant.

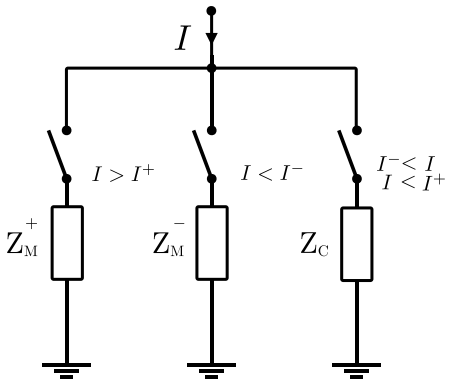


FIG. 3.18 – Modèle proposé.

3.4.3 Méta-modèle utilisant le modèle d'Ayrton

Nous pouvons compléter le modèle en utilisant une combinaison des autres modèles afin de proposer une description des impédances Z_M et Z_C. Ainsi, on peut construire un méta-modèle à partir du simple modèle de Mayr (ou avec une de ses variantes plus performantes), ou encore choisir le modèle d'Ayrton ou bien le modèle exponentiel-hyperbolique complet. Ce méta-modèle présente l'avantage d'être flexible, le choix des sous-modèles internes se fait selon l'utilisation souhaitée, c'est à dire la précision désirée.
Le choix des modèles est aussi conditionné par le type de simulateurs utilisé. Par exemple, le modèle de Mayr ne peut pas être simulé sous Spice. Il est néanmoins possible de simuler un arc avec Spice mais il faut utiliser d'autres modèles de base pour construire le méta-modèle et, inévitablement, les résultats de simulations ne sont pas rigoureusement identiques.
On utilise dans un premier temps le modèle d'Ayrton pour déterminer la valeur de l'impédance Z_M. Le modèle obtenu est nommé modèle d'Ayrton étendu. D'après le modèle d'Ayrton :

$$V_{arc} = P_0/I + V_0 \tag{3.30}$$

On constate que le terme P_0/I est homogène à une tension notée V_k. Donc pour obtenir l'impédance Z_k correspondante à la chute de tension V_k lorsqu'elle est parcourue par un courant I on écrit :

$$Z_k = P_0/I^2 \tag{3.31}$$

On peut donc écrire l'impédance globale de l'arc Z comme la mise en série de l'impédance Z_k avec une force électromotrice V_0, d'où :

$$Z = Z_k + Z_M \tag{3.32}$$

Avec $Z_M = V_0/I$ l'impédance correspondante à la force électromotrice V_0. En constatant enfin que V_0 est du même signe que le courant I, ainsi que V_k, on construit le circuit électrique du méta-modèle de la figure 3.19.

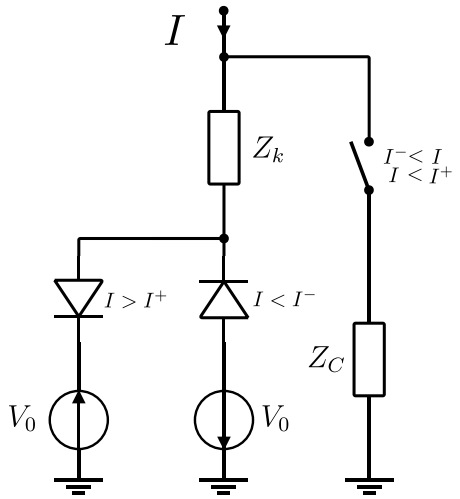


FIG. 3.19 – Méta-modèle d'Ayrton.

Il est possible de simplifier ce modèle en introduisant une approximation supplémentaire valable uniquement si le courant d'arc est important. Si on admet que la décharge corona constitue une fuite de courant au moment du passage à zéro, alors on peut considérer que cette fuite intervient également durant les autres phases. Cette dernière affirmation est inexacte, mais comme le courant de fuite est négligeable devant le courant d'arc cela ne constitue pas une erreur importante. Tout au plus, la charge série utilisée dans le circuit sujet à l'arc devra être vue comme très légèrement diminuée. Dans ce cas, le circuit présenté figure 3.19 peut-être approché par le schéma de la figure 3.20 :

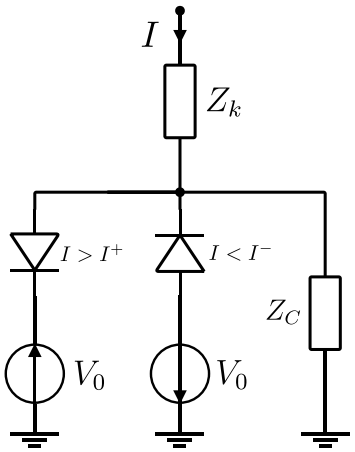


FIG. 3.20 – Méta-modèle d'Ayrton simplifié.

Si l'on complète ce modèle en y ajoutant la partie hyperbolique afin d'obtenir le modèle exponentiel hyperbolique complet, on obtient rigoureusement les résultats présentés en figure 3.1 dans la section concernant ce modèle. A ceci près qu'il apparait les seuils de courant I^+ et I^-. Notons toutefois que si nous utilisons ce modèle, le caractère temporel de l'arc n'est toujours pas pris en compte.

3.4.4 Modification de l'équation de Mayr

Afin d'inclure un comportement dynamique, on utilise maintenant le modèle de Mayr pour composer le méta-modèle (on pourrait le faire avec Cassie, ou bien avec d'autre modèles plus complexe comme celui de Habedank). Les équations de Mayr sont :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) \tag{3.33}$$

$$V_{arc} = \frac{P_0}{I_{arc}} \tag{3.34}$$

Il s'agit ici d'extraire de ces équations l'impédance Z_M qui complète le méta-modèle. Pour établir le modèle, on impose que l'impédance de l'arc soit constituée de l'impédance corona en série avec une impédance à déterminer Z_M. Dans ce cas :

$$Z = Z_C + Z_M \tag{3.35}$$

Cependant, on constate que, d'après la caractéristique statique, le maximum que peut prendre la valeur de Z vaut Z_C et que le minimum vaut zéro. Ce qui signifie que l'impédance Z_M est négative. Par commodité, on préfère donc écrire l'équation série sous la forme :

$$Z = Z_C - Z_M \tag{3.36}$$

Cette dernière équation est toujours vraie, car :

- dans une phase d'arc, Z_M varie entre un valeur maximale Z_C et zéro. Z_C est alors déconnectée du circuit
- dans une phase corona Z_M est nulle lorsque Z_C est connectée.

Quand bien même Z_C ne serait pas déconnectée, cette approche reste suffisante car Z_M devient négligeable devant Z_C à mesure que le courant augmente.

Si Z_C est une résistance de valeur constante, alors nous avons :

$$\frac{dZ}{dt} = -\frac{dZ_M}{dt} = -\frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) \tag{3.37}$$

par conséquent :

$$Z_M = \int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \tag{3.38}$$

finalement :

$$Z = Z_C - \int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \tag{3.39}$$

On obtient la décomposition du terme Z_M qui correspond donc à l'impédance à soustraire à Z_C lorsque l'on se situe en régime d'arc. Ce qui conduit au schéma équivalent de la figure 3.21. On constate que les forces électromotrices sont toujours présentes. En effet, Mayr se base sur le modèle

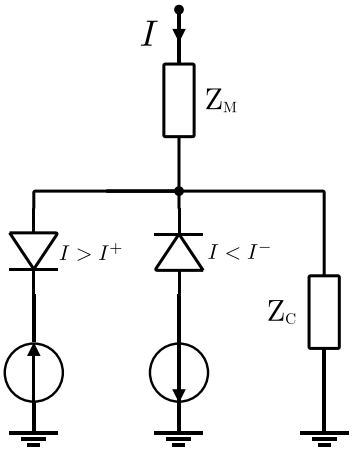


FIG. 3.21 – Modèle proposé.

d'Ayrton, mais en négligeant le terme V_0 de l'équation du modèle. Il est réintroduit ici pour corriger la tension d'arc réelle. En pratique, le terme :

$$Z_M = \int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \tag{3.40}$$

ne peut être évalué qu'a l'aide de l'équation 3.42. Car la puissance apportée à l'arc P_{in} dépend du produit $V_{arc} \cdot I_{arc}$. Pour la simulation, il faudra donc résoudre Z_M à partir du système :

$$Z_M = \int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \tag{3.41}$$

$$V_{arc} = \frac{P_0}{I_{arc}} + V_0 \tag{3.42}$$

Lors de la simulation, on se rend compte que Z_M change de signe en fonction de la puissance fournie à l'arc. La solution consiste à inverser le signe du terme Z_M en fonction du signe de la dérivée de P_{in} :

$$\int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \rightarrow \int \frac{Z}{\Theta}\left(\frac{P_{in}}{P_0} - 1\right) dt \tag{3.43}$$

Cela signifie simplement que le signe de Z_M détermine si l'arc est en phase d'accroissement ou d'extinction.

Plus généralement on pourra écrire :

$$Z = Z_C \pm \int \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) dt \tag{3.44}$$

Le résultat de la simulation de cette équation est donné figure 3.22.

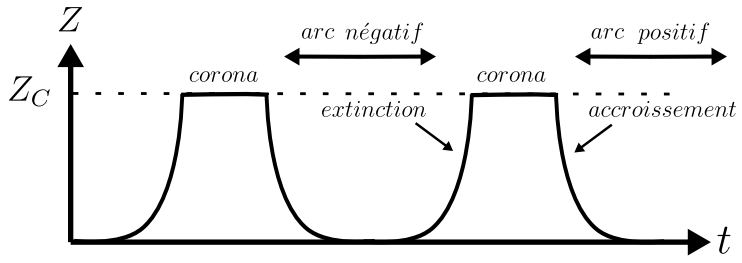


FIG. 3.22 – Simulation de l'impédance du modèle proposé au cours d'une période complète du courant d'arc.

3.5 Simulation du méta-modèle

Dans le souci d'obtenir des résultats de simulation les plus pertinents possibles, nous avons choisi d'effectuer une comparaison succincte des outils de simulation pour les phénomènes d'arc dans un circuit. Pour cela, nous avons décrit le modèle proposé à l'aide de deux logiciels différents :

- Matlab et Matlab-Simulink
- Orcad Pspice

3.5.1 Implantation du méta-modèle sous Spice

La simulation du méta-modèle sous Spice est probablement la plus rapide à mettre en œuvre car le modèle d'arc est décrit directement sous la forme d'un schéma électrique. Cependant le méta-modèle ne peut pas être simulé fidèlement. En effet, que l'on utilise le modèle de Mayr, de Cassie, ou encore une de leurs évolutions, la partie différentielle de l'équation 3.44 du modèle ne peut être simulée. Dans ce cas, soit on néglige totalement l'impédance Z du modèle, soit on la remplace par un modèle plus simple. Quelque soit l'option choisie, seuls les arcs à faible constante de temps seront simulables.
Pour cela, il faut d'abord choisir le circuit qui sera sujet à un défaut d'arc. Dans l'exemple de la figure 3.23, on choisit de produire ce défaut dans un circuit série composé d'une bobine L de valeur 10 μH et d'une résistance R_L de valeur 100 Ω.

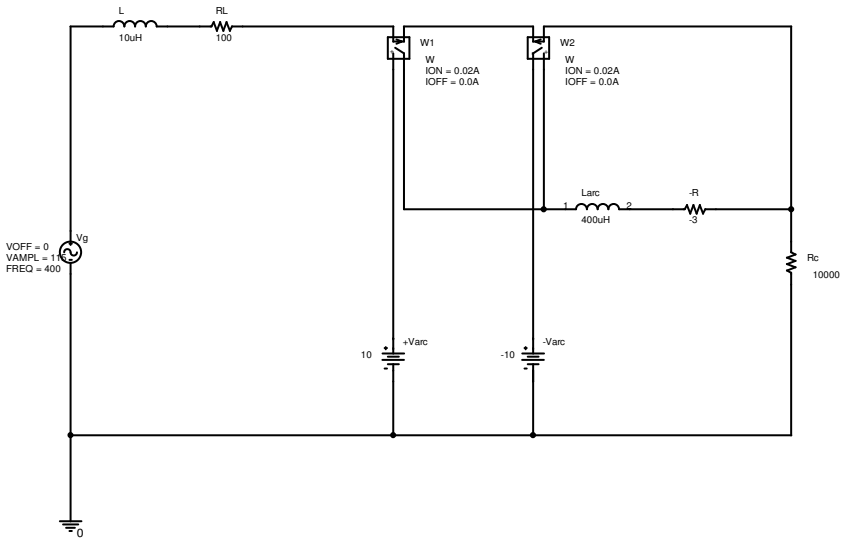


FIG. 3.23 – Schéma électrique du méta-modèle sous Spice.

Puis on ajoute à nouveau en série le modèle d'arc. Pour décrire les diodes dites de courant, on utilise le bloc simulink W. Comme on peut le voir sur la figure 3.23, ce bloc possède quatre bornes dont deux sont utilisées pour effectuer la mesure du courant dans le circuit. Il est possible de configurer la résistance interne introduite par la mesure de courant, mais il est également possible de configurer deux seuils de courant : un seuil de courant ouvert ION et un seul de courant fermé $IOFF$. Ainsi lorsqu'un de ces seuils est franchi, le courant peut circuler entre les deux dernières bornes. Ce bloc est un interrupteur commandé par un seuil de courant et il remplit la fonction de diode à seuil de courant.
Pour modéliser l'impédance de Mayr, on associe en série une bobine $Larc$ et une résistance négative de faible valeur. Ceci a pour effet d'introduire un caractère temporel au modèle. La valeur de la bobine conditionne indirectement la valeur de la constante de temps d'arc. La résistance négative, quant à elle, induit une légère force électromotrice s'opposant à la source de tension d'arc V_{ARC}. Enfin, la résistance de décharge corona est placée en parallèle.

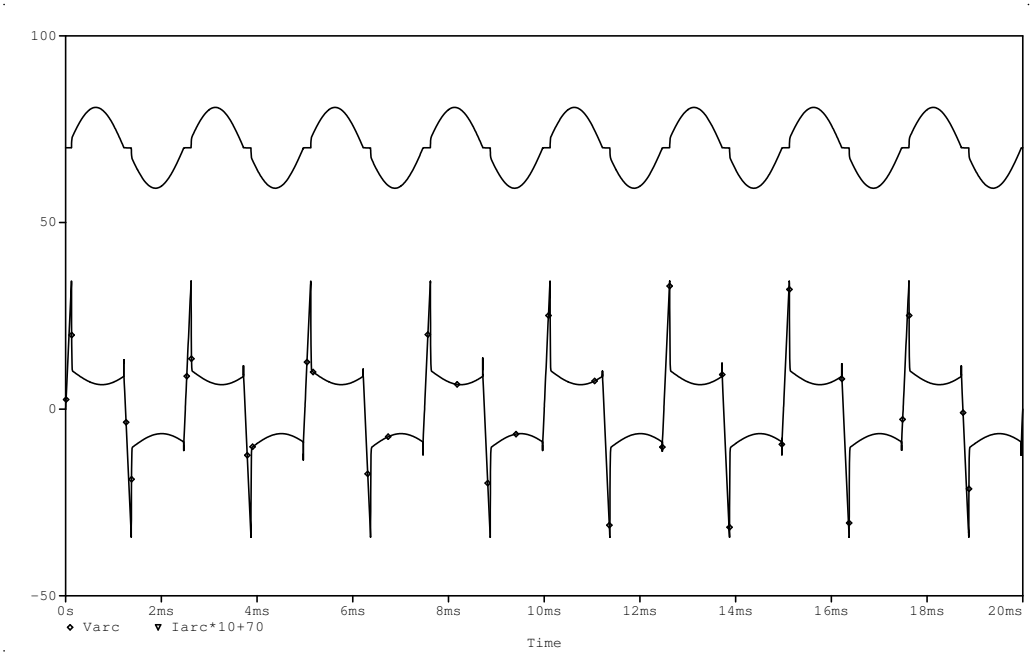


FIG. 3.24 – Simulation du courant et de la tension avec Spice.

On peut noter que cette solution possède certaines limitations : lorsque la valeur de la bobine L choisie devient importante, alors tous les signaux obtenus présentent un écart important avec la réalité. De la même manière, la résistance négative introduit une force électromotrice trop importante lorsque le courant est élevé. Cette méthode n'est donc valable que pour de faibles constantes de temps d'arc et de faibles courants. Dans les autres cas, il permet d'obtenir des résultats proches des résultats obtenus expérimentalement comme le montre les courbes de la figure 3.24. Cette figure donne le courant et la tension d'arc simulés d'après le schéma spice de la figure 3.23. On peut constater que l'arc ne s'amorce pas ! Il est présent dès le début de la simulation. Dans la même logique, il ne s'éteint pas ! Le modèle ne simule que les amorçages et les ré-amorçages qui sont liés au comportement intrinsèque de l'arc. Pour résoudre ce problème, une solution consiste à adjoindre un circuit supplémentaire au schéma de la figure 3.24, qui permet de prendre en charge les conditions d'amorçage et d'extinction. Ce système additionnel n'est pas traité ici.

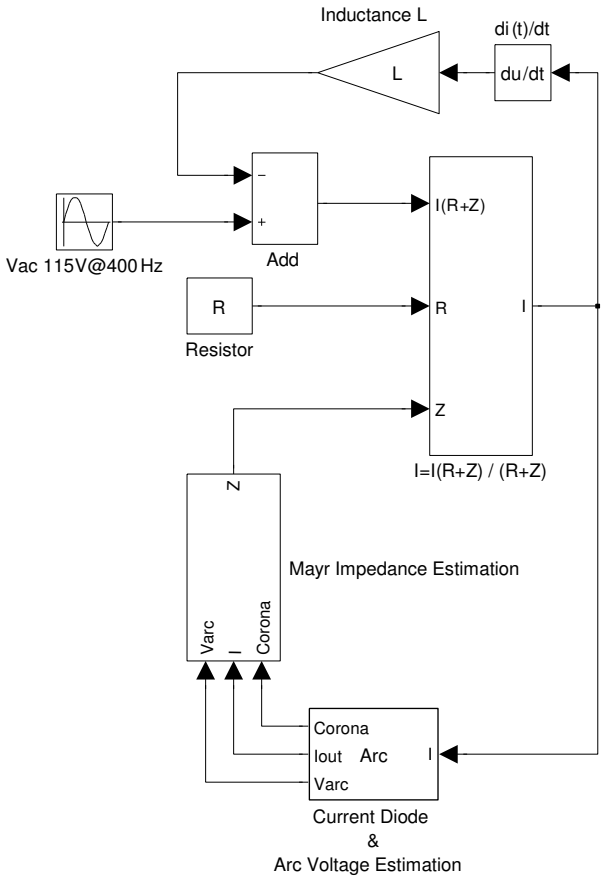


FIG. 3.25 – Modèle MATLAB Simulink simplifié.

Pour obtenir le schéma Simulink de base d'un circuit RL (figure 3.25), on écrit les équations du circuit :

$$V_{ac} = RI + L\frac{dI}{dt} + V_{arc} \tag{3.45}$$

ou encore :

$$V_{ac} = RI + L\frac{dI}{dt} + ZI \tag{3.46}$$

on réécrit :

$$(R + Z)I = V_{ac} - L\frac{dI}{dt} \tag{3.47}$$

L'expression $(R+Z)I$ de cette dernière équation est évaluée par la connexion des blocs Simulink « Add » , « Inductance L » , « d(i)/dt » et « Vac » du schéma Simulink figure 3.25. Le bloc appelé « I=(R+Z)I/(R+Z) » réalise le calcul du courant I dans le circuit simplement en divisant l'expression $(R + Z)I$ calculée par la somme $R + Z$ des valeurs réelles de R et de Z. Comme nous pouvons le voir, cette description induit une boucle de courant. La valeur de l'impédance d'arc Z est calculée par le bloc « Mayr Impedance Estimation » . Ce bloc évalue l'impédance Z à partir de l'équation 44 avec $P_{in} = V_{arc} \cdot I$. Ceci explique pourquoi V_{arc} et I sont les signaux d'entrée de ce bloc. Une entrée additionnelle nommée Corona est utilisée pour indiquer si une décharge corona est en cours. Finalement la tension V_{arc} est estimée à partir du courant par le bloc « Current Diode and Arc Voltage Estimation » .

3.6 Résultats de simulation

3.6.1 Performances du méta-modèle en régime DC

Afin d'évaluer les performances du modèle en régime DC, une comparaison est effectuée avec des mesures réelles d'amorçage d'arc. La série de mesures est réalisée avec un circuit dont l'alimentation est de 310 V. La charge série utilisée est une charge purement résistive de 270 Ω. L'effet inductif apporté par le transformateur du système d'amorçage pris en compte est de l'ordre de 10μH. Pour paramétrer le modèle, il faut avoir effectué une mesure au préalable de la tension d'arc et de la constante de temps d'arc. Ce paramétrage s'effectue en deux étapes :

- évaluation de la valeur de l'impédance Z_C et des seuils I^+ et I^-
- évaluation des paramètres P_0, θ et V_0

Dans notre cas on choisit les électrodes en tungstène espacées de 2 mm. On mesure donc une tension d'arc d'environ 50 V et une constante de temps de 43 millisecondes (figure 3.26). La figure 3.26 montre les résultats de simulation comparés aux mesures réelles.

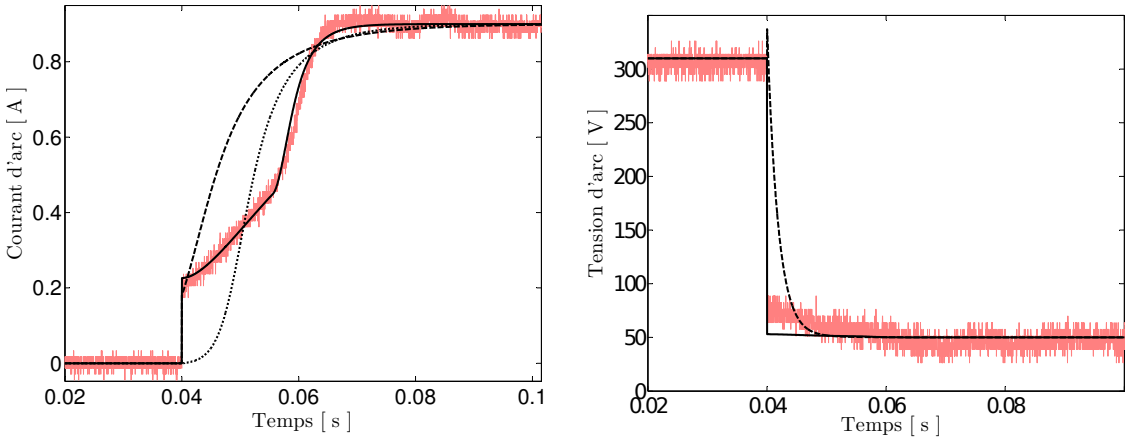


FIG. 3.26 – Mesures et simulations du courant d'arc (à gauche) et de la tension d'arc (à droite). En rouge la mesure expérimentale, en pointillé court le modèle de Mayr, en pointillé long le modèle proposé, en continue long le modèle proposé avec correction de constante de temps.

Décharge corona

On remarque que la mesure expérimentale du courant d'arc effectue un saut directement à l'amorçage de l'arc. Ce saut n'est pas reproduit par le simple modèle de Mayr comme le montrent les figures de la table 3.26. En revanche, il est correctement expliqué par le méta-modèle. En effet, avant que le courant ne s'établisse à environ 0.2 A, le régime est un régime de décharge corona. La mesure de 0.2 A correspond ainsi au courant de transition I^+. Il est aussi possible d'évaluer la résistance corona, puisque à 0.2 A la tension est de 310 V, d'ou :

$$Z_C = \frac{310}{0.2} = 1550\Omega \tag{3.48}$$

Les différentes expérimentations réalisées, montrent que le seuil I^+ de 0.2A est indépendant de la charge du circuit. Il augmente à mesure que l'écart entre les électrodes diminue. Il dépend donc fortement de la nature et de la géométrie des électrodes. En généralisant, on peut dire que pour une décharge DC négative le seuil I^- est égale à $-I^+$ soit -0.2 A. En pratique c'est souvent le cas

mais il arrive aussi que ces deux seuils ne soient pas rigoureusement opposés. Nous verrons que dans le cas d'une décharge AC on peut jouer sur ces seuils pour reproduire des signaux d'arcs fidèles à l'expérimentation.

Décharge d'arc

Lorsque l'arc devient stable, on remarque que le courant approche 0.85 A. On remarque également que dans ce cas $V_{ARC} \approx 50V$, or on sait que pour la distance inter-électrodes choisie $V_0 = 48V$ (d'après la caractéristique statique), donc pour déterminer le paramètre P_0 du modèle selon Ayrton on calcule :

$$P_0 = \frac{V_{arc} - V_0}{I_{ARC}} = (50 - 48)/0.85 = 2.3W \tag{3.49}$$

Maintenant on détermine P_0, mais à partir des équations de Mayr. Pour ce faire, on remarque que lorsque l'arc est stable, l'impédance de l'arc ne varie plus. D'où :

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Z}{\Theta}\left(1 - \frac{P_{in}}{P_0}\right) = 0 \tag{3.50}$$

ou encore :

$$\frac{P_{in}}{P_0} = 1 \tag{3.51}$$

finalement :

$$P_0 = P_{in} = V_{ARC} \cdot I_{ARC} = 50 \times 0.85 = 42.5W \tag{3.52}$$

On obtient une valeur différente pour la puissance de refroidissement selon que l'on utilise Mayr ou Ayrton. La différence est tout à fait justifiable : la puissance de refroidissement P_0 est définie différemment selon Mayr et Ayrton (une différence d'énergie pour Mayr, un point d'extinction pour Ayrton). Le modèle s'affranchit totalement de cette différence, il suffit de considérer deux puissances de refroidissement. En effet, la puissance selon Mayr ajustera la valeur du courant d'arc, tandis que la puissance selon Ayrton ajustera la valeur de la tension d'arc. Le modèle paramétré s'écrit :

$$Z = 1550 - \int \frac{Z}{0.043}\left(1 - \frac{P_{in}}{42.5}\right) dt \tag{3.53}$$

$$V_{arc} = \frac{2.3}{I_{arc}} + 48 \tag{3.54}$$

Le paramètre Θ est obtenu de manière empirique et vaut approximativement 1 milliseconde. En pratique, même si cette constante dépend de la géométrie des électrodes, elle n'est pas constante et évolue en fonction du courant d'arc. Cette évolution, avec notre géométrie, est de forme exponentielle. Pour simplifier, nous avons réduit cette forme à deux allures linéaires dépendant d'un seuil de courant comme le montre la figure 3.27.

En utilisant les équations 3.53 et 3.54 du méta-modèle paramétré ainsi que la loi d'évolution de Θ, on obtient des signaux d'arc en courant et en tension fidèles à la réalité expérimentale comme le prouvent les signaux de la table 3.26.

3.6.2 Performances du méta-modèle en régime AC

En utilisant la même méthode de paramétrage du modèle en mode AC que pour un arc en mode DC, il est possible d'obtenir des résultats de simulation très proches de la réalité. On présente ici, dans un premier temps, des résultats de simulation pour deux types d'arcs : à faible constante de temps avec déphasage, à forte constante de temps avec déphasage ainsi qu'à faible courant. Dans un second temps, un comparatif global est réalisé pour les quatre types sous forme d'un tableau récapitulatif.

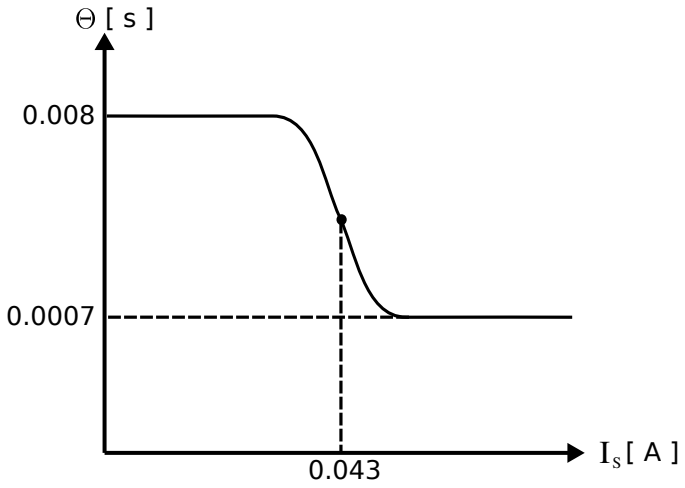


FIG. 3.27 – Évolution de la constante de temps en fonction du courant.

Simulation à faible constante de temps d'arc

La simulation est obtenue pour un circuit série avec une charge inductive et résistive. Dans le cas d'arc à faible constante de temps, la partie dynamique du modèle peut se résumer à une simple force contre électromotrice. Cette approximation est largement suffisante dans la plus part des cas d'arc. Elle introduit un écart de simulation négligeable sur les valeurs réelles de tension et de courant lors de l'extinction de l'arc. Les courbes de la figure 3.28 montrent les résultats de simulation du méta-modèle paramétré par rapport aux mesures expérimentales.

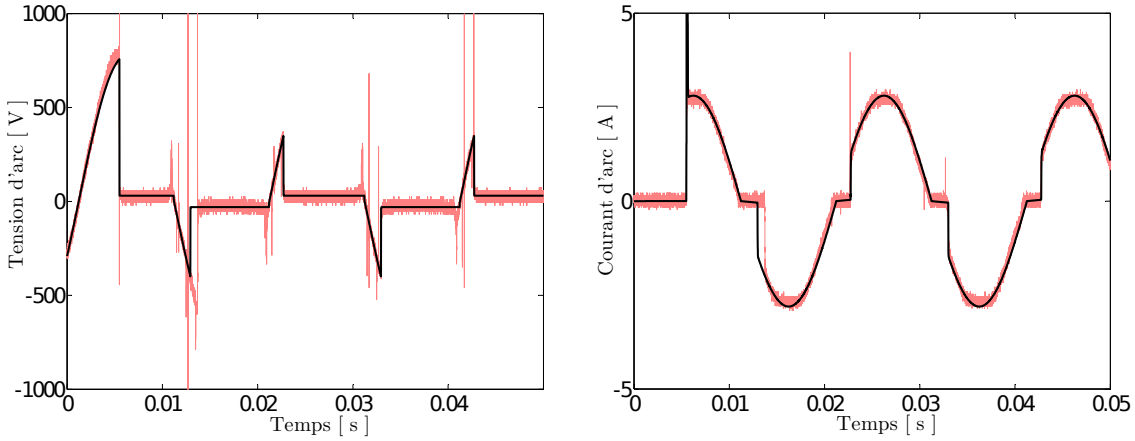


FIG. 3.28 – Mesures et simulation de courant d'arc (à gauche) et de tension d'arc (à droite). En rouge : la mesure expérimentale, en continu long : le modèle proposé.

On peut noter sur ces deux courbes figure 3.28 que les signaux obtenus par simulation diffèrent quelque peu lors du premier ré-amorçage négatif à $t = 12ms$. Cette différence n'est pas une erreur de simulation, mais elle exprime le fait que le seuil de ré-amorçage I^- n'est pas identique pour le premier ré-amorçage. En effet, pour les autres ré-amorçages à $t = [22ms, 32ms, 42ms]$ les valeurs des seuils sont constantes. Ici, la simulation prend en compte uniquement des seuils constants. Nous avons donc choisi précisément ces enregistrements expérimentaux car ils permettent de mettre en avant le phénomène. Il est évidemment possible d'ajouter une loi sur les seuils de ré-amorçage I^+ et I^- pour les rendre variables afin d'améliorer encore les résultats de simulation.

Simulation à forte constante de temps d'arc

La simulation d'arc à forte constante de temps n'est prise en compte dans aucun modèle d'arc en régime AC. Elle est prise en compte uniquement par les modèles de types Mayr-Cassie en régime DC. L'intérêt novateur du méta-modèle est de permettre une simulation des modèles à forte constante de temps aussi bien en régime AC que DC.

La simulation est effectuée dans un circuit série, en utilisant la loi d'évolution de Θ décrite en figure 3.27.

Les courbes de la figure 3.29 mettent en avant une comparaison entre les signaux obtenus expérimentalement et par simulation.

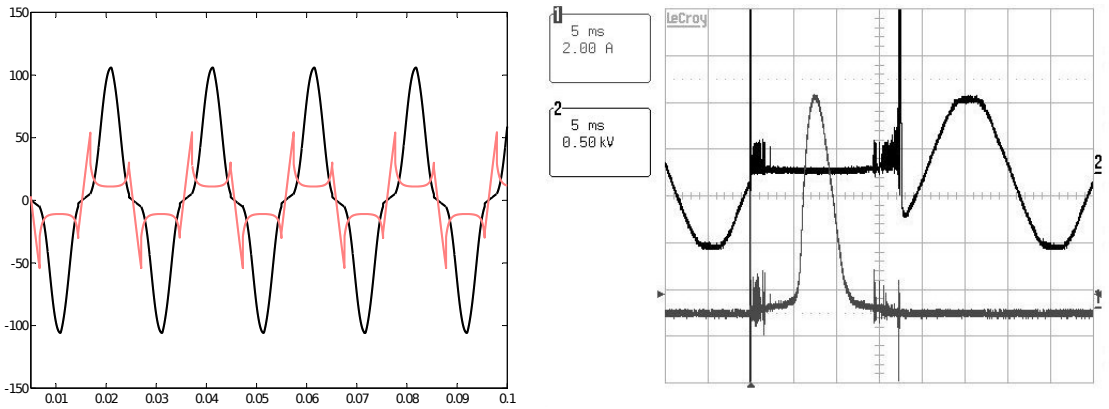


FIG. 3.29 – Simulation de courant et de tension d'arc (gauche). Mesures expérimentales (à droite).

Sur les relevés expérimentaux de la figure 3.29, seule l'alternance positive existe. La durée de l'alternance du courant est plus grande que la période du signal du générateur donc l'arc ne se réamorce pas durant l'alternance négative. La constante de temps d'arc étant importante, après l'extinction de l'arc, le seuil de transition I^- ne peut plus être franchi car la tension du générateur est trop faible. Le déphasage introduit entre la tension du générateur et le courant d'arc est tel que ces signaux se retrouvent en opposition de phase. L'arc ne peut pas se réamorcer. Ce phénomène est pris en compte par notre méta-modèle.

Ne possédant pour l'instant qu'une seule géométrie d'électrodes avec une constante de temps élevée, nous ne disposons pas d'enregistrements de signaux d'arc à forte constante de temps qui se réamorcent.

La simulation présentée figure 3.29 est quelque peu différente. La constante de temps est élevée mais malgré tout suffisamment faible pour que le ré-amorçage puisse s'opérer.

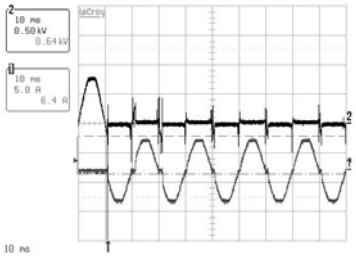
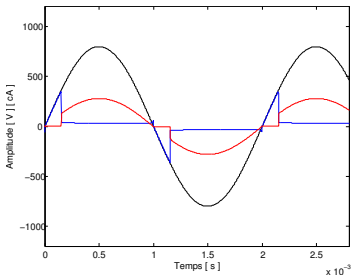
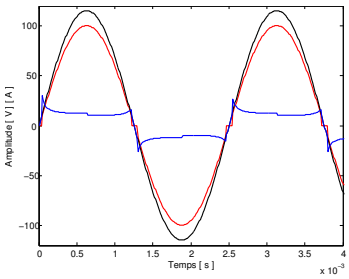
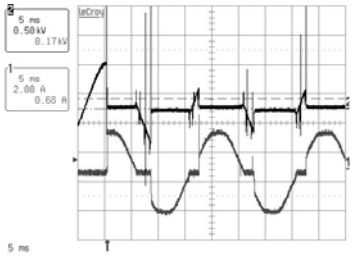
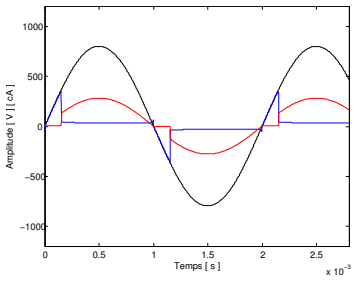
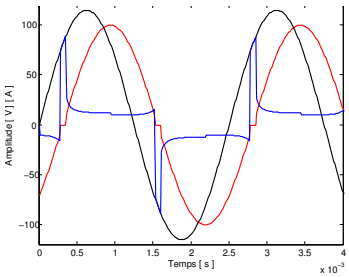
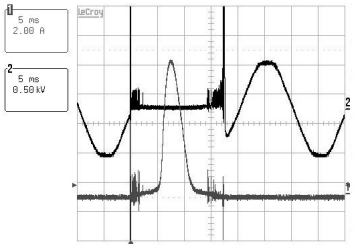
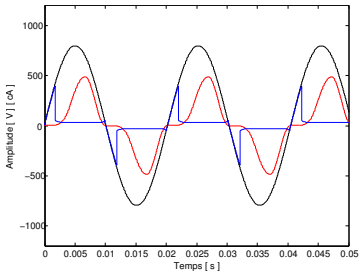
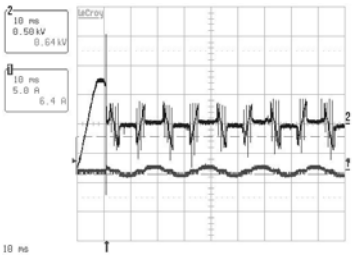
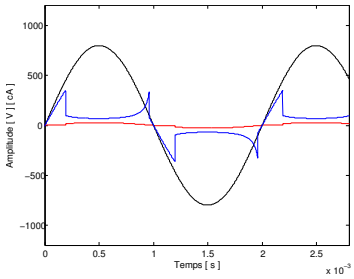
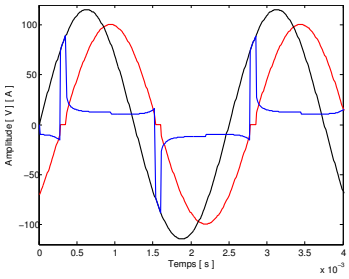
Signaux d'arc et caractéristique dynamique

Le tableau 3.9 compare les résultats expérimentaux et ceux obtenus par simulation avec notre modèle et le modèle d'Ayrton étendu. Ce dernier constitue le plus performant des modèles disponibles dans la littérature. Nous constatons que les résultats de simulations de notre méta-modèle sont proches des résultats obtenus expérimentalement et reproduisent assez fidèlement les variations de tension et de courant de chaque type d'arc.

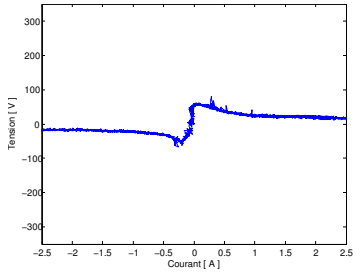
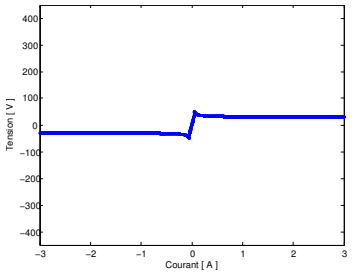
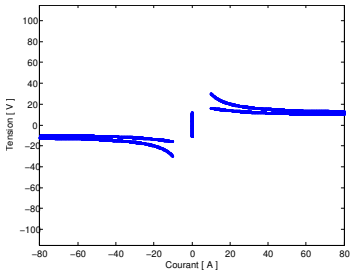
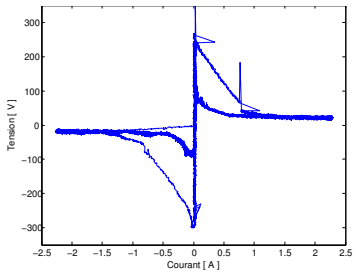
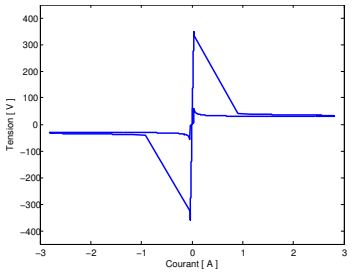
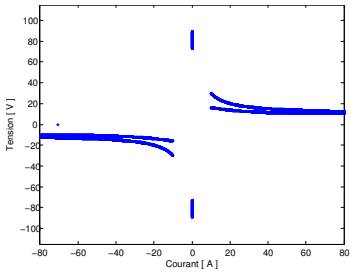
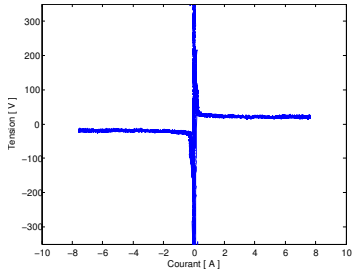
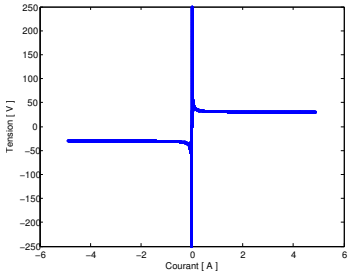
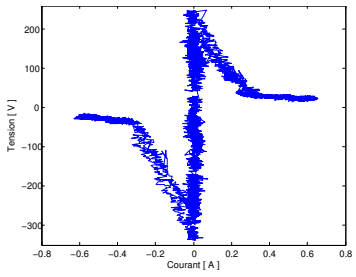
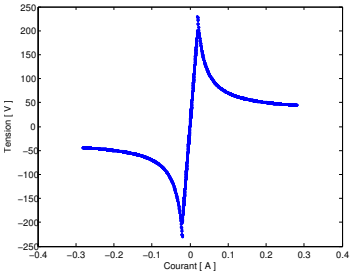
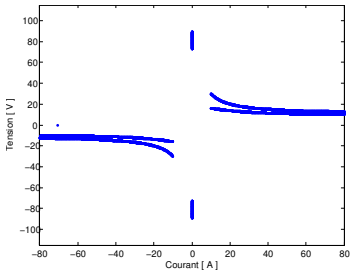
Le modèle d'Ayrton étendu quant à lui permet d'obtenir des résultats conformes à la réalité excepté au passage à zéro du courant. De plus ce modèle ne permet pas de simuler les arcs de type 3.

La comparaison des résultats peut également se faire en traçant les caractéristiques dynamiques de chaque type d'arc. La table 3.10 présente les caractéristiques tension-courant obtenues dans les

différents cas. Ces tracés mettent en évidence les imperfections du modèle d'Ayrton étendu liées à la non prise en compte de l'aspect temporel de la décharge. Notre modèle prend en compte cette dimension représentée par la constante de temps d'arc. On constate que les résultats obtenus avec notre méta-modèle sont en très bonne concordance avec les mesures expérimentales.

Allures	Modèle proposé	Ayrton étendu
 Type 1		
 Type 2		
 Type 3		Impossible
 Type 4		

Tab. 3.9 – Tableau comparatif des formes de courant et de tension.

Caractéristiques	Modèle proposé	Ayrton étendu
 Type 1		
 Type 2		
 Type 3		Impossible
 Type 4		

TAB. 3.10 – Tableau comparatif des caractéristiques dynamiques obtenues expérimentalement et en simulation.

Simulation avancée

Le méta-modèle développé sous Matlab et permet de simuler plusieurs phénomènes supplémentaires tels que le non ré-amorçage ou les décharges HF [SZ10]. Les décharges HF sont des décharges secondaires qui se produisent au moment du passage à zéro du courant. Elles introduisent un bruit important sur les signaux de courant et de tension. La figure 3.30 suivante montre la simulations de ces deux phénomènes.

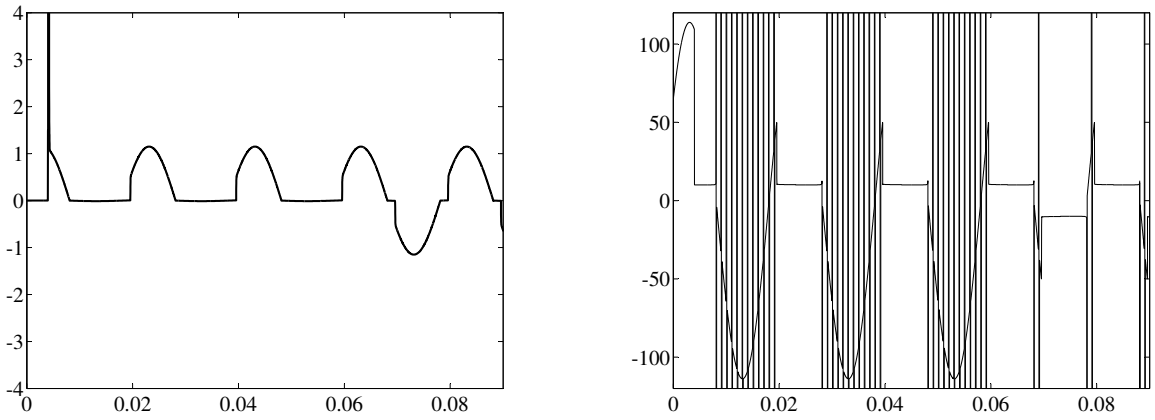


FIG. 3.30 – Simulations de la tension et du courant d'arc prenant en compte le non ré-amorçage et les décharges HF.

Le modèle a été paramétré à partir des enregistrements de la figure 3.31 mais pour une tension de 115V.

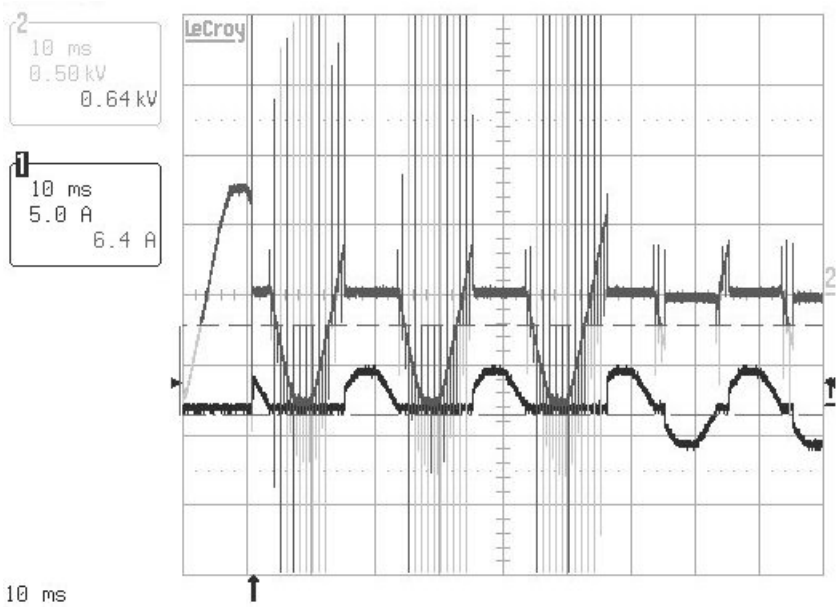


FIG. 3.31 – Mesure de la tension et du courant d'arc avec décharge HF et non ré-amorçage.

Dans l'exemple ci-après, le méta-modèle est utilisé pour simuler un arc provoqué à l'ouverture d'un circuit alimenté avec une batterie de 12V. L'arc est produit avec le test des plots vibrants (détaillé chapitre suivant) sans charge, ce qui revient à court-circuiter la batterie. La tension est

mesurée aux bornes de cette dernière. La figure 3.32 montre les mesures de courant et de tension obtenus à l'issu du test. On observe que la tension chute de 12 à 0 V à l'instant ou les contacts du plots vibrant se touchent. Le contact étant fermé, la résistance de contact augmente à mesure que la température augmente. Ce qui explique pourquoi, la tension augmente proportionnellement. Puis le contact est ouvert, l'arc s'amorce et la tension d'arc vaut environ 15V. La longueur d'arc augmente continuellement durant l'ouverture et l'arc s'éteint à partir d'une certaine longueur. Le courant chute progressivement et s'annule.

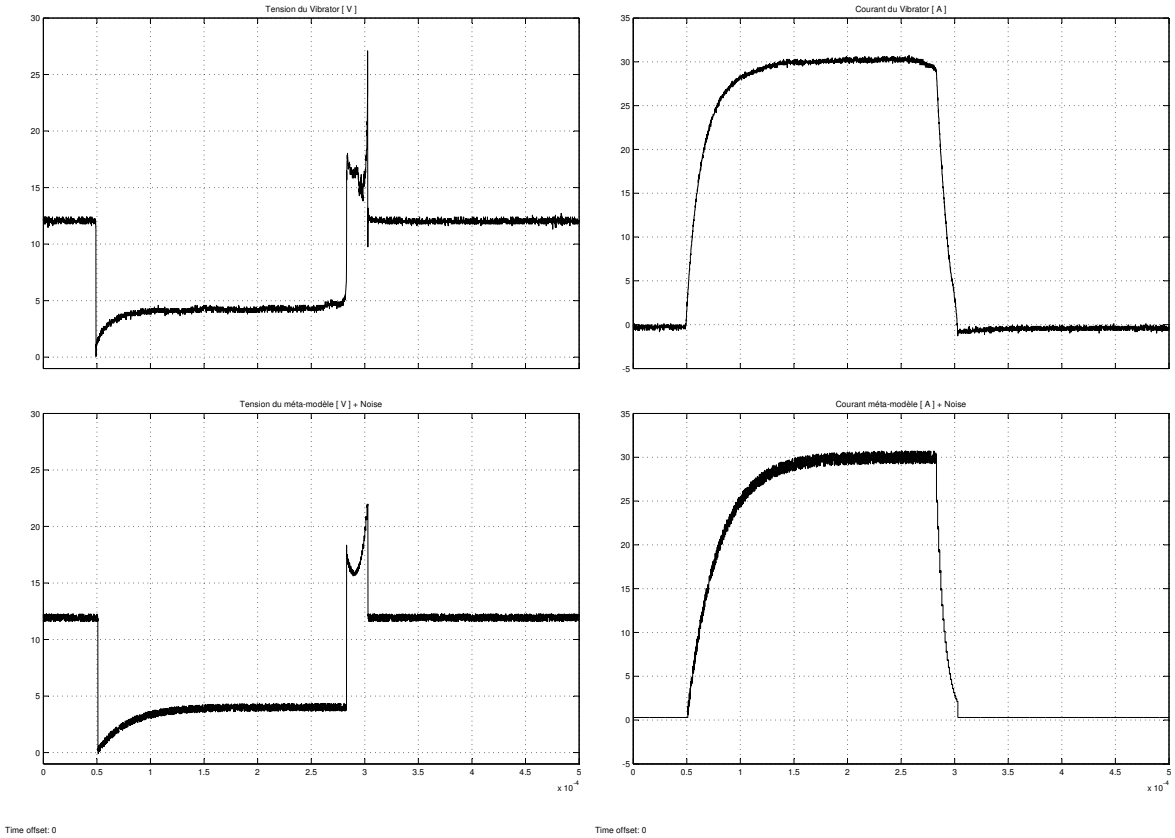


FIG. 3.32 – Tension d'arc et courant du test des plots vibrants (courbes supérieures) confrontés aux résultats de simulations du méta-modèle (courbes inférieures).

Les simulations sont réalisées en ajoutant un bruit blanc uniforme afin d'être au plus proche de la réalité. On constate sur les courbes de la figure 3.32 qu'il existe cependant une différence entre les signaux de tension aux instants [0.27 ms ; 0.32 ms]. Durant cet interval, la tension d'arc augmente à mesure que les contacts s'écartent. La loi de la tension d'offset d'arc V_0 est simulée de manière linéaire, mais en réalité, la tension d'arc évolue différemment, car il y a projection de matière. Ce qui explique pourquoi, la tension d'arc présente des sauts aléatoire de tension. Il aurait été facile de simuler ces sauts aléatoire en configurant une tension V_0 contenant des variations aléatoires. Cependant, nous ne le faisons pas ici pour pouvoir mettre ce phénomène en avant.

Chapitre 4

Génération de défauts d'arc

4.1 Introduction

L'arc électrique est la base de nombreuses innovations et procédés industriels. Il est utilisé pour la fusion , la soudure [CB10] et la découpe du métal, pour l'éclairage, pour le traitement des surfaces, ainsi que pour le dépôt de matière [JMR05]. Récemment, une nouvelle application dans le domaine de la dé-pollution est apparue [JMR05] ; à la fois pour la dé-pollution de l'air mais aussi des eaux usées ou des monuments. Il existe également des applications plus originales comme les « bobines Tesla » [LL].
Pour l'application aux défauts d'arc il existe principalement deux normes qui définissent un certains nombres de tests. Ce sont l'AS5692 qui concerne la domaine de l'aéronautique et l'UL1699 pour l'habitat [JW03]. Dans un premier temps nous proposons un résumé succin des principes d'amorçage décrits par ces normes tout en dégageant les aspects qui nous ont conduit à imaginer un autre principe d'amorçage de défaut d'arc.
Dans un deuxième temps, nous présentons la démarche expérimentale qui a permis l'élaboration d'un Générateur de Défaut d'Arc Reproductibles et Calibrés appelé GDARC.

4.1.1 Problématique générale

Objectifs

Un système de protection contre les défauts d'arc doit être capable de détecter la présence d'un arc et d'estimer sa dangerosité par comparaison avec la courbe de disjonction imposée pour garantir la sécurité. Afin de tester ce type de détecteur, il faut disposer d'un banc expérimental permettant :

- de produire les quatre grands types d'arcs (présentés chapitre 3),
- d'assurer la reproductibilité des caractéristiques d'un arc calibré,
- de régler l'amplitude et la persistance des arcs,
- de tester tout type d'électrodes entre lesquelles l'arc se produit.

dans le but :

- de déterminer un modèle d'arc pour la caractérisation et le développement des disjoncteurs
- d'améliorer la compréhension des phénomènes engendrés par l'arc mais également des phénomènes qui influencent l'arc.

Grandeurs à mesurer

Comme il a été observé précédemment dans le premier chapitre, il n'est pas envisageable d'effectuer les tests usuels pour des problèmes de reproductibilité. Il convient donc d'établir une liste exhaustive complète des principes physiques de l'arc et des grandeurs associées mesurables, susceptibles d'avoir une influence sur son comportement. Dans cette optique, il faut impérativement reproduire les conditions expérimentales liées à l'application demandée. Dans ce cas, les contraintes environnementales sont sévères :

- une variation importante de la température : -65 à +165 degrés Celsius,
- une pression atmosphérique variant de 0.4 Atm à 1 Atm. Ce qui correspond à une variation d'altitude de 0 à 15 Km.
- la présence dans l'atmosphère d'eau, de sels, de poussières.

Les paramètres du circuit sont également importants car ils conditionnent le comportement de l'arc. Par exemple, si un circuit possède une forte capacité, alors un arc peut être maintenu après coupure de l'alimentation. De même, la puissance d'un arc ne peut excéder celle du circuit au sein duquel il apparait.

Les principales grandeurs peuvent être extraites par des mesures de la tension et du courant parcourant le circuit. Ces grandeurs sont :

- la tension du générateur utilisé,
- l'impédance de sortie du générateur,
- la charge du circuit,
- la tension et le courant d'arc.

Enfin, les paramètres liés aux matériaux et à la géométrie des composants sont :

- le type d'électrodes utilisées (câbles, pointes...),
- la distance entre les électrodes,
- le matériau (conducteurs et isolants) composant l'électrodes.

4.1.2 Méthodes d'amorçage couramment employées

Amorçage par ouverture ou fermeture de contact

Amorçage par ouverture : L'amorçage par contact est le moyen le plus simple et le plus rapide à mettre en œuvre lorsque l'on souhaite produire un arc [BCR98][E08]. Ce procédé est largement utilisé dans l'industrie notamment pour la soudure à l'arc. Le principe repose sur l'ouverture d'un circuit électrique à l'aide d'un système mécanique composé de deux contacts. Initialement les contacts se touchent et un courant important circule dans le circuit. Lorsque l'on sépare les contacts la circulation du courant est maintenue temporairement par une décharge électrique qui s'amorce dans l'espace inter-électrodes. La figure 4.1 ci dessous représente les deux contacts. Le cercle plein symbolise la décharge d'arc.

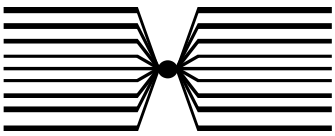


FIG. 4.1 – Lignes de courants à travers deux contacts après amorçage d'un arc.

A l'instant précédant la séparation, la totalité du courant passe d'une électrode à l'autre à travers la surface de contact. A la séparation, cette surface est suffisamment réduite pour être considérée comme ponctuelle. La densité de courant et la résistance R au point de contact augmente considérablement. Ce qui conduit à une augmentation significative de la température en ce point. Le metal constituant les électrodes est ainsi porté à ébullition et il se forme un « pont fondu » entre les deux électrodes. La décharge s'effectue dans ce pont qui est composé à la fois des gaz issus du milieu environnant et de vapeur métallique.
Après l'amorçage, si la distance inter-électrode continue d'augmenter, l'arc s'étire alors entre les électrodes dans les même proportions. A partir d'une distance critique, l'arc s'éteint.
Les sectionneurs, disjoncteurs et coupes-circuits, possèdent un mécanisme qui permet d'éteindre l'arc plus rapidement (par soufflage par exemple). Ce principe d'amorçage est également utilisé dans les postes à souder que l'on trouve dans le commerce. Dans ce cas, on ne cherche pas à étendre la distance inter-électrodes pour stopper l'arc, mais on maintient une faible distance afin que l'arc ne s'éteigne pas durant la soudure. L'anode fournit le métal d'apport qui s'évapore sur la cathode constituant la pièce à souder. L'anode est mobile afin de conserver la distance inter-électrode constante à mesure que le métal s'évapore vers la cathode.

Test de la guillotine : Comme son nom l'indique, le test de la guillotine est inspiré de la célèbre invention du Dr Guillotin [G08]. Il consiste à placer deux câbles côte à côte sous la lame d'une guillotine. Cette lame doit être conductrice et, lorsque qu'elle sectionne l'isolant des deux câbles, elle provoque un arc électrique. Cette manipulation est représentée figure 4.2, elle présente les tests réalisés par [JW03].

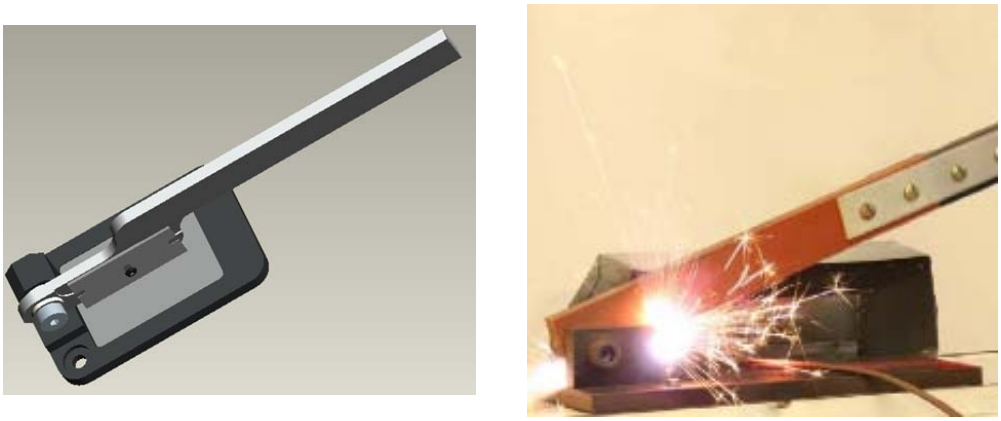


FIG. 4.2 – Arc provoqué par une guillotine. Photographie extraite de [JW03].

On peut constater sur ces photographies que, lors de l'amorçage, l'arc s'accompagne d'étincelles, c'est à dire de projection de matières incandescentes. Par conséquent, le phénomène d'arc est difficilement observable car d'autres phénomènes le masque. Même si en pratique l'arc s'accompagne souvent d'étincelles, il n'est pas souhaitable d'étudier les deux phénomènes simultanément car les indicateurs d'un arc pourraient être confondus avec celui d'une étincelle. Les deux phénomènes doivent donc être étudiés séparément. En toute rigueur, une étude approfondie de la production d'étincelle devrait être effectuée. Une projection d'étincelle correspond à un allongement de l'arc (augmentation de sa longueur) puisqu'il y a une perte de matière. La tension d'arc, qui dépend de cet allongement, ne peut donc être éstimée et la mesure n'est pas reproductible. Cela implique, que le courant d'arc, qui dépend de la tension d'arc, ne peut être calibré à l'avance.

Le type d'arc provoqué par la guillotine est un arc parallèle dans lequel peut circuler un courant intense. En effet, la charge avale étant court-circuitée, l'intensité du courant d'arc est seulement limitée par la résistance interne du générateur, qui est généralement très faible.
Cependant, même à faible courant, l'arc est accompagné d'une pyrolyse de l'isolant. Ce phénomène est pratiquement inévitable quelque soit la méthode utilisée pour produire l'arc.

Un autre inconvénient du test de la guillotine est que si un disjoncteur thermique est placé dans le circuit, il se déclenchera inévitablement à cause des courants mis en jeux. L'arc est vu ici comme un court-circuit. Un bon moyen de s'en convaincre est de provoquer un court-circuit sur une installation domestique à l'aide de deux câbles dénudés. Cette manipulation n'est ni plus ni moins qu'un test de la guillotine, mais sans la lame intermédiaire. On constate qu'aucun arc ni étincelle ne sont produits et que le disjoncteur à rempli sa fonction. En revanche, si l'on réalise cette expérience sans disjoncteur, avec une batterie 12V l'arc et les étincelles apparaissent. On constate la forte influence des conditions de test et surtout du disjoncteur dans le circuit. Certains types d'arc et principalement ceux de faible intensité ne sont pas détectés par un disjoncteur classique. Le test

de la guillotine n'est pas adapté pour ce type d'arc car les courants sont inévitablement importants.

D'un point de vue électrique, le test de la guillotine doit être réalisé avec une alimentation capable de fournir des pointes de courant 8 à 10 fois plus élevés (au plus) que le courant nominal du disjoncteur. Si le courant d'arc excède cette valeur, alors on augmente la longueur des câbles afin d'ajuster la charge représentée par les câbles. En pratique, pour éviter les risques d'accident, la durée d'un arc provoqué par le test de la guillotine ne doit pas dépasser 1 seconde.

Plots vibrants : Le test des plots vibrants doit impérativement être effectué avec une charge en série ; le montage de ce test est résumé figure 4.3. Il utilise une table vibrante sur laquelle sont placés des plots de fixations électriques desserrées.

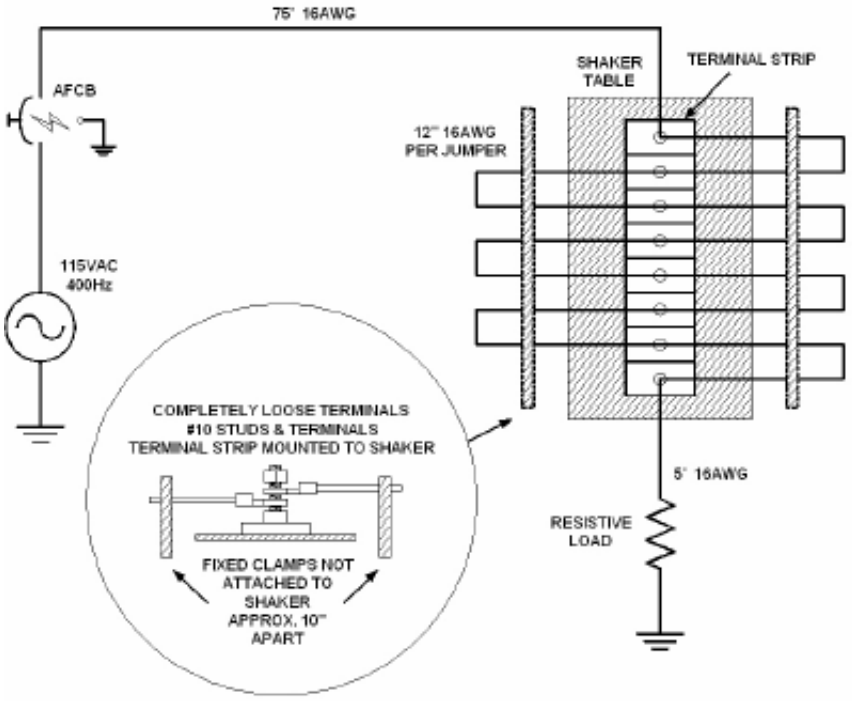


FIG. 4.3 – Montage et circuit électrique du test des plots vibrants. Figure extraite de l'AS5692.

Le principe d'amorçage utilisé est le principe d'amorçage à l'ouverture d'un circuit : un courant est établi à travers un ou plusieurs plots, la vibration de la table provoque des ouvertures aléatoires des contacts. Lors de l'ouverture d'un contact, un arc se forme. Des exemples de réalisation du support de plot vibrant est donné figure 4.4.

Le désavantage de cette méthode est le caractère aléatoire de l'amorçage. Il n'est pas possible de reproduire le test pour obtenir des enregistrements de signaux d'arc. La caractérisation par cette méthode des phénomènes d'arcs est donc difficile voire impossible à réaliser. Néanmoins, ce test reste valable pour l'évaluation des performances d'un disjoncteur d'arc, mais uniquement pour vérifier les temps de déclenchement puisque aucun paramètre d'arc n'est configurable.

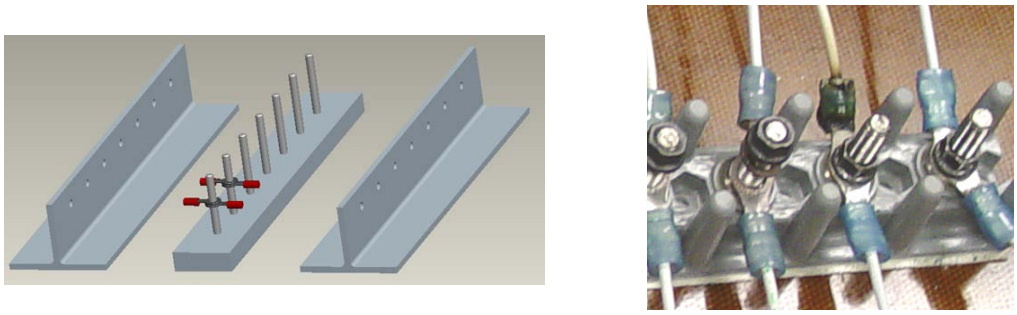


FIG. 4.4 – Test des plots vibrants. Figure extraite de l'AS5692.

Amorçage par « lancing tape » ou test du chemin humide

Dans ce test particulier, l'arc est amorcé en introduisant de l'eau salée entre deux conducteurs électriques. Pour ce faire, une entaille est faite entre les deux conducteurs puis un système à fil poreux non conducteur est utilisé pour acheminer l'eau salée. L'eau atteint les deux conducteurs par capillarité.

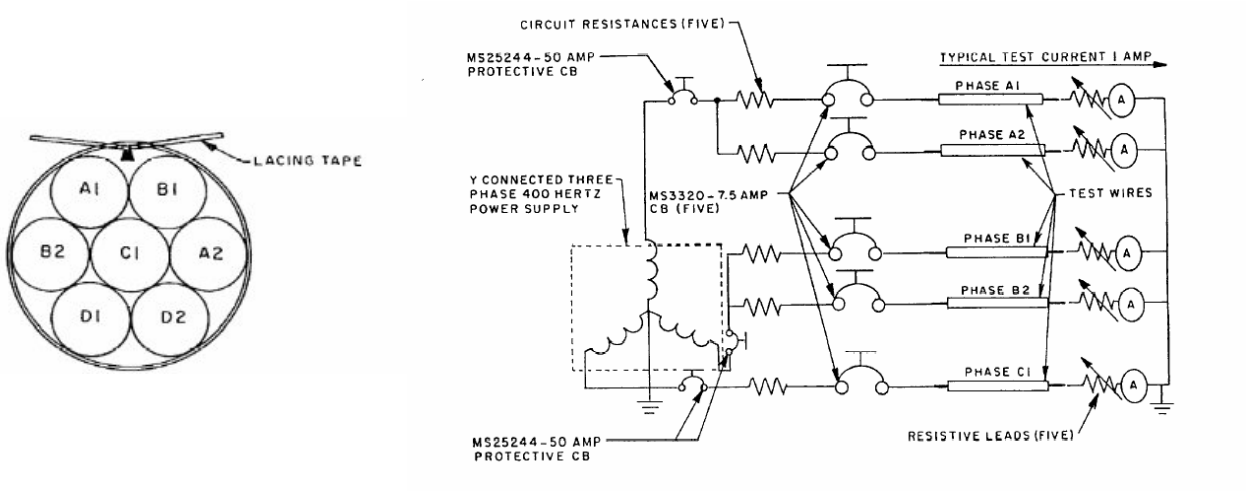


FIG. 4.5 – Test du chemin humide. A, B et C sont les 3 phases du système. Figures extraites de l'AS5692

Lorsque que l'eau se retrouve en contact avec les deux conducteurs, un courant se crée entre ceux ci. Par élévation de température, l'eau s'évapore pour laisser la place à l'arc électrique. Le test proposé par la société Sensata présenté en figure 4.5 montre l'expérience réalisée avec un système triphasé. On constate que lorsque les conditions d'arc ne sont plus respectées pour une phase, alors celui-ci peut se réamorcer avec une autre phase.

Ce test possède les mêmes désavantages que les tests présentés précédemment : il n'est pas reproductible. Comme pour les autres tests, il ne peut être utilisé pour la caractérisation des signaux de courant et de tension d'arc.

Amorçage par chemin carbonisé

Ce test consiste à créer un chemin carbonisé conducteur entre les isolants de deux câbles appartenant à un faisceau. Lorsque le chemin carbonisé est créé, le faisceau contenant les deux câbles est connecté à une alimentation de type secteur et à une charge purement résistive variable. Lorsque l'alimentation est mise sous tension le chemin carbonisé provoque une fuite de courant entre les deux câbles et un échauffement du chemin carbonisé. Ce dernier disparait par vaporisation ou par combustion à mesure que le courant augmente. Un arc se forme donc entre les deux câbles à l'emplacement du chemin carbonisé.
Pour créer le chemin carbonisé, une haute tension comprise entre 2kV et 15kV est utilisée pour préparer le câble : premièrement, deux entailles sont réalisées dans les isolants des câbles.
Deuxièmement, une haute tension est appliquée jusqu'à ce que le chemin carbonisé se forme entre les câbles à l'endroit des entailles. Une fois le chemin carbonisé formé, sa résistance est mesurée et le câble est prêt pour le test.
Encore une fois, ce test ne permet pas de réaliser des expérimentations reproductibles. Et comme les autres tests, le courant et la tension d'arc ne peuvent être calibrés.

4.1.3 Amorçage par surtension

Le principe d'amorçage par surtension consiste à créer une tension suffisamment élevée pour rompre la rigidité de l'isolant. La tension à franchir est appelée tension de claquage.
Les gaz sont généralement de bons isolants et la seule application d'une différence de potentiel aux bornes de deux électrodes placées dans l'air et espacées d'une distance d ne suffit pas à amorcer un arc. Dans l'air la tension de claquage est élevée et dépend de la distance inter-électrodes d. La rigidité du diélectrique de l'air est approximée à 30kV/cm pour une pression de un atmosphère.
La loi de Paschen donne la relation entre la tension de claquage V_c du diélectrique et le produit de la distance inter-électrode d avec la pression atmosphérique p :

$$V_c = f(pd) \tag{4.1}$$

Cette loi dépend du gaz ou du mélange gazeux dans lequel la décharge survient. Dans le cadre du développement de disjoncteur pour l'habitat, la question de la pression atmosphérique ne se pose pas, puisque, pour une altitude fixe est basse, la pression peut être considérée comme constante. Dans ce cas la tension de claquage est souvent approximée à 30kV/cm.
Pour le domaine de l'aéronautique, l'altitude devient un facteur important. La pression atmosphérique diminue lorsque l'altitude augmente. Par conséquent, la tension de claquage varie. La figure 4.6 donne la valeur de la tension de claquage en fonction du produit pd pour de l'air.

On remarque que cette courbe possède un minimum inférieur à 1000 V/cm pour une pression de 0.2 mmHg correspondant à une altitude d'environ 150 000 pieds. Ainsi, une surtension transitoire de l'ordre de 1000 V/cm survenant dans un circuit est susceptible d'engendrer un arc électrique.
La tension de ré-amorçage (ou restrike voltage) est la tension minimale à franchir pour que l'arc se réamorce après une première apparition. En effet, lorsqu'un arc a déjà été amorcé, des espèces chimiques ionisées nouvelles et des charges partielles sont présentes dans le milieu. Cela a pour effet de réduire la résistance électrique inter-électrodes. Ainsi la tension à franchir pour réamorcer un arc diminue significativement. Par exemple à 1 atmosphère, (c'est-à-dire au sol) elle est de l'ordre de 400 V/mm pour des électrodes de tungstène. Cette tension de ré-amorçage est également dépendante de la pression atmosphérique. La principale conséquence est que, pour une gamme de pression donnée, un arc peut-être entretenu avec une faible tension (telle que la tension de 115V utilisée en avionique) quelque soit la méthode d'amorçage.

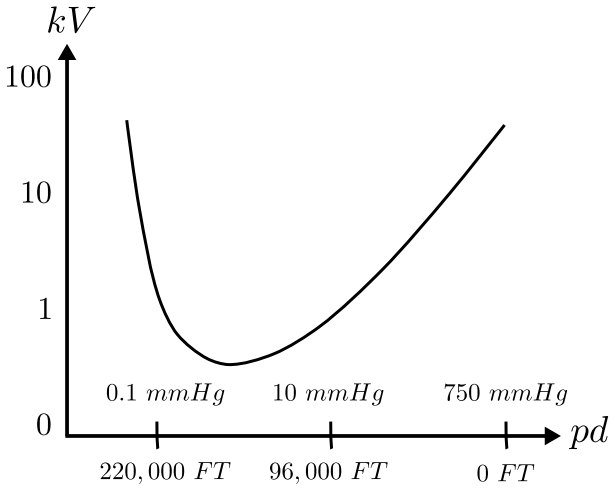


FIG. 4.6 – Evolution de la tension de claquage en fonction du produit pd. Ici la distance d est fixée à 1 cm. Les électrodes utilisées sont sphériques et de diamètre 1 cm.

La difficulté majeure pour le dimensionnement de systèmes d'amorçage par surtension réside dans la capacité du système à supporter les hautes tensions. Par ailleurs, le système doit également supporter des puissances de fonctionnement importantes. En effet, lorsqu'une haute tension est produite, un courant de faible valeur suffit pour dissiper une puissance élevée. Par exemple, sous 10000 volts avec 0.1 ampère, la puissance dissipée et de 1 kilowatt. Les critères : puissance et haute tension, ont une incidence directe sur les dimensions des composants. Ces derniers sont généralement volumineux.

Principe d'amorçage retenu

Nous avons retenu le principe d'amorçage par surtension pour réaliser un générateur d'arcs. Les raisons de ce choix sont les suivantes :

- le principe purement électrique n'est pas tributaire d'un mécanisme au comportement aléatoire,
- il est possible d'entretenir un arc grâce au générateur qui alimente la ligne,
- il devient ainsi possible de calibrer les arcs en tension et en courant en fonction de la charge,
- les électrodes restant fixes, l'étude de l'influence de la géométrie, du matériau, de la nature de l'isolant est possible,
- l'arc peut être produit dans une enceinte hermétique dans laquelle l'atmosphère est parfaitement contrôlée,
- la reproductibilité est assurée car tous les paramètres liés à l'arc sont configurables et constant entre deux expérimentations successives.

4.2 GDARC

4.2.1 Présentation du GDARC

Vue d'ensemble - objectifs



FIG. 4.7 – Photographie du banc de génération d'arc réalisé au laboratoire.

Les objectifs du banc de test sont les suivants :
- fournir une série de données caractéristiques de la nature de l'arc,
- choisir et paramétrer un modèle,
- tester un disjoncteur d'arc.

L'étude des différents principes d'amorçage et des standards proposés pour la génération d'arc électrique montre qu'ils ne permettent pas la caractérisation d'un défaut d'arc, ni l'extraction des indicateurs nécessaires à leur détection. Ils sont principalement utilisés pour le test des disjoncteurs et ne permettent pas d'atteindre les objectifs cités précédemment. On remarque également qu'il n'existe pas de protocoles de test pour la caractérisation des défauts d'arc ni d'enregistrements standards de défaut d'arc. Il s'avère donc nécessaire de définir un système d'amorçage pour caractériser les signaux d'arc électrique et élaborer des protocoles de test.
La réalisation d'un banc de génération de défauts d'arc est loin d'être triviale, car, si la problématique est relativement simple, les enjeux techniques sont de taille. En effet, la conception de systèmes électroniques aux puissances demandées par l'application est délicate. Ainsi de nombreuses solutions ont été envisagées et testées pour aboutir à un système opérationnel dont l'efficacité réside dans la simplicité du concept utilisé pour générer un défaut d'arc. Ce système permet de reproduire les conditions expérimentales et permet de générer un arc reproductible et calibré.

Afin de réaliser des tests qui prennent en compte les différentes conditions et paramètres cités, on construit un système composé de trois éléments principaux schématisés figure 4.8.

L'électronique de puissance

le système électronique contient quatre parties :
- un circuit de puissance,
- un circuit de puissance d'amorçage de l'arc est son électronique de contrôle,
- un circuit de mesures : oscilloscope, sondes de mesures,
- un circuit de contrôle de la cuve.

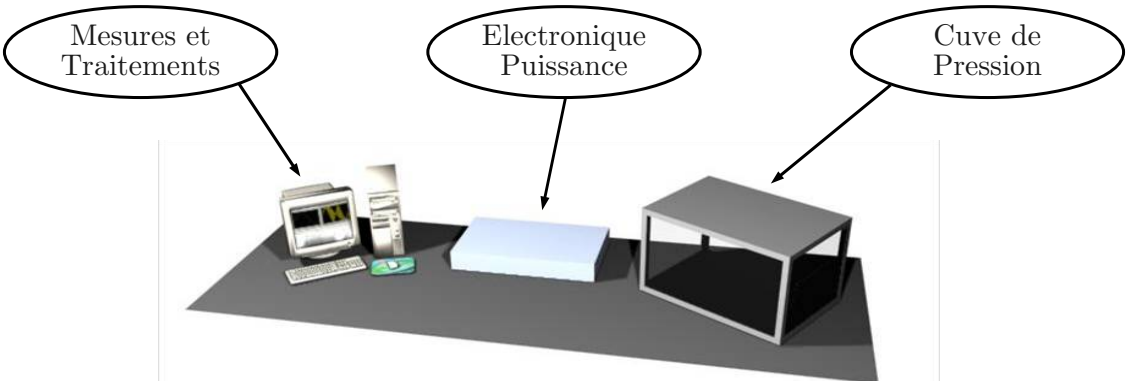


FIG. 4.8 – Composition du banc de test.

Cuve de pression

La cuve contient le système mécanique qui supporte les électrodes. Ce système mécanique motorisé permet de faire varier la distance entre les électrodes. Il accepte tous type d'électrodes.
La pression de la cuve est contrôlable et permet de reproduire la gamme de pression observée en aéronautique. La température ainsi que le taux d'humidité sont également contrôlables.

Mesures et traitements

Les mesures sont collectées à l'aide d'un oscilloscope connecté à un ordinateur. Ce dernier est équipé de Matlab qui permet de réaliser directement un traitement sur les données.

4.2.2 Principe d'amorçage du GDARC

Le principe du générateur repose sur la méthode d'amorçage par surtension. Il consiste à superposer un pic de haute tension transitoire sur la tension d'une ligne. Si la tension du pic est suffisamment élevée, un arc peut être créé et maintenu sur la ligne. Ce principe est résumé en figure 4.9. Si les conditions d'arc ne sont pas réunies, une simple surtension apparaît sur la ligne (figure 4.9 a). En revanche, si les conditions sont réunies (par exemple, lorsqu'il existe des conducteurs non isolés suffisamment proches), un arc est créé et maintenu sur la ligne figure 4.9 (b).

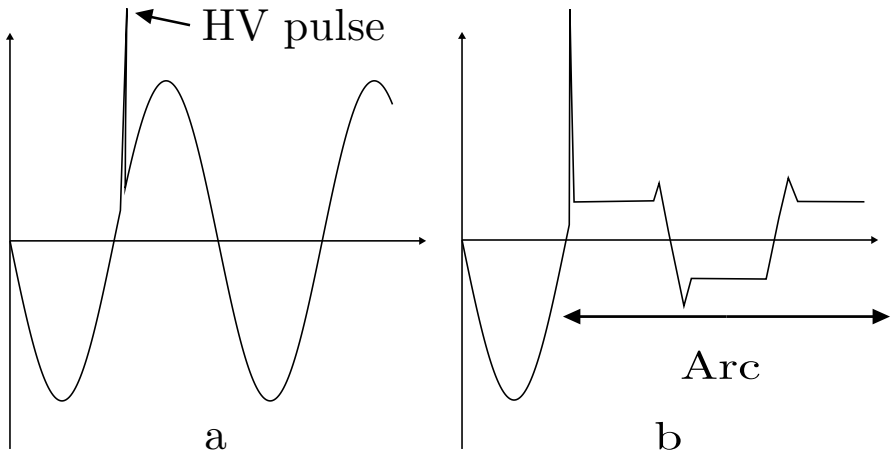


FIG. 4.9 – Surtension (HV pulse) créée sur une ligne.

Principe de fonctionnement d'un tube fluorescent

Comme indiqué dans le chapitre précédant, les tests couramment utilisés ne permettent pas de réaliser des mesures reproductibles ou du moins très difficilement.
Les décharges qui sont utilisées dans les tubes néons sont des décharge luminescentes. Elles précèdent le régime d'arc. Elles sont parfaitement reproductibles et calibrées [TVDDG07]. Nous nous sommes posé la question suivante : le principe pour amorcer ce type de décharges est-il applicable pour des arcs dans l'air ?
Le principe du générateur s'inspire donc du fonctionnement d'un tube néon que l'on peut trouver dans le commerce. Ce tube à décharge, faussement appelé néon, contient un mélange d'argon et de mercure sous forme gazeuse confiné entre deux électrodes à l'aide d'un cylindre creux en verre. Cette forme gazeuse est maintenue par la faible pression à l'intérieur du tube. Cette association des paramètres pression-gaz permet d'amorcer une décharge sur une distance importante (par exemple, plus d'un mètre pour un tube du commerce) avec une tension d'amorçage faible (environ 5000 V pour ce même tube).
Une telle configuration permet de minimiser le circuit électronique assurant le fonctionnement du tube. Ce circuit illustré figure 4.10 se compose :

- d'une tension d'alimentation : par exemple le secteur,
- d'un ballast : principalement une bobine,
- d'un starter : circuit commutatif d'amorçage,
- d'un tube « néon ».

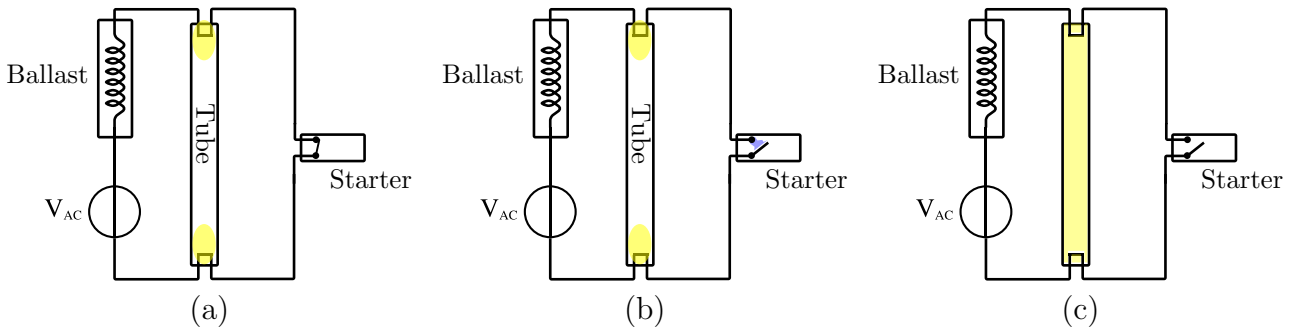


FIG. 4.10 – Amorçage d'une décharge électrique dans un tube « néon » .

Lorsque le système est connecté à l'alimentation, le courant circule à travers le ballast et provoque un échauffement aux bornes du tube « néon » fig 4.10 (a). Le starter est alors fermé. Par effet thermique lié à la conception du starter, ce dernier s'ouvre et coupe la circulation du courant. Grâce à l'effet inductif produit par le ballast, une surtension de l'ordre de 5000 Volts apparait aux bornes de ce dernier et donc aux bornes du tube néon (figure 4.10 b). La tension de claquage du gaz contenu dans le néon étant également de 5000 V, une décharge s'amorce : le néon s'allume (figu re 4.10 c). Après l'amorçage, le néon est maintenu allumé par la tension de 230 V du secteur. Il est donc possible d'entretenir une décharge sans nécessairement maintenir une haute tension. Dans ce principe, la haute tension de 5000 V est un phénomène transitoire uniquement utilisé pour amorcer la décharge.

Test des « clous »

Afin de déterminer si le principe utilisé pour les tubes néons est applicable pour l'amorçage des arcs dans l'air nous réalisons le test dit « des clous » . Le circuit du tube néon est repris à l'identique

avec les mêmes composants comme le montre la photographie de la figure 4.11.

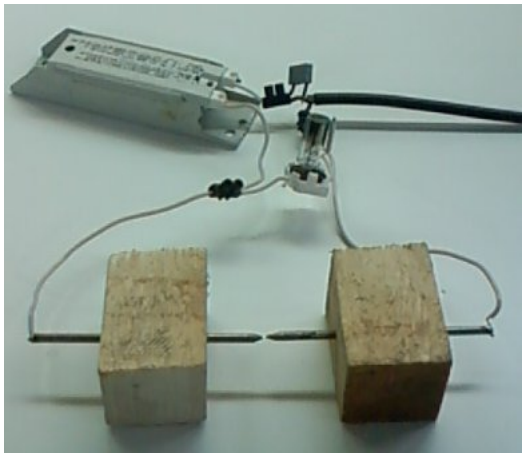


FIG. 4.11 – Illustration du test des clous.

Ce test doit-être réalisé avec les précautions d'usage et notamment à l'aide de gants isolants. Dans cette expérience, le tube néon est remplacé par un système composé de deux clous conducteurs insérés dans deux morceaux de bois faisant office d'isolant. Comme le circuit utilisé est le même, la haute tension transitoire de 5000 V se retrouve aux bornes des clous. En considérant que l'air devient conducteur à partir d'une tension de claquage 30 kV/cm, pour amorcer l'arc à 5000 V il convient donc d'espacer les électrodes d'environ 1 mm. Lorsque le circuit est connecté au secteur un arc apparait entre les deux électrodes. Cet arc n'est pas maintenu.
Ce simple test permet d'observer que :

- d'une part le système de disjonction ne se déclenche pas lorsque l'arc apparait. Ceci est du à la charge inductive que constitue le ballast,
- d'autre part, l'arc peut-être amorcé dans l'air par ce principe. Il peut-être maintenu si les conditions de charge sont réunies.

Dans le cas présent, le ballast utilisé comme charge est conçu pour une décharge dans une atmosphère contrôlée mais pas pour l'air (la charge possède une valeur d'inductance trop élevée et une résistance trop importante).

On peut également noter que le ballast réalise deux fonctions :

- production de la surtension à l'origine de l'amorçage
- charge permettant de réguler la décharge

Cependant on remarque que pour une tension de 5000 V on ne peut créer des arcs que pour une distance inférieure à 1 mm. Afin d'augmenter cette distance, il faut être en mesure de créer des tensions supérieures à plusieurs dizaines de milliers de volts.
Avec le montage utilisé dans le test des clous, l'utilisation de la bobine L du ballast n'est pas un choix judicieux. En effet, il faut faire circuler un courant $i(t)$ important avant l'ouverture du circuit pour créer une surtension élevée qui obéit à la loi $V = Ldi(t)/dt$.
Par ailleurs, le système de commutation utilisé pour créer la surtension (le starter) est dimensionné spécialement pour l'application des tubes néon. Il faut donc utiliser un autre système de commutation. Le simple relais est exclu puisque dans ce cas l'arc se formerait entre ses contacts. La difficulté technique consiste donc à élaborer un montage qui réalise les fonctions assurées par ballast et le starter.

Le schéma du dispositif proposé est représenté sur la figure 4.12. Il est constitué d'un transformateur élévateur de tension (a), d'un transistor de puissance (b) avec son circuit de commande (c) et d'un générateur de tension (V_G). Ce montage produit un arc entre les électrodes (d) placées aux bornes du bobinage secondaire.

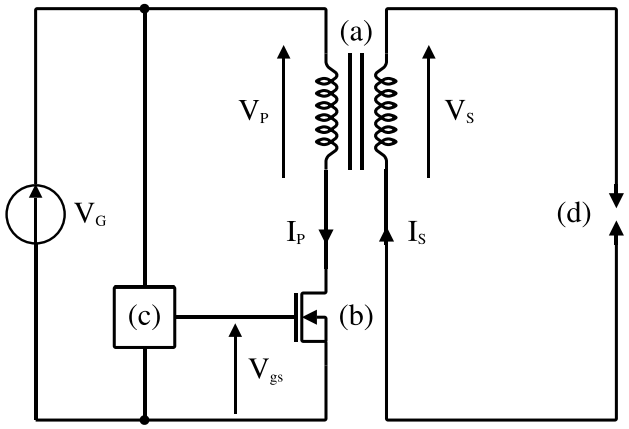


FIG. 4.12 – Système d'amorçage par surtension.

La figure 4.13 présente les signaux électriques du montage en fonctionnement. Dans un premier temps, la bobine primaire du transformateur est chargée par l'alimentation V_G : le transistor conduit progressivement le courant I_p dans la bobine primaire jusqu'à atteindre une valeur maximale acceptable pour le transistor. Puis le transistor, agissant en interrupteur, coupe rapidement le circuit faisant passer le courant I_p de la valeur maximale à zéro. Cette coupure rapide entraine l'apparition d'une haute tension aux bornes de la bobine primaire du transformateur : $V_p = L_p \cdot dI_p/dt$. La bobine secondaire est câblée de manière à élever et inverser la tension V_p.

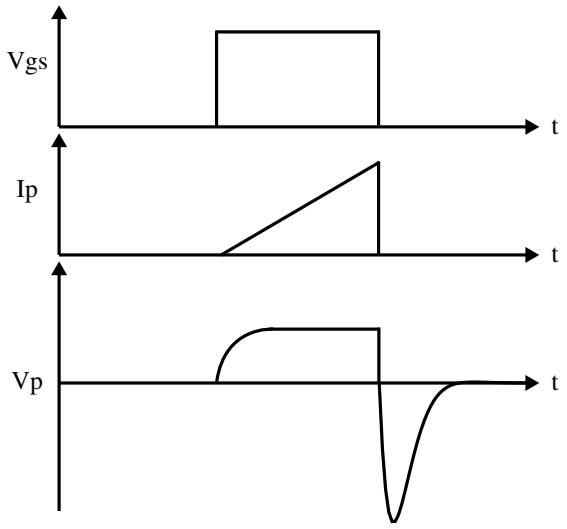


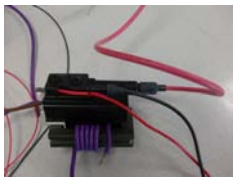
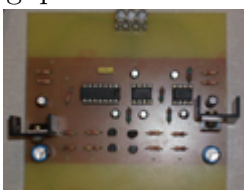
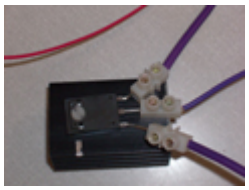
FIG. 4.13 – Signaux électriques du circuit d'amorçage.

Si la tension aux bornes des électrodes est supérieure à la tension de claquage, un arc s'amorçe. Comme le circuit secondaire ne comportant pas de source d'alimentation propre, l'arc s'éteint lorsque l'énergie électrocinétique de la bobine secondaire est dissipée. En choisissant une fréquence de réamorçage suffisamment rapide, il est possible de conserver l'arc dans une phase de pseudo maintien. Cet état doit cependant être différentié de l'arc entretenu qui s'affranchit de tout système de redéclenchement mais qui nécessite une source d'alimentation secondaire.

Le système seul est dit « à vide » car il ne prend pas en compte, ni la tension de ligne, ni la charge du circuit. Il remplace seulement le starter et le ballast d'un montage typique de tube fluorescent.

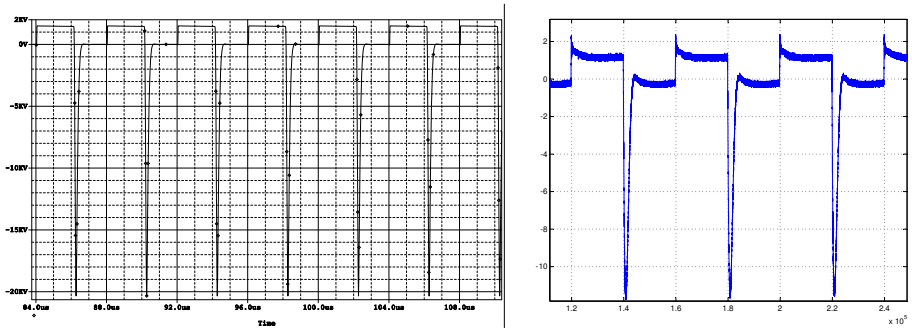
Première réalisation

Le montage de la figure 4.12 est simulé sous SPICE. Les résultats de simulation sont confrontés à ceux mesurés sur le montage expérimental. Ce dernier est composé avec les éléments décrits dans la table suivante :

Générateur V_G	THT	Logique de commande	Transistor MOS
			

Tab. 4.1 – Elements du circuit d'amorçage.

Le transformateur THT est un transformateur flyback haute tension du commerce utilisé dans les téléviseurs à tube cathodique. Il délivre une tension de sortie de 22000 volts.
Les tensions de sortie du transformateur simulées et mesurées sont représentées en figure 4.14.



Simulation SPICE Mesures expérimentales

Fig. 4.14 – Tension de sortie V_S aux bornes de la bobine secondaire L_S.

A l'instant d'ouverture du circuit primaire, une tension impulsionelle négative de 14000 V apparait en sortie. La tension V_S s'annule ensuite. En alternant les phases d'ouverture et de fermeture du transistor, la tension V_S prend la forme périodique décrite en figure 4.14. Si les électrodes sont suffisamment proches, un arc se forme.
La figure 4.15 présente un arc généré avec le montage proposé. Le premier support d'électrode est réalisé en plexiglass et permet de modifier la longueur de l'arc manuellement. Des électrodes pointues de différentes géométries peuvent être utilisées. Il est possible d'associer en série un élément ou

composant particulier. L'arc de la figure 4.15 est créé entre une électrodes d'acier et l'anode d'une diode électroluminescente qui fait office de deuxième électrode.

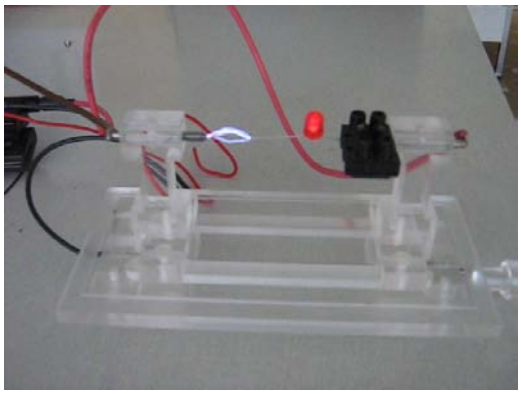


FIG. 4.15 – Arc généré à vide avec un transformateur flyback.

Circuit d'amorçage universel

Pour réaliser la superposition du pic sur une ligne, on utilise le schéma énoncé figure 4.12 que l'on complète en plaçant la ligne ainsi que la charge en série avec la bobine secondaire du transformateur. Le circuit résultant est donné en figure 4.16

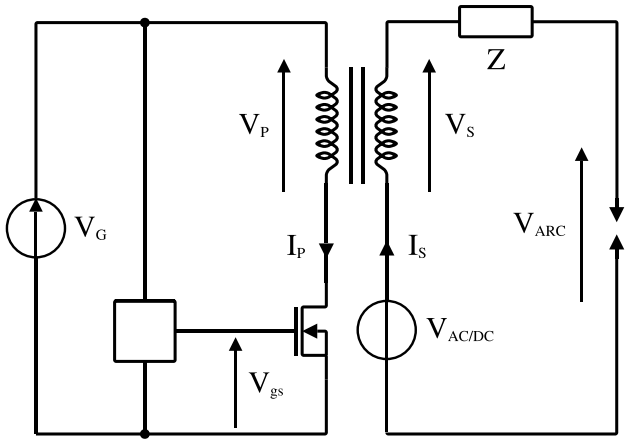


FIG. 4.16 – Circuit électrique du générateur.

La tension de ligne est représentée par la source $V_{AC/DC}$. Le secondaire du transformateur est placé en série avec la charge Z et les électrodes. Les électrodes peuvent également être placées avant la charge.
La configuration du circuit secondaire permet de réaliser des arcs en série avec tout type de charges en AC ou en DC. Lorsque la surtension est produite aux bornes de la bobine secondaire, aucun courant ne circule en l'absence d'arc. Ainsi la haute tension se retrouve aux bornes des électrodes. Si la distance inter-électrodes est suffisamment faible, un arc s'amorce et le courant circule dans le circuit secondaire.
Après l'amorçage, l'influence du circuit primaire sur le circuit secondaire est négligeable puisque le

transistor bloqué interdit la circulation du courant dans le circuit primaire. Donc, dans cette phase, seul le circuit secondaire est à considérer. La bobine secondaire devient une simple charge inductive supplémentaire placée en série avec l'arc. Pour dimensionner le transformateur, il faut minimiser la valeur de l'inductance de la bobine secondaire autant que possible afin de réduire son influence sur l'allure du courant et de la tension d'arc.
L'entretien des arcs est assuré par un générateur DC ou AC inséré dans le circuit secondaire. Durant le fonctionnement en charge, ce générateur doit pouvoir produire et entretenir des arcs sur la ligne secondaire en charge. Suivant l'association série ou parallèle de l'arc par rapport à la charge, nous obtenons les deux configurations décrites en figure 4.17.

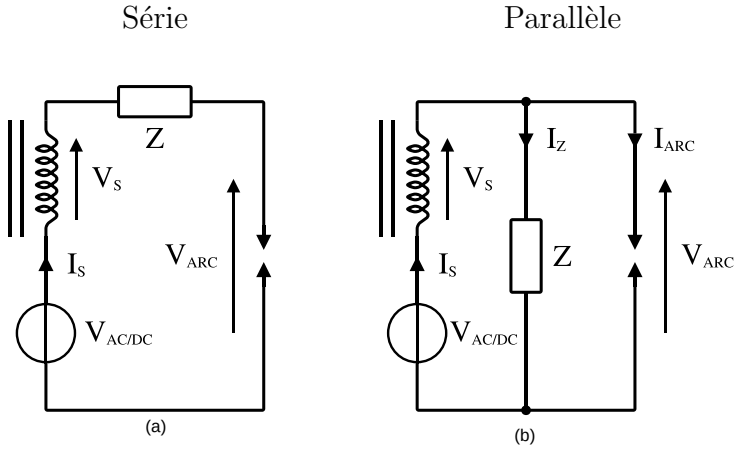


FIG. 4.17 – Configurations du circuit secondaire.

4.2.3 Composants du GDARC

Transistor de commutation

Le transistor MOSFET de commutation est choisi afin de supporter des tensions de plusieurs milliers de volts. Notre choix s'est arrêté sur un transistor MOS de puissance de la marque Ixys (IXFN24N100). Ce transistor est également capable de supporter la puissance nécessaire pour la création de la surtension sur la bobine primaire. Il est monté sur un radiateur et peut-être associé à un second transistor au cas ou la puissance demandée serait supérieure. Le montage des transistors est donné en figure 4.18.

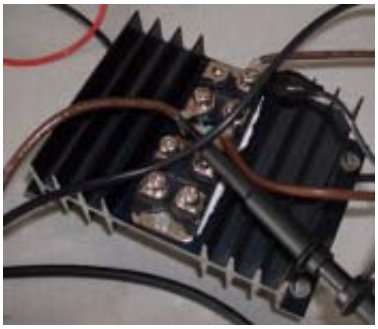


FIG. 4.18 – Le Transistor MOS de commutation et son radiateur.

Comme le transistor possède une capacité de grille importante, un montage push-pull à transistor bipolaire est utilisé pour commander la tension de grille.

Transformateur

Lors de la première phase de conception du transformateur, l'accent a été mis sur le rapport de transformation. Le premier transformateur réalisé présente un rapport de transformation de 100 et supporte au secondaire un courant continu de 20 A (figure 4.19). En provoquant une surtension

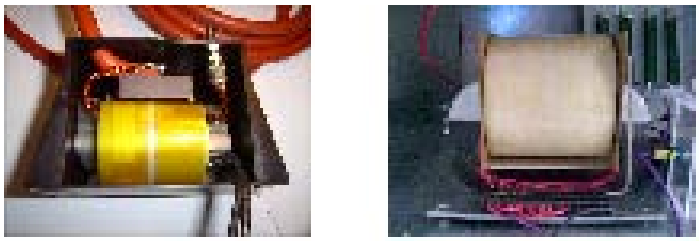


FIG. 4.19 – Transformateur.

de 1000 V sur le primaire, on obtient une surtension de 100 kV sur le secondaire ce qui permet de produire des arcs de grande longueur (typiquement supérieure à deux centimètres).
L'inconvénient majeur de ce transformateur est qu'il possède une inductance au secondaire trop élevée. Cette dernière n'est plus négligeable lorsque le circuit secondaire est en charge. Pour un arc AC, la valeur élevée de l'inductance secondaire introduit un déphasage important entre la tension d'alimentation secondaire et le courant d'arc. En conséquence, l'arc ne peut pas être maintenu sur la ligne.
Afin de résoudre ce problème, nous avons conçu un second transformateur en essayant de conserver le rapport de transformation élevé tout en diminuant la valeur de l'inductance secondaire. Pour cela nous avons réduit le nombre de spires à 1 au primaire. Le rapport de transformation atteint 75. Cependant comme la bobine primaire n'est composée que d'une seule spire le courant qui la traverse devient important. Ainsi, il n'est pas possible de créer une surtension aussi importante qu'avec le premier transformateur sous peine de détruire le transistor de commutation. Ce nouveau transformateur permet d'amorcer des arcs et de les maintenir pour une distance inter-électrodes inférieure à 5 mm.
En pratique, nous utilisons les deux transformateurs. Le premier, pour produire les arc DC en vue d'évaluer la constante de temps d'arc et de tracer la caractéristique statique précisément. Le second est utilisé pour amorcer des arcs en AC. La valeur de l'inductance secondaire est suffisamment faible pour permettre l'amorçage des arcs, mais elle est aussi suffisamment élevée pour introduire un déphasage entre l'alimentation secondaire et le courant d'arc. Ceci permet de tracer la caractéristique dynamique de l'arc.

Contrôleur du circuit d'amorçage

Nous utilisons une carte spécifique basée sur un micro-contrôleur (figure 4.20) réalisée sur mesure et qui permet de générer différents signaux de commande du transistor MOSFET.



FIG. 4.20 – Photographie du contrôleur de circuit d'amorçage.

Le contrôleur permet de configurer la forme des signaux grâce à une table en mémoire et permet de régler le temps du signal d'amorçage. Le schéma de principe est résumé figure 4.21.

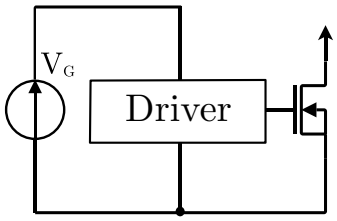


FIG. 4.21 – Contrôleur du circuit d'amorçage.

Le temps de maintien de l'arc est contrôlé à l'aide d'un relais de commande auxiliaire (figure 4.22). Cette fonctionnalité est particulièrement intéressante pour établir la courbe de disjonction d'un système de protection. Nous pouvons maintenir l'arc sur une durée pouvant atteindre plusieurs secondes. Le test des disjoncteurs peut être réalisé en faisant varier le courant, la tension, ou le temps de présence de l'arc.

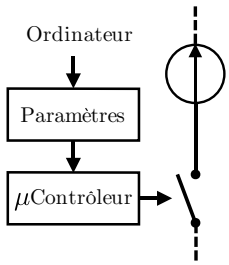
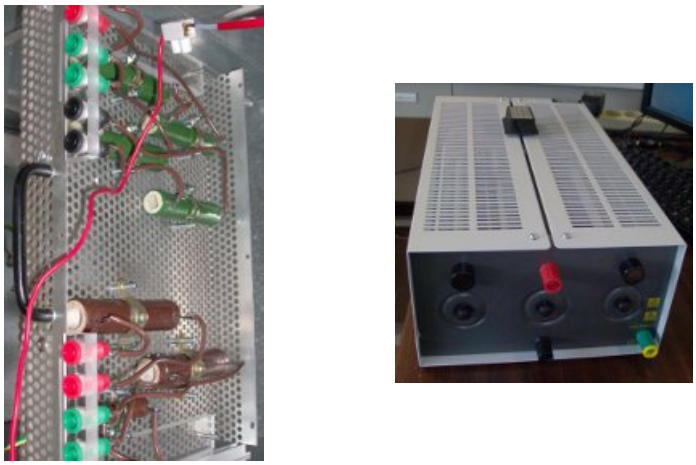


FIG. 4.22 – Système de contrôle de la durée de maintien.



(a) (b)

FIG. 4.23 – Charges résistives utilisées avec le GDARC.

Le contrôleur permet également de générer des signaux de commande pulsés à une fréquence programmable. Une interface à écran LCD ainsi qu'une connexion USB permettent la saisie des différents paramètres.

Charge

En faisant varier les charges utilisées et d'après le montage de la figure 4.17, il est possible d'effectuer un contrôle du courant d'arc et ainsi de reproduire des arcs calibrés en courant. Les charges utilisées en premier lieu sont résistives et varient de 60 ohms à 500 ohms (figure 4.23 a). Ce qui correspond à des courants d'arc compris entre 10 mA et 10A. Une charge résistive variable additionnelle peut être utilisée (figure 4.23 b). Elle permet de faire varier l'intensité de l'arc lorsque celui-ci est déjà amorcé.
Il est possible d'utiliser tout type de charges conformément aux configurations possibles du circuit secondaire. On peut ainsi rajouter des inductances série ou des capacités en parallèles. Des charges plus originales sont testées comme des lampes, des moteurs... En règle générale, le choix des charges utilisées pour le câblage du circuit secondaire n'est limité que par l'imagination.

Alimentations

L'alimentation du circuit primaire est confiée à une source linéaire délivrant 65 V sous 10 A. Le transformateur utilisé pour l'amorçage est composé d'un seul enroulement au circuit primaire. Cela signifie qu'au moment de la commutation du transistor, l'alimentation subit un appel de courant qui s'apparente à un court-circuit. La plupart des alimentations disponibles dans le commerce possèdent des systèmes de protection qui limitent cet appel de courant. Nous avons donc opté pour une alimentation capable de délivrer des courants de plusieurs dizaines d'ampères de manière transitoire sans qu'aucune protection ne se déclenche. Par ailleurs, l'alimentation doit pouvoir supporter une chute de tension importante liée à cet appel de courant.

Pour l'alimentation AC du circuit secondaire nous avons retenu le montage de la figure 4.24 qui est composé de deux transformateurs et un autotransformateur (type variac). Les trois transformateurs supportent une puissance de 1000 VA. Le premier transformateur est élévateur de tension et délivre une sortie de 400 V, le second délivre une sortie de 230 V tout comme l'autotransformateur. Comme indiqué sur la figure 4.24 la tension d'alimentation peut être choisie parmi trois sortie. En faisant varier la tension issue du variac on dispose d'une gamme de tension allant de 0 V à 860 V RMS.

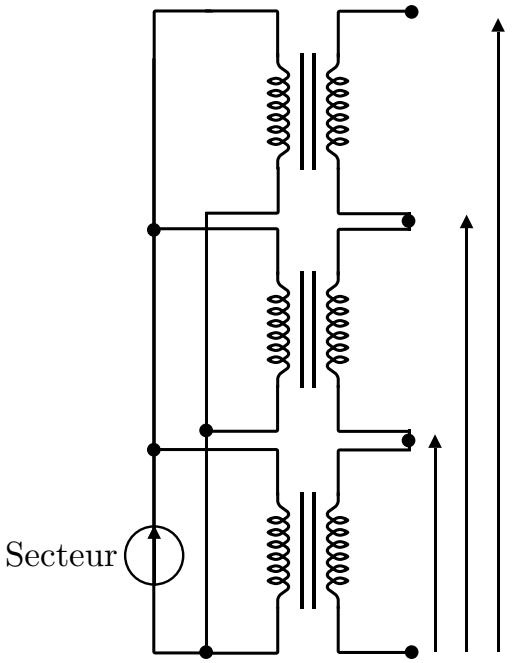


FIG. 4.24 – Schéma de l'alimentaion de ligne.

Pour l'alimentation DC, le schéma de la figure 4.24 est réutilisé mais on y adjoint en série un circuit de redressement à diodes présenté figure 4.25. Une simple capacité de forte valeur (1000 μF) est rajoutée en parallèle sur la sortie du pont à diode pour lisser la tension ainsi qu'une résistance pour décharger cette capacité lorsque le système est hors fonctionnement.

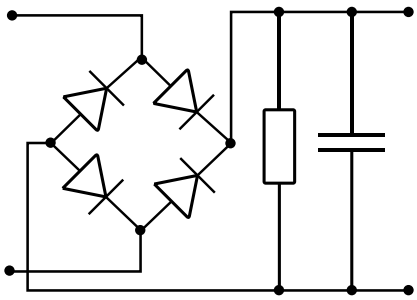


FIG. 4.25 – Circuit de redressement.

Mesures de tension et de courant

Cette partie du GDARC comprend l'ensemble des systèmes de mesures utilisés ainsi que la chaîne d'acquisition des données issues des mesures. Les grandeurs électriques mesurées sont :

- le courant d'alimentation,
- la tension d'alimentation,
- le courant d'arc,
- la tension d'arc.

Les grandeurs physiques mesurées sont :

- la pression atmosphérique,
- la température.

Deux sondes de mesures de la tension et du courant d'arc sont insérées dans le montage du GDARC. Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le tableau 4.2. Les sondes sont connectées à

Sonde de tension	Sonde de courant
Lecroy PPE 20kV	Lecroy AP015
100 MHz BW	DC 50 MHz
Max. Peak 20 kV	Max. Peak 50 A

TAB. 4.2 – Sondes de mesures.

un oscilloscope Lecroy WavePro 950 relié à un ordinateur via ethernet. L'acquisition des signaux est réalisée par l'oscilloscope et leur traitement est effectué avec MATLAB.

4.2.4 Partie mécanique du GDARC

Système mécanique général

Le premier système mécanique développé est inséré dans une boite de plexiglass présenté en figure 4.26.

Les électrodes sont fixées dans deux supports en verre traité capable de résister à des hautes

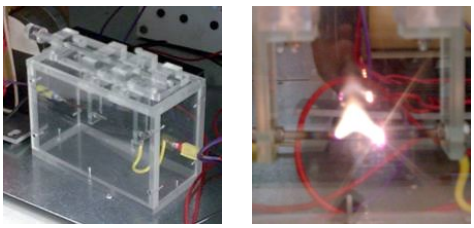


FIG. 4.26 – Premier système mécanique réalisé.

températures. Ainsi, les électrodes sont totalement isolées.

Ce système comporte un défaut majeur qui a été mis en avant par l'expérience : lorsque la température de l'arc devient importante, les parties en plexiglass peuvent s'enflammer. Comme la dissipation thermique de l'arc s'effectue par le haut, les pièces en plexiglass se situant au dessus des électrodes sont susceptibles de s'enflammer. C'est pourquoi, nous avons modifié le système mécanique afin de découvrir l'espace qui surplombe la décharge comme le montre la figure 4.27.

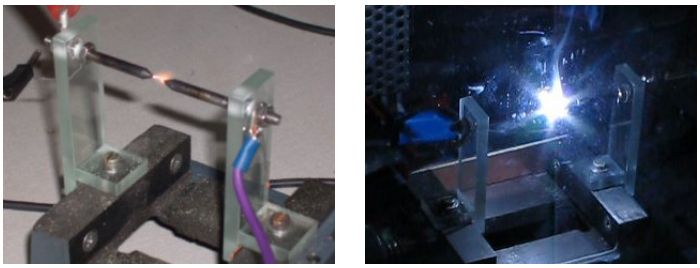


FIG. 4.27 – Second système mécanique réalisé.

Le nouveau système est réalisé avec les mêmes supports d'électrodes. Ces derniers sont fixés sur les mâchoires d'un étau que l'on peut se procurer dans le commerce.
L'inconvénient de cette méthode est que l'écart inter-électrodes s'ajuste manuellement à l'aide d'une vis sans fin et d'un jeu de cales de précision présenté figure en 4.28.



FIG. 4.28 – Jeu de cales de précision pour l'ajustement manuel de la distance inter-électrodes.

Enfin, un dernier système mécanique est développé. Dans celui-ci, nous utilisons un support mécanique motorisé muni d'une vis micrométrique qui permet d'ajuster la distance inter-électrodes précisément. Avec ce système, il est possible d'augmenter ou de diminuer la distance de l'arc après son amorçage. Le système est relié à un ordinateur via une interface RS232. Le logiciel fourni permet de programmer les profils d'accélération du mouvement des électrodes. Le système est placé à l'intérieur d'une enceinte hermétique en plexiglass (photographie de la figure 4.29) dans laquelle la pression et la température interne peuvent être contrôlées.



FIG. 4.29 – Dernier système mécanique développé.

Cuve de pression et pompe

La pression interne est contrôlable afin de reproduire les conditions atmosphériques rencontrées lors du vol d'un avion. L'extraction de l'air s'effectue au moyen d'une pompe à palette commandée en tout ou rien. Pendant le fonctionnement de la pompe, la pression est régulée à l'aide d'un orifice réglable. Le système mécanique supportant les électrodes est placé à l'intérieur de la cuve de pression comme illustré en figure 4.30.

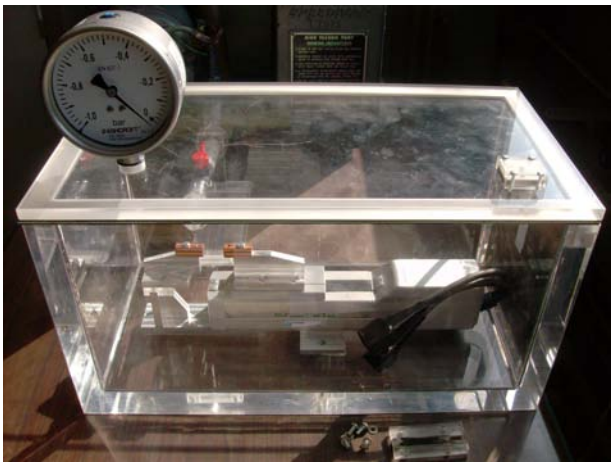


FIG. 4.30 – Enceinte hermétique à pression réglable.

Électrodes

Géométrie des électrodes

La géométrie des électrodes est un paramètre qui conditionne fortement les signaux d'arc. Par exemple, la tension de claquage du diélectrique se trouve indirectement diminuée lorsque les électrodes sont pointues. Ce phénomène est engendré par l'effet dit de pointes. En considérant une électrode sphérique de rayon R, sa charge électrique Q_r s'écrit :

$$Q_R = 4\pi\varepsilon_0 \times R \times V \tag{4.2}$$

Où V est la tension appliquée à l'électrode. La tension de l'électrode est donc égale à :

$$V = \frac{Q_R}{4\pi\varepsilon_0 R} \tag{4.3}$$

Si le champ électrique E est considéré uniforme nous avons :

$$V = \int E dR = E \times R \tag{4.4}$$

Ce qui permet d'écrire :

$$E_R = \frac{Q_R}{4\pi\varepsilon_0 R^2} \tag{4.5}$$

Cette dernière équation montre que le champ en surface de l'électrode croît très fortement à mesure que le rayon R s'affaiblit. Comme le champ électrique devient important, l'air autour de l'électrode est ionisé. Ceci a pour effet d'augmenter la conductivité de l'air localement à proximité de l'électrode,

et donc de diminuer de la tension de claquage du diélectrique. Un arc s'amorce donc plus facilement avec des électrodes pointues. De la même manière, la constante de temps d'arc qui correspond au temps nécessaire à l'arc pour atteindre son point de stabilité est également modifiée. La constante de temps diminue à mesure que l'effet de pointe est prononcé. Le figure 4.31 résume les deux types de géométrie utilisés pour les électrodes tandis que les deux photographies de la figure 4.32 les montre en fonctionnement.

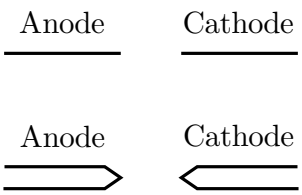


FIG. 4.31 – Géométries des électrodes utilisées.



FIG. 4.32 – Influence de la géométrie des électrodes utilisées.

Matériaux des électrodes

Le matériau conducteur utilisé pour la réalisation des électrodes conditionne également les signaux d'arcs. Une fois amorcé, l'arc se stabilise et sa tension devient constante. La valeur de cette tension d'arc dépend de la nature du matériau.
Le matériau influence également le type de rayonnement lumineux engendrée par l'arc. Par exemple, pour le tungstène, le rayonnement est de couleur bleue électrique alors que pour du cuivre la couleur dominante est verte. Le spectre harmonique du rayonnement de l'arc dépend également du gaz dans lequel la décharge électrique se produit.

Câbles

Il est possible d'utiliser directement des câbles électriques à la place des électrodes. En effectuant une entaille dans l'isolant, on favorise l'apparition du défaut d'arc. Sur la figure 4.33, deux câbles sont juxtaposés, puis deux entailles sont réalisées sur chacun des câbles. Ces entailles sont espacées d'une distance d. On utilise le GDARC pour amorcer l'arc par surtension entre les deux entailles. Il est important de faire remarquer que les entailles doivent être suffisamment éloignées afin que les parties conductrices ne soient pas en contact direct, car si cela était le cas, un court-circuit non souhaité apparaîtrait.

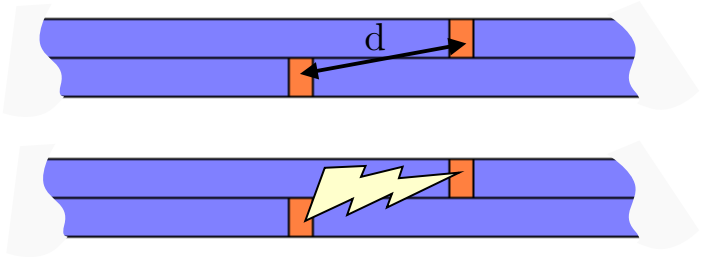


FIG. 4.33 – Méthode d'amorçage par surtension avec câbles électriques.

La figure 4.34, présente trois photographies qui illustrent l'expérience :

- La première montre les deux câbles entaillés avant la mise en route.
- La deuxième photographie montre le résultat lorsque l'arc est amorcé avec le GDARC. On observe l'apparition de flammes superposées à l'arc. Ces flammes sont causées par la combustion de l'isolant avec l'air ambiant. Ceci a pour effet de diminuer significativement la résistance de l'air par l'élévation de température produite et par la présence d'espèces chimiques supplémentaires dans le milieu.
- La troisième photographie montre l'état des câbles après extinction de la décharge. On constate qu'il se forme un chemin de carbone entre les deux entailles. Ce chemin constitue une résistance de faible valeur en série avec le générateur de ligne. Si le circuit est remis sous-tension, l'échauffement de cette résistance provoque le ré-amorçage de l'arc sans qu'une surtension soit nécessaire. Cette expérience démontre qu'il est possible de reproduire un test équivalent à celui du chemin carbonisé préconisé par l'UL1699.



FIG. 4.34 – Exemple d'utilisation du GDARC avec des câbles.

Enfin, il est également envisageable de réaliser ce test sans faire d'entailles. Il faut pour cela que la surtension provoquée soit d'une amplitude supérieure à la rigidité diélectrique des isolants utilisés. La plupart du temps, l'arc ne s'entretient pas dans ces conditions. La décharge se limite alors à une décharge corona comme le montre la photographie de la figure 4.35. Sur celle-ci, la décharge s'est amorcée entre le câble et la masse métallique du GDARC car c'est à ce point précis que la distance est la plus courte.

Il n'est cependant pas possible de déterminer à l'avance ou s'effectuera la décharge. C'est pourquoi une entaille assure le positionnement exact de la décharge sur le câble. La longueur d'arc, bien que peu précise, est connue à l'avance.



FIG. 4.35 – Décharge corona entre un câble et la masse.

4.3 Résultats Expérimentaux

4.3.1 Mesures à vide

Les mesures présentées ici sont réalisées avec le montage d'amorçage sans alimentation secondaire et sans charge. Le système génère une surtension aux bornes des électrodes qui sont placées directement sur les bornes de la bobine secondaire.
La figure 4.36 montre cette surtension V_s lorsqu'il y a absence (a) et présence (b) et (c) d'un arc. Les caractéristiques temporelles du courant et de la tension d'arc sont représentées en figure 4.37.

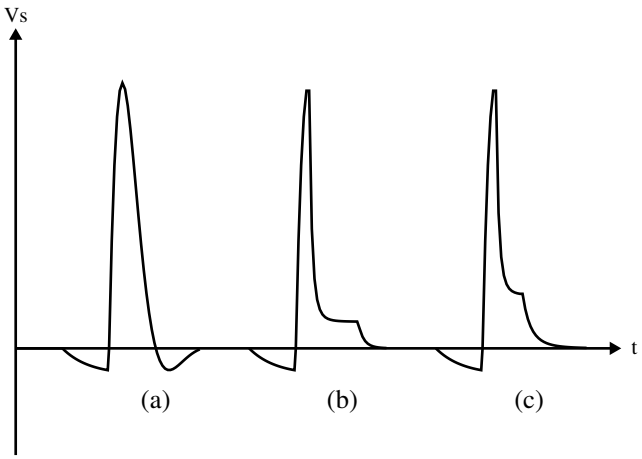


FIG. 4.36 – Signaux d'arc à vide.

L'arc est amorcé lorsque V_S atteint la tension de claquage V_c. V_s chute alors rapidement pour se stabiliser à une tension approximativement continue notée V_{arc}. Pendant la durée de l'arc (arc time) le courant I_s de la bobine secondaire décroit jusqu'à atteindre zéro. Lorsque le courant I_s s'annule, l'arc s'éteint. Si l'on écarte les électrodes, la tension d'arc augmente et le courant I_s décroit plus rapidement car la quantité d'énergie fournie est la même. L'arc s'éteindra donc plus rapidement.

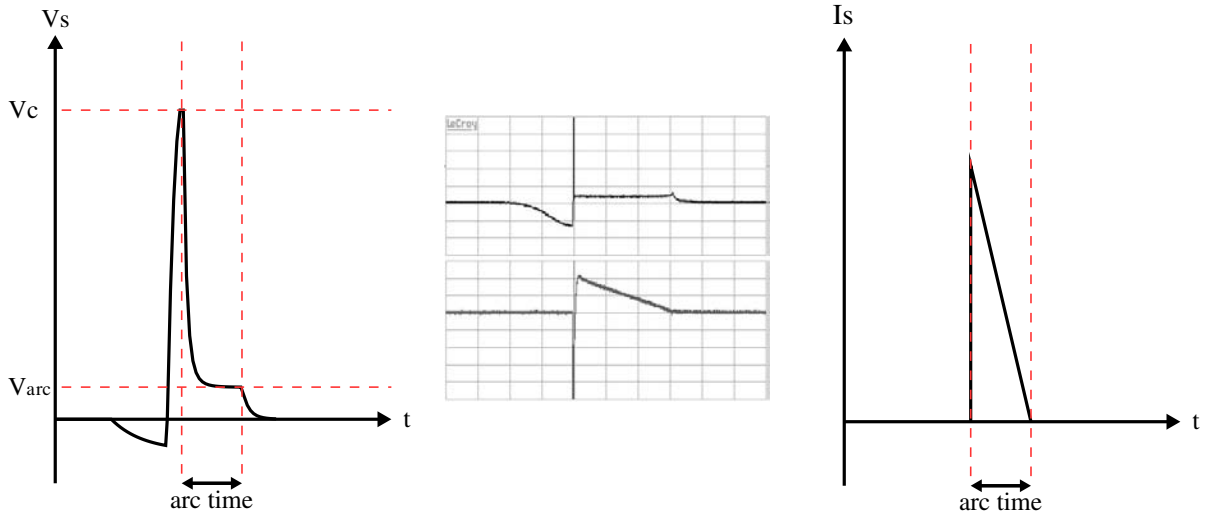


FIG. 4.37 – Signaux d'arc à vide.

4.3.2 Mesures AC avec charges RL série

Les mesures d'arc en AC sont réalisées avec une charge série composée d'une résistance et d'une inductance. L'inductance est en partie réalisée par la bobine secondaire du transformateur à laquelle on adjoint une inductance en série supplémentaire pour augmenter la valeur totale. La résistance de charge série est choisie afin de respecter la condition d'auto-entretient de la décharge. Cette condition sur la valeur de la charge résistive est déterminée à partir de la caractéristique statique et pour un matériau donné ainsi qu'avec une distance inter-électrodes définie. La valeur de la bobine série quant à elle doit être choisie de façon à respecter les conditions de ré-amorçage, elle ne doit donc pas excéder un maximum. La figure 4.38 montre plusieurs relevés de courant et de tension réalisés en alternatif.

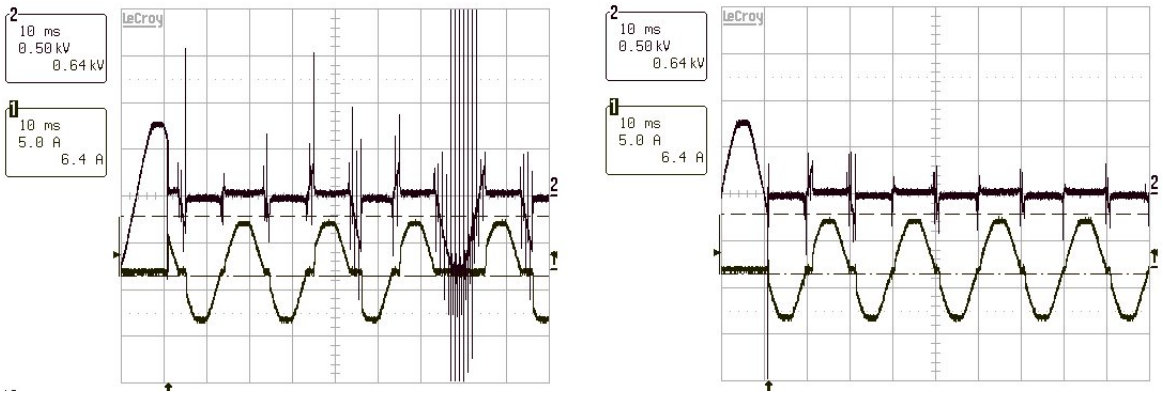


FIG. 4.38 – Signaux alternatifs de courant et de tension d'arc obtenus avec le GDARC en mode AC.

4.3.3 Mesures DC avec charges RL série

Les mesures effectuées en mode DC sont réalisées de la même manière qu'en mode AC c'est-à-dire avec une charge série composée d'une résistance et d'une inductance. La majeur différence avec le mode DC est que la valeur de l'inductance peut-être très élevée puisque qu'il n'y a pas de ré-amorçage. La figure 4.39 montre plusieurs relevés de courant et de tension réalisés en alternatif.

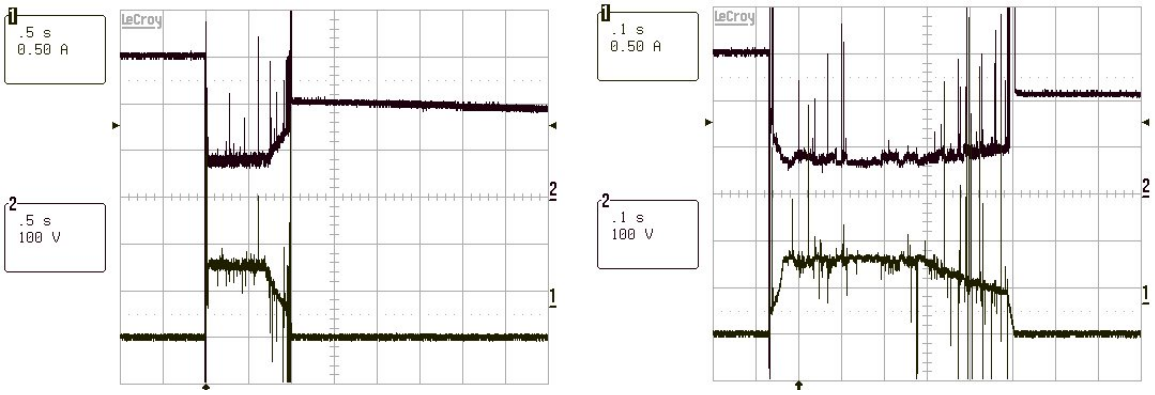


FIG. 4.39 – Signaux de courant et de tension d'arc obtenus avec le GDARC en mode DC.

On observe sur les deux enregistrements donnés figure 4.39 que la tension après extinction de l'arc ne reprend pas sa valeur initiale. Ceci est du au fait que l'alimentation DC est obtenue à partir du redressement du secteur via un pont à diode et une capacité de filtrage de la tension de valeur importante. Lorsque le système coupe l'alimentation, la capacité se décharge dans l'arc, ce dernier est alors maintenu par la capacité. Lorsque les conditions de maintient de l'arc ne sont plus respectées cette capacité reste chargée à une valeur d'environ 2/3 de la tension de départ. Si la capacité n'était pas présente dans le circuit, cette valeur finale serait nulle.

4.3.4 Relevés des caractéristiques statiques

Les caractéristiques présentées ici permettent d'évaluer les grandeurs électriques associées à l'arc : courant, tension et constante de temps d'arc. Nous exploitons ces mesures pour paramétrer précisément le méta-modèle d'arc énoncé dans le chapitre 2.

Caractéristique Tension-Courant-Distance

Des mesures du courant et de la tension d'arc sont effectuées pour plusieurs charges résistives comprises entre 60 et 320 Ohms. Les points de mesure sont relevés lorsque l'arc est stabilisé. Toutes les mesures sont faites à température et pression ambiante dans l'air. Les courbes expérimentales $I(V)$ des arcs, obtenues entre deux électrodes de tungstène séparées d'une distance d de 2 et 4 mm, sont représentées en figure 4.40.

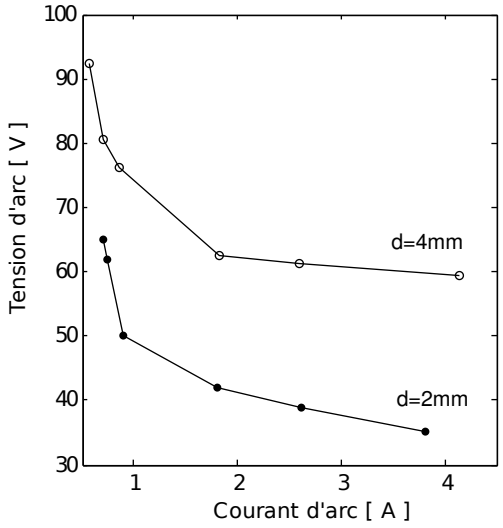


FIG. 4.40 – Caractéristique statique obtenue avec des électrodes de tungstène.

La tension d'arc se stabilise en régime statique lorsque le courant est important. Cette tension constante, abusivement appelée tension d'arc, dépend de l'espacement inter-électrodes d ainsi que de la nature du matériau.
On constate sur la figure 4.40, que la tension augmente au fur et à mesure que la distance inter-électrodes augmente. Si le générateur du circuit dans lequel l'arc survient n'est pas capable de fournir une tension supérieure à la tension d'arc, alors l'arc ne peut être amorcé. Cette relation explique pourquoi l'arc, présent inévitablement à l'ouverture d'un interrupteur, disparaît lorsque celui-ci est complètement ouvert. En effet, il existe une distance d'ouverture pour laquelle la tension d'arc nécessaire est supérieure à celle du générateur d'alimentation. La tension d'arc dépend également du matériau constituant les électrodes. Par exemple, cette tension à une valeur de l'ordre de 90 V/mm pour du tungstène alors qu'elle n'est que de 20V/mm pour le cuivre.

Caractéristique expérimentale Courant-Distance

La figure 4.41 montre l'évolution du courant d'arc en fonction de la distance inter-électrodes. Les courbes sont relevées avec un circuit comprenant une charge résistive de 270 ohms avec la tension secteur redressée. Les électrodes sont en tungstène.

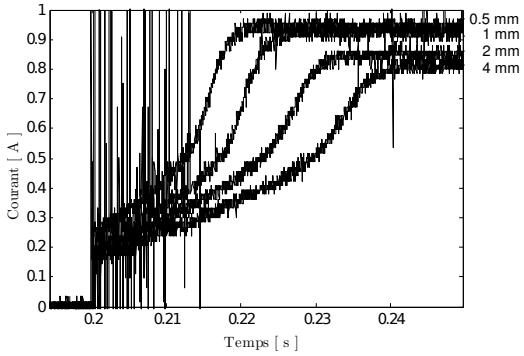


FIG. 4.41 – Relevés du courant d'arc en fonction de la distance inter-électrodes d.

On constate d'après ce relevé que le courant augmente à mesure que d diminue. Cela est une conséquence de la loi d'Ohm puisque V_{arc} diminuant, V_R et I_S augmentent.

Caractéristique d'impédance corona

La résistance corona diminue lorsque d diminue. Sa valeur correspond à la résistance équivalente de l'arc au début de son apparition. On l'évalue à partir du courant de départ de la caractéristique (figure 4.41) qui varie de 180 mA jusqu'à 250 mA lorsque d passe de 4 mm à 0.5 mm. Comme la tension du secteur redressée est de 310 V, la valeur de la résistance corona varie donc de $Z_C = 1723$ Ω jusqu'à $Z_C = 1240$ Ω. Le calcul est répété pour quelques points de départ, on obtient ainsi la courbe donnée figure 4.42.

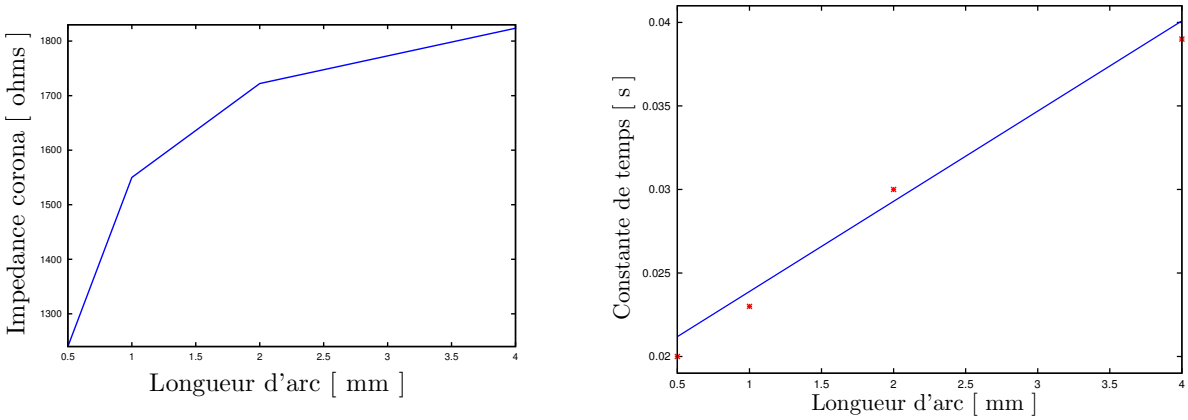


FIG. 4.42 – Impédance corona et évolution de la constante de temps en fonction de la longueur d'arc.

La variation de l'impédance corona s'explique par une variation de l'épaisseur d'isolant présent entre les électrodes.
Il est a noter que l'impédance corona varie également en fonction de la quantité de charge présentes dans le milieu. Ainsi, lors d'un ré-amorçage, il est courant d'observer une diminution de la résistance corona.

Constante de temps d'arc

La constante de temps d'arc Θ est proportionnelle à d. Le temps que met le courant pour atteindre la stabilité passe de 20 ms à 40 ms lorsque la distance croit de 0.5 mm à 4 mm (figure 4.42).

Caractéristique Courant-Charge

La caractéristique de courant en fonction de la charge donnée figure 4.43 permet d'observer que Θ et R_{corona} sont pratiquement indépendantes de la charge résistive.

On remarque cependant que la valeur du courant stabilisé est inversement proportionnel à la résistance utilisée. En effet, V_{arc} étant constante, la tension aux bornes de la charge l'est également. Par conséquent, le choix de la valeur de la charge, permet de fixer la valeur du courant d'arc stabilisé.

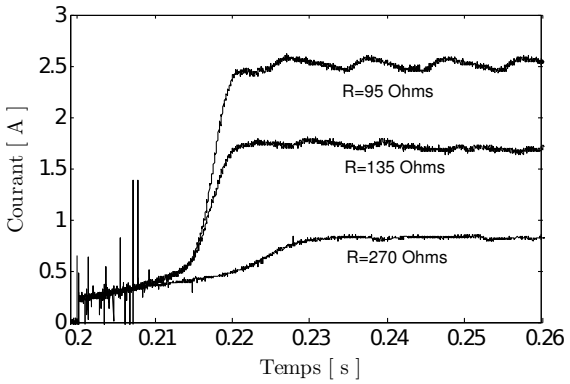


FIG. 4.43 – Relevés du courant d'arc en fonction de la charge du circuit.

4.3.5 Caractéristique dynamique V(I)

La caractéristique dynamique est obtenue en effectuant un tracé en mode XY des signaux de courant et de tension d'arc en mode AC. A la différence de la caractéristique statique, celle-ci est obtenue avec des configurations particulières du circuit et donc pour un seul type de charge particulier et de générateur. Un exemple est fourni en figure 4.44 pour une charge RL série dont la résistance vaut 135 ohms et l'inductance 0.1 mH.

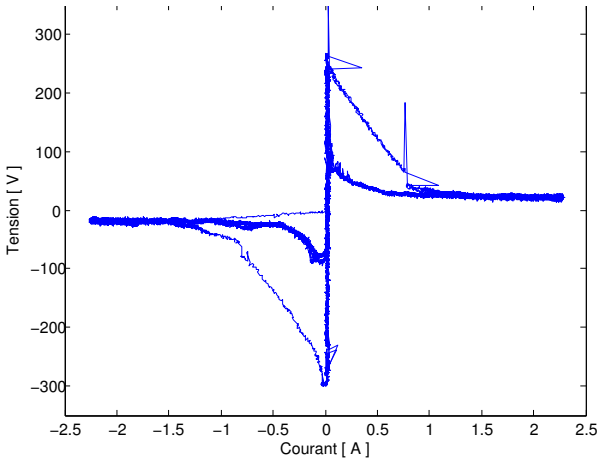


FIG. 4.44 – Caractéristique dynamique.

La caractéristique dynamique représente ici l'alternance positive puis négative de la décharge d'arc. Il est important de souligner qu'elle ne doit pas être confondue avec la caractéristique statique.

4.4 Conclusion sur la génération des défauts d'arc

Nous avons présenté dans ce chapitre un nouveau principe d'amorçage de défauts d'arc. Ce principe permet de réaliser des défauts d'arc reproductibles et calibrés. Cela a permis de réaliser une première classification des arcs donnée chapitre 3. Nous avons également pu développer notre méta-modèle d'arc à partir des enregistrements réalisés avec le GDARC.

Nous souhaitons également mettre en avant le caractère universel de ce banc qui permet de générer tout types d'arc avec tout types de charges. Il a fait l'objet d'un brevet déposé en 2010. Ce banc peut-également être utilisé pour d'autres applications comme par exemple la production de décharges plasma pour le dépôt de matière, le traitement de surface ainsi que la dépollution. Une autre application prometteuse consiste à utiliser ce banc comme poste à souder.

Chapitre 5

Détection de défauts d'arc

5.1 Introduction

La fin des années 1990 constitue un point de départ dans la conception des disjoncteurs de défauts d'arc électrique [JW03] [KEC99] [GS98], tant pour le secteur de l'habitat que pour le secteur de l'aéronautique. C'est à cette époque que le besoin de systèmes de protection contre les défauts d'arc est apparu et principalement depuis le crash de la TWA en 1996. Les premières normes telles que l'UL1699 apparaissent pour l'habitat, mais elles ne concernent que le marché nord-américain. À ce jour, il n'existe toujours pas de norme européenne équivalente. Ceci est lié au fait que les habitats américains sont traditionnellement construits en bois et sont donc plus vulnérables aux incendies provoqués par des défauts d'arc. Pour le secteur de l'aéronautique, il n'existe pas non plus de normes entre les constructeurs, notamment Boeing et Airbus. Certains types d'avions, en service depuis plusieurs dizaines d'années, sont vieillissant et la probabilité d'apparition d'un défaut d'arc est alors importante. Le problème du défaut d'arc n'a pas été anticipé à l'époque de la conception de ces appareils maintenant âgés. Cette situation explique pourquoi le besoin de système de protection embarqué ne soit apparu que récemment. De plus, commercialement, chaque constructeur désire proposer de nouvelles fonctionnalités aux produits qui seront insérés dans les avions du futur.

À la fin des années 2000, les premières études sur les défauts d'arc réalisées par la FAA sont publiées. Elles fournissent un ensemble de résultats concernant la probabilité qu'un arc apparaisse dans tel ou tel organe de l'avion. Indirectement, elles fournissent des indications sur les causes d'apparition de défauts comme le vieillissement des câbles ou encore la perte de contact. On pourra constater que la plupart des articles et des brevets qui traitent de la détection de défaut d'arc pour l'aéronautique sont datés à partir du début des années 2000 jusqu'à aujourd'hui. Ainsi, d'une manière générale, la recherche dans ce domaine est relativement jeune quoique le problème soit connus depuis longtemps.

Le nombre de brevets concernant les disjoncteurs de défaut d'arc est assez important et continue de progresser ces dernières années. Les solutions présentées tentent de répondre à un cahier des charges pragmatique : le système de détection doit être suffisamment réduit pour être intégré dans un disjoncteur de taille conventionnelle. Les ressources matérielles impliquées doivent être réduites au minimum et assurer une détection fiable. Malheureusement, la plupart des brevets s'évertuent à décrire le système de détection d'un point de vue technologique et peu d'entre eux [AF06][HI05] (pour ne pas dire aucun) décrivent en détail les différents algorithmes utilisés.

A contrario, les articles scientifiques qui traitent de la disjonction des arcs détaillent les algorithmes de détection indépendamment de la solution technique envisagée pour les mettre en œuvre. Ceci conduit à la description d'algorithmes qui sont fonctionnels mais qui ne sont pas applicables dans un système industriel (ou difficilement) car ils nécessitent une puissance de calcul trop importante. Parmi ces algorithmes, on en rencontre un en particulier qui semble être une voie de recherche plus prometteuse : la méthode de détection par transformée en ondelettes. Cette dernière méthode constitue un des axes de recherche actuels sur les algorithmes de détections.

Un algorithme de détection peut-être, de lui seul, l'objet de recherches de plusieurs années. C'est le cas pour l'algorithme de la transformée en ondelettes. Cependant, nous ne souhaitions pas nous restreindre à cette seule solution. C'est pourquoi nous proposons d'identifier un certain nombre d'algorithmes de la littérature sous la forme d'une classification phénoménologique et analytique. À partir de cette classification, nous avons élaboré une architecture pour le détecteur. Par conséquent, nous souhaitons introduire ce chapitre en proposant la définition de la classification des algorithmes ainsi que l'architecture du détecteur proposé.

5.1.1 Classification des algorithmes de détection

L'observation d'un arc dépend fortement de son type (série ou parallèle) et de sa constante de temps. Dans le cadre du développement d'un détecteur, il convient de savoir précisément l'architecture du détecteur cible ainsi que le type d'arc que l'on souhaite détecter. À partir de là, il faut choisir d'observer les phénomènes adéquats et donc choisir les algorithmes en conséquence. En pratique on peut déterminer une infinité de phénomènes qui sont causés par l'arc électrique et on trouve dans la littérature un grand nombre d'algorithmes de détection en rapport avec ces phénomènes. La difficulté est que chaque phénomène observé, même si incompris, peut être susceptible d'être un indice pour la détection.

Classification phénoménologique

Dans cette approche, les algorithmes de détection existant sont listés par les phénomènes qu'ils tendent à mettre en avant lorsqu'un arc survient. En voici une liste non exhaustive :

- le passage à zéro du courant : un méplat apparaît lorsque le courant passe à zéro [S99][LDIT07] [STRD],
- la tension quasi constante d'arc : lorsque l'arc est stable, la tension d'arc devient quasiment constante,
- l'apparition de fréquence supplémentaires : les signaux de tension, de courant ou de puissance se modifient ainsi que leur enveloppe fréquentielle [LR01][MB03][JL03].
- variation du bilan énergétique : à partir d'un bilan de puissance, généralement au passage à zéro du courant.
- la non-conformité du signal : lorsque l'allure du signal évolue de manière différente de ce qu'il devrait être ou lorsque la signature du signal d'arc est identifiée [AF06].
- variation de la dérivée du signal [LR01][P99].
- ...

La détection d'un de ces phénomènes engendre la production d'un indicateur qui renseigne sur la présence d'un arc. Un indicateur prend souvent la forme d'une variable binaire. Cependant, ces phénomènes peuvent apparaître également dans d'autres circonstances telles que lors du démarrage d'un moteur, ou lors de la mise sous tension d'une lampe fluorescente. Ce qui nécessite une discrimination supplémentaire.

Classification analytique

Les algorithmes sont classés ici en fonction de la méthode d'analyse dont ils sont issus :

- analyse temporelle : dérivation, corrélation, prédiction... [S99][LR01][P99],
- analyse fréquentielle : filtrage « in-beetween » , transformée de Fourier [MB03][JL03],
- analyse temps-fréquence : spectrogramme [LR01], transformée en ondelettes [LL05] [ZCL06] [JM05] [FR02][SMUB06][LDIT07][STRD] [SMUB06][MRL05][LSL06] [LSL03]
- analyse électrique : comparaison à la modélisation électrique,
- les méthodes de reconnaissance de forme [LR01],
- codage génétique : réseaux de neurones [BP07],
- ...

Les algorithmes peuvent être également combinés entre eux. L'article [LR01] par exemple propose une méthode basée sur la dérivée du courant. Le spectrogramme de ce signal fait apparaitre les composantes hautes fréquences liées à l'arc électrique. Une analyse de forme quant à elle est effectuée sur le spectrogramme pour déterminer « le degré de présence d'arcs » .

5.1.2 Proposition d'un système de détection

Schéma général d'un disjoncteur à détecteur d'arc

Le système proposé s'inspire du schéma d'un disjoncteur conventionnel dans lequel est inséré le système de détection (SD). Le principe de ce dernier repose sur la mesure conjointe du courant et de la tension de ligne comme le montre la figure 5.1.

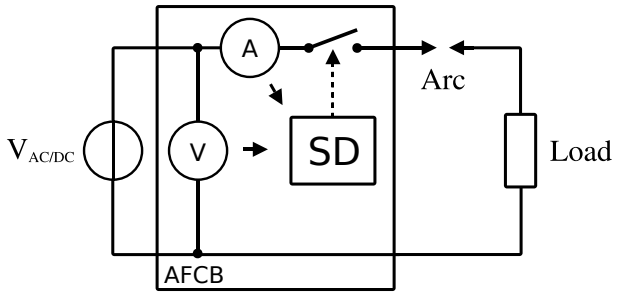


FIG. 5.1 – Architecture proposée.

La mesure de tension est exploitée pour identifier un arc parallèle, la mesure directe du courant permet d'identifier un arc série. Comme le système doit être intégré dans un boitier unique, les capteurs de courant et de tension sont inclus dans celui-ci.

Le système de détection (SD) représenté par le bloc SD de la figure 5.1 et 5.2 réalise la fonction de détection.



FIG. 5.2 – Entrées et sortie du système de détection SD.

La sortie du système de détection est un signal binaire de présence/absence d'arc. Le signal sert de commande à l'interrupteur du disjoncteur. L'ensemble des fonctions sont insérées dans un module appelé AFCB (représenté sur la figure 5.1). Le module doit être intercalé entre la ligne d'alimentation et la charge qu'il protège en aval.

Architecture générale du système de détection

Il n'existe pas dans la littérature de description générale de l'organisation interne du système et de ses fonctionnalités. Ceci est principalement dû au fait que la plupart des systèmes existants proposés sont protégés et constituent le savoir-faire de chaque entreprise. Cependant, nous envisageons un système de détection basé sur l'exploitation simultanée de plusieurs algorithmes. Cette stratégie aboutit au schéma général décrit en figure 5.3.

Ce schéma global se décompose en plusieurs fonctions :

- plusieurs algorithmes de détection fournissent des indicateurs sur la présence d'un arc,
- une logique de discrimination fournit l'information de présence d'un arc à partir des indicateurs d'entrées.

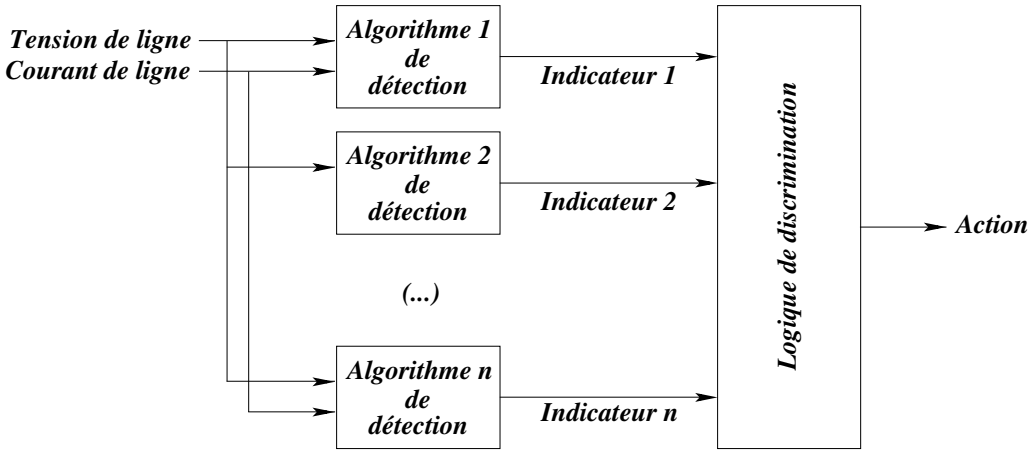


FIG. 5.3 – Schéma général du système de détection.

Cette stratégie part de l'hypothèse que nous devons vérifier à posteriori que la multiplication des indicateurs améliore l'indice de confiance du système. La fiabilité du système repose entièrement sur la logique de discrimination dont le rôle est la prise de décision finale. La littérature abonde d'articles traitant d'algorithmique mais peu abordent la fusion d'indicateurs multiples [C07][AF06]. De plus, peu de travaux énumèrent les phénomènes pouvant leurrer un système de détection d'arc [GWD03].

Les performances d'un système de détection sont mesurées par :
- le taux de détection : $T_C = n/N$, avec n le nombre de détection et N le nombre d'arcs réels présents de le signal test.
- le taux de fausse détection : $T_F = n^{'}/N^{'}$, avec $n^{'}$ le nombre de détection incorrectes et $N^{'}$ le nombre de leurres présents de le signal test.

Un système fiable sera caractérisé simultanément par les deux critères $T_C = 1$ et $T_F = 0$. Il convient donc d'établir deux classes d'indicateurs :
- une classe permettant d'atteindre le premier critère T_C
- une classe permettant d'atteindre le second critère T_F

5.1.3 Méthodologie de conception du disjoncteur

Objectifs

En dehors des tests réalisés pour qualifier un détecteur (test de la guillotine, plot vibrant...), il n'existe pas de méthodes pour quantifier précisément les performances d'un détecteur. C'est pourquoi, la détermination des performances d'un disjoncteur et d'un algorithme précis compte parmi les objectifs principaux de ce travail de thèse. Nous nous inspirons pour cela de la technique du benchmarking : les performances des algorithmes de détection seront toutes évaluées sur une même base de signaux tests. Pour ce faire, nous proposons d'emprunter une méthode utilisée dans le domaine de l'imagerie numérique : afin de confronter les résultats de recherche sur les algorithmes de détection de visage, la communauté scientifique de ce domaine a construit une base de données comprenant plusieurs centaines d'images de visages caractéristiques. Nous souhaitons construire une base de données similaire qui comprendrait :
- les valeurs de courant-tension d'un arc pour chaque type d'arc et de circuit avec une liste exhaustive de charge.

– les valeurs de courant-tension des leurres susceptibles de provoquer des fausses détections

À partir de cette base de données, on pourrait déterminer précisément le taux de détection et de fausse détection. À l'issue de ce travail de thèse nous avons complété seulement une très petite partie de cette base : Les arcs des quatre types cités au chapitre 2, avec des charges résistives ou inductives, en série et en parallèle. Comme les signaux leurres sont pour l'instant peu connus [GWD03] (à l'exception du signal de courant d'un triac) et que nous ne possédons pas d'enregistrements, il est impossible, de fournir un taux de fausse détection.

Par ailleurs, on peut constater qu'avec l'architecture fig 5.3, il est nécessaire d'avoir choisi précisément les algorithmes avant de déterminer la logique de discrimination. Lorsque l'on souhaite déterminer cette logique, il faut connaitre le comportement de chaque algorithme au regard de la base de données. Ainsi la logique de discrimination prendra en compte tous les types d'arc inscrits dans la base. On comprend que plus la base est fournie, plus le détecteur sera performant.

Organisation

A partir de la classification des algorithmes, nous sélectionnons ceux qui offrent les meilleurs résultats pour notre application. Comme nombre d'articles récents concernent la transformée en ondelettes, nous avons retenu cette méthode pour l'étude. Puis les quatre parties suivantes sont consacrées à la description des algorithmes conçus pour la détection des arcs électrique dans ce travail de thèse. On distingue :

– Détection par analyse spectrale,
– Méthode par différenciation temporelle,
– Algorithme d'interpolation pour la détection,
– Algorithme basé sur la transformée en ondelettes.

Avant de terminer ce chapitre avec une partie sur les perspectives envisagées pour compléter cette étude, on analysera qualitativement les résultats de l'application des algorithmes proposés avec la base de données.

5.2 Transformée en ondelette des signaux électriques

5.2.1 Généralité sur la transformée en ondelettes

Analyse de Gabor

Le principe de base est d'introduire dans l'analyse de Fourier une notion de localité temporelle. Pour cela, on multiplie le signal à analyser par une fenêtre temporelle préalablement choisie avant de calculer la transformée de Fourier [TRU94]. On reproduit ensuite le calcul avec différentes fenêtres possédant chacune leurs propres localisation temporelle. Cela conduit à réaliser une analyse fréquentielle en tout point de la localisation spatiale. Si l'on note $g(t)$ la fenêtre utilisée et $f(t)$ la fonction à analyser le résultat de la transformation s'écrit :

$$\int_R g(t-b)f(t)e^{-j\omega t}dt \tag{5.1}$$

Le paramètre b correspond à la localisation temporelle. Pour des raisons pratiques, on fait apparaitre le terme $t-b$ en multipliant l'équation 5.1 précédente par le terme e^{-jwb} et en corrigeant l'équation de la fenêtre, ce qui conduit à :

$$\int_R g(t-b)^* f(t)e^{-j\omega(t-b)}dt \tag{5.2}$$

Les fonctions $G(b,\omega) = g(t-b)^* = g(t-b)e^{j\omega b}$ sont appelées ondelettes de Gabor, ou encore Gaborettes. Un exemple est représenté sur la figure 5.4.

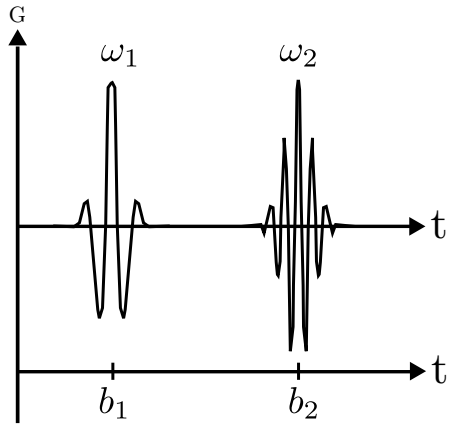


FIG. 5.4 – Localisation de deux Gaborettes $G(b_1,\omega_1)$ et $G(b_2,\omega_2)$.

Transformée en ondelette

La définition donnée par Gabor ne permet pas d'obtenir une résolution aussi précise que souhaitée. En effet, si on considère une fonction $f(t)$ possédant une singularité en $t = t_0$, celle-ci ne peut être observée lorsque la taille de la Gaborette est inadaptée. Il est donc nécessaire de disposer d'un outil qui permette d'ajuster la résolution à la durée du signal observé.
La transformée en ondelettes réalise cet ajustement de résolution en partant d'une fonction $\psi(t)$

mère appelée ondelette à laquelle on associe un paramètre de translation temporelle b et un paramètre de dilatation a :

$$\psi_{b,a}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \tag{5.3}$$

Dans ce cas la transformée continue en ondelette d'un signal $f(t)$ s'écrit :

$$T[f(t)] = T_f(b,a) = \int_R f(t)\psi_{b,a}(t)dt = \frac{1}{\sqrt{|a|}}\int_R f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)dt \tag{5.4}$$

Cette transformée décrit le signal $f(t)$ au voisinage du couple $(b, \omega/a)$. On peut l'interpréter comme le poids de la pulsation ω dans le signal analysé à l'instant $t = b$.

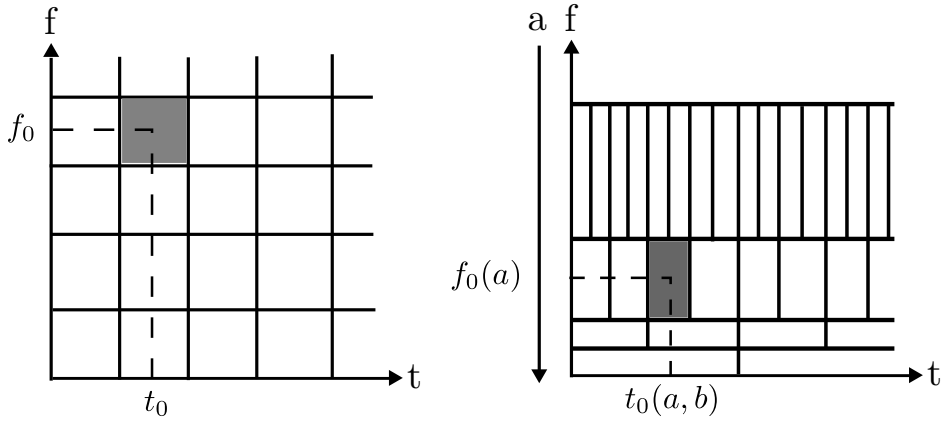
Plan temps fréquence

Le plan temps fréquence permet la représentation graphique du résultat de la transformation en ondelette. Pour tracer une telle représentation, il faut observer que la dilatation de l'ondelette par le facteur a modifie la résolution temporelle de la représentation. Cette résolution est exprimée par la variance σ_t de l'ondelette mère et également par la variance σ_ω de la transformée de Fourier de celle-ci. En notant σ l'écart type de l'ondelette mère, nous avons :

$$\sigma_t = a\sigma \tag{5.5}$$

$$\sigma_\omega = \sigma/a \tag{5.6}$$

Les équations 5.5 et 5.6 nous indiquent que la précision en temps et en fréquence est variable en fonction du facteur d'échelle a. La figure 5.5 fournit une comparaison entre la représentation du plan temps fréquence réalisée par transformation de Fourier à fenêtre et par transformation en ondelette.



(a) Analyse de Fourier (b) Analyse en ondelettes

FIG. 5.5 – Plan temps-fréquence.

On constatera que la résolution temporelle de l'analyse en ondelettes est plus élevée pour les hautes fréquences que pour les basses fréquences. Inversement, la résolution fréquentielle est plus importante pour les basses fréquences que pour les hautes fréquences.

Transformée en ondelette discrète

Lorsque le calcul de la transformée en ondelettes continue est effectuée successivement avec des valeurs différentes mais proches pour a et b, on constate alors une redondance des informations. Afin d'éviter ce problème, une solution est d'effectuer une discrétisation du plan temps fréquence et de définir une transformée en ondelettes discrète (DWT).
Avec une méthode de discrétisation du plan temps fréquence, on peut effectuer une analyse sans redondances en respectant le critère suivant pour le choix des a et b [TRU94] [IG10] [STRD] :

$$a = a_0^m \tag{5.7}$$

$$b = nb_0a_0^m \tag{5.8}$$

avec a_0 et b_0 appartenant à l'ensemble des entiers relatifs. La transformée s'écrit alors :

$$DWT_f(a,b) = a^{-\frac{m}{2}} \int_R f(t)\psi(a^{-m}t - nb)dt \tag{5.9}$$

Si $a = 2$ et $b = 1$, la décomposition se fait alors par puissance de deux. Une telle décomposition est appelée dyadique et se traduit par le jeux d'équations suivantes :

$$DWT_f(m,n) = 2^{-\frac{m}{2}} \int_R f(t)\psi(2^{-m}t - n)dt \tag{5.10}$$

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-\frac{m}{2}}\psi(2^{-m}t - n) \tag{5.11}$$

Cette dernière équation représente la famille des ondelettes dyadiques. L'avantage de l'approche dyadique est qu'elle est adaptée à une implantation numérique. Elle possède une propriété qui permet de déterminer des sous-ensembles de définitions : si une fonction $f(t)$ appartient à l'ensemble A_j alors $f(t/2)$ appartient à l'ensemble A_{j+1} avec l'ensemble A_{j+1} inclus dans l'ensemble A_j. Ce qui s'écrit :

$$f(t) \in A_j \Leftrightarrow f\left(\frac{t}{2}\right) \in A_{j+1} \tag{5.12}$$

$$A_{j+1} \subset A_j \tag{5.13}$$

Ainsi, si l'on connaît la transformée pour l'ensemble A_j, alors l'information concernant les coefficients de l'ensemble A_{j+1} est connue et le calcule des différents niveaux m de la transformée en ondelettes est possible. Aussi, il faut pour cela que A_j contienne assez d'informations. C'est à dire que si D_j est l'ensemble sur lequel on effectue la transformée en ondelettes, il est possible de définir un espace complémentaire de D_j, noté A_j. Sur cet espace est définie la fonction complémentaire de l'ondelette mère qui est la fonction échelle $\phi_{m,n}(t)$. Ainsi à chaque niveau de décomposition, l'ondelette mère analyse les détails du signal, quand la fonction échelle donne une approximation du signal. Le calcul de la fonction échelle s'effectue par une analyse dépendant du niveau m, de la même façon que l'ondelette :

$$A(m,n) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(2^{-m}t - n)dt \tag{5.14}$$

La figure 5.6 représente un exemple de décomposition. À partir du signal est extrait un premier coefficient pour $m = 1$, le détail 1. Le reste de l'information sur le signal est contenu dans l'approximation 1, qui est l'analyse par la fonction échelle du signal d'origine. Ensuite, on analyse cette approximation 1 avec l'ondelette ayant $m = 2$, ce qui revient à sonder les fréquences plus basses. La résolution temporelle est divisée par deux et le nombres d'échantillons sont divisés par deux.

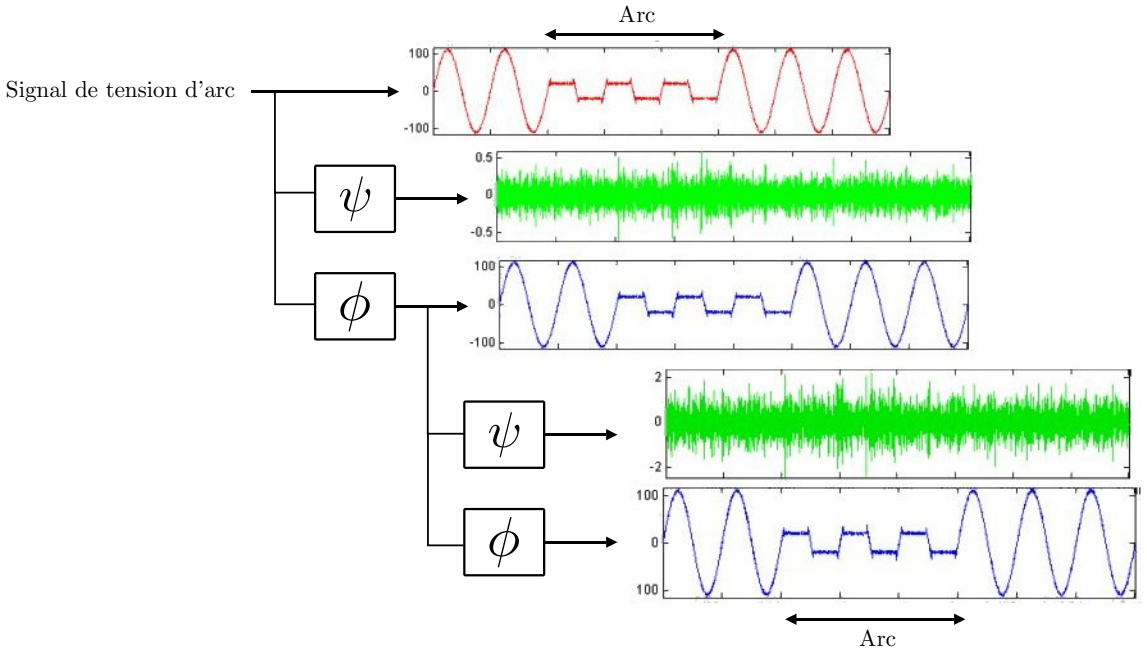


FIG. 5.6 – Exemple de décomposition d'une tension d'arc réalisé avec l'outil Matlab sur des signaux bruités obtenus avec le méta-modèle.

Pour qu'à chaque niveau de décomposition m, les informations contenues dans la fonction détail et approximation se complètent et définissent entièrement le signal du niveau précédent $m - 1$, il faut que :

– l'ondelette mère et la fonction échelle forment une base orthogonale.
– l'ondelette soit une fonction de $L^2(R)$, c'est à dire une fonction à carré intégrable :

$$\int_0^{+\infty} \left|\hat{\psi}(\omega)\right| \frac{dw}{|w|} = \int_{-\infty}^{0} \left|\hat{\psi}(\omega)\right| \frac{dw}{|w|} t \tag{5.15}$$

Différentes « familles » de solutions ont été proposées par Daubechie, Coiflet, etc. (Chacune des ondelettes d'une famille de solution est identifiée par un numéro par exemple : Db10 signifie la dixième solution de la famille Daubechie).

La décomposition en fonctions « approximation » et « détail » peut-être vue comme le passage du signal à travers deux filtres : le premier est un filtre passe-bande centré sur la fréquence définie par l'ondelette mère, le second est un filtre complémentaire possédant l'allure d'un coupe-bande. Ces filtres numériques complémentaires satisfont la relation :

$$g[n] = (-1)^n h[1 - n] \tag{5.16}$$

Où g et h représentent les fonctions de transfert des deux filtres numériques considérés. La figure 5.7 représente les coefficients du filtre et les spectres associés à une ondelette et à sa fonction d'échelle.

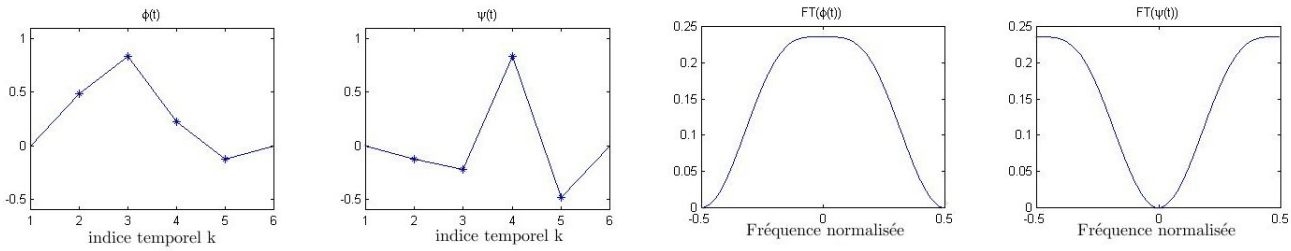


FIG. 5.7 – Représentation des coefficients d'une ondelette et de leur spectre.

5.2.2 Application à la détection d'arcs électriques

Problématique

Il est difficile d'extraire un indicateur d'arc précis à partir de sa DWT. La plupart des méthodes que l'on rencontre dans la littérature, sont le plus souvent basées sur la détection des discontinuités dans le signal. Les ondelettes les plus utilisées à cette fin sont les ondelettes de Daubechie [JM05] [LL05] [IG10] [SMUB06] [STRD], l'ondelette de Morlet (encore appelée le chapeau mexicain) [JM05] [STRD] [HHH98], l'ondelette Symbole [SMUB06] et l'ondelette de Coiflet [IG10].

Dans un premier temps, nous avons choisi l'ondelette la plus adéquate pour la détection. Ce choix a été arrêté à l'aide d'un critère relatif au niveau de bruit. En effet, la transformée en ondelettes est sensible au bruit du signal. Dans un deuxième temps, nous avons utilisé l'outil Matlab afin de créer notre propre ondelette. Cette voie, bien que partiellement explorée dans ce travail, constitue une perspective de recherche pour la détection.

La figure 5.8 ci-dessous représente le résultat de la transformée sur un signal de courant d'arc obtenu avec le méta-modèle :

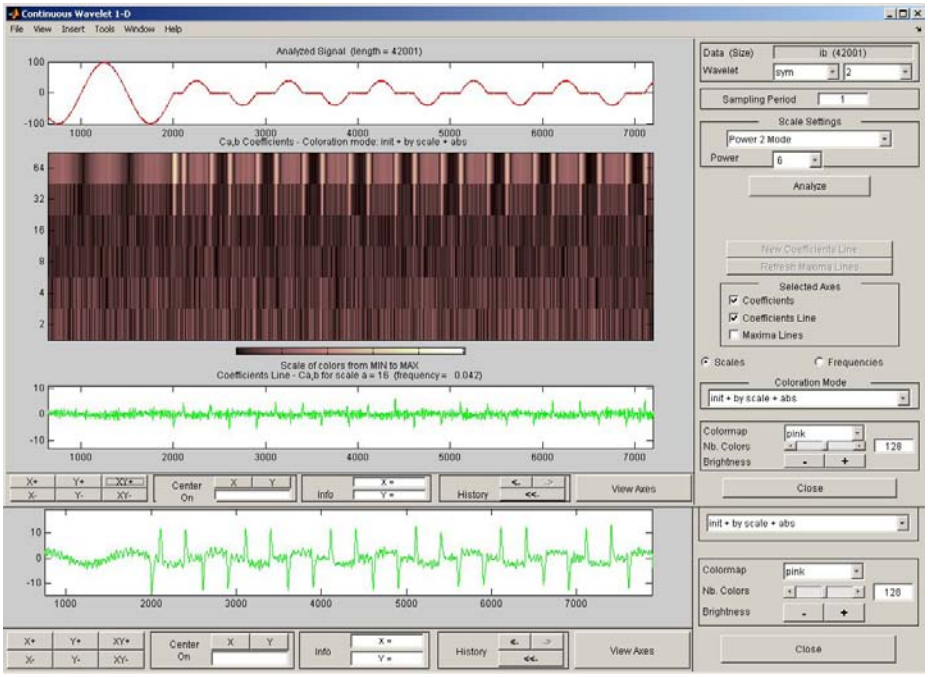


FIG. 5.8 – Exemple de décomposition d'un signal de courant d'arc réalisée avec l'outil Matlab.

Les zones les plus claires de l'image de la transformée figure 5.8 correspondent aux points de plus forte pondération. On observe que le bruit est visible sur les premières décompositions relatives aux hautes fréquences. Le bruit s'atténue progressivement en changeant de niveau. Les zones claires correspondent aux discontinuités du signal (provoquée par le ré-amorçage de l'arc). C'est ce principe qui est utilisé en général pour faire la détection de l'arc : il faut repérer la réponse spécifique d'une ondelette à un certain niveau de détail. La transformée étant sensible au bruit, qui constitue un premier critère de comparaison des ondelettes que nous allons étudier : le but va être de déterminer une ondelette qui fournit un taux de détection correct sur la plage de bruit la plus grande possible, ce qui assurerait une première qualité de détection pour une réalisation technique. Il convient ensuite de déterminer si la transformée en ondelettes est sensible à d'autres perturbations sur le signal, telles que des variations dues à la mise en marche d'appareils électriques sur la ligne. Nous avons observé que certaines ondelettes sont plus appropriées que d'autres : certaines ne réagissent pas à tous les pics ; d'autres réagissent à la moindre discontinuité ; d'autres encore ne donnent de bons résultats que pour un niveau de détail élevé (détail de niveau 5 par exemple).

Principe de détection

Détecter un arc électrique sur un signal revient à repérer un pic précis dans sa transformée en ondelettes. Cette détection sera plus facile si, pour un signal donné, l'ondelette choisie favorise l'apparition de pics significatifs. Puis un seuillage est ensuite réalisé sur un des détails de la transformée. Si le seuil est dépassé, l'arc est considéré présent. La figure 5.9 présente une comparaison de la transformée sur un signal non bruité issu du méta-modèle ainsi que sur un signal bruité dans un cas où la détection est encore possible. Ici les pics présents aux instants d'amorçage sont toujours visibles malgré le bruit du signal. Hélas, ce n'est généralement pas le cas.

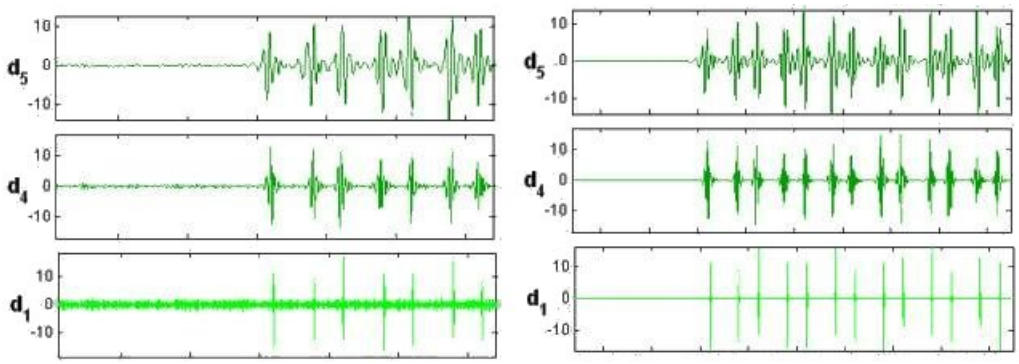


Fig. 5.9 – DWT par Daubechie 10 avec bruit (gauche) et sans (d5 = détail de niveau 5).

Afin de detécter un pic parmi ceux générés par le bruit on fixe un seuil de détection sur la transformée, on estime que chaque point de la courbe dépassant le seuil est dû à un arc. Cette méthode est inspirée de celles que l'on peut rencontrer dans des publications scientifiques [LL05], où elle n'est par contre pas utilisée pour comparer les ondelettes ni pour étudier l'effet du bruit. Cette première approche a permis la mise au point d'un algorithme calculant la transformée sur signal non bruité et bruité. Cet algorithme génère un signal binaire indiquant la présence d'un arc. Ce signal est à l'état haut lorsque la transformée a dépassé la valeur du seuil. Pour extraire un taux d'erreurs, on effectue une comparaison échantillons par échantillons des signaux de détection avec un signal bruité et non bruité : le nombre de différences représente alors le nombre d'erreurs. L'écart type des valeurs de la transformée est calculé afin d'obtenir une approximation de l'enveloppe

représentant le bruit (qui est en général à moyenne nulle). Lorsqu'un pic dépasse suffisamment de cette enveloppe, on considère qu'il est issu d'un arc. On peut représenter cette méthode ainsi :

1. Le signal est analysé par une fenêtre glissante, cela permet de limiter le nombre de points sur lequel se fait le calcul de l'écart type.
2. On calcule l'enveloppe du bruit. Si un pic lié à un arc a lieu à ce moment il sera comptabilisé dans l'écart type.
3. Après avoir extrait la première valeur d'écart type, l'algorithme va comparer la valeur entrante dans la fenêtre avec l'écart type calculé. Si cette valeur ressort nettement de l'enveloppe, c'est-à-dire si elle est R fois plus grande en l'occurrence, on considère qu'un arc s'est produit. R, définit comme le facteur de robustesse au bruit, est déterminé empiriquement par l'observation de plusieurs enregistrements.

5.2.3 Résultats

Comparaison des ondelettes d'une famille

Les familles qui ont été retenues pour l'étude sont Daubechie, Coiflet et Symmlet. Elles sont testées pour les valeurs de robustesse R suivantes : 5.5 et 5.6. On évalue un taux d'erreur et de non-détection en effectuant une comparaison entre le résultat de la détection et le signal réel. Un exemple de cette évaluation est donné figure 5.10 pour les ondelettes de Coifflet. Le niveau de bruit est fixé arbitrairement à 10 % pour l'étude.

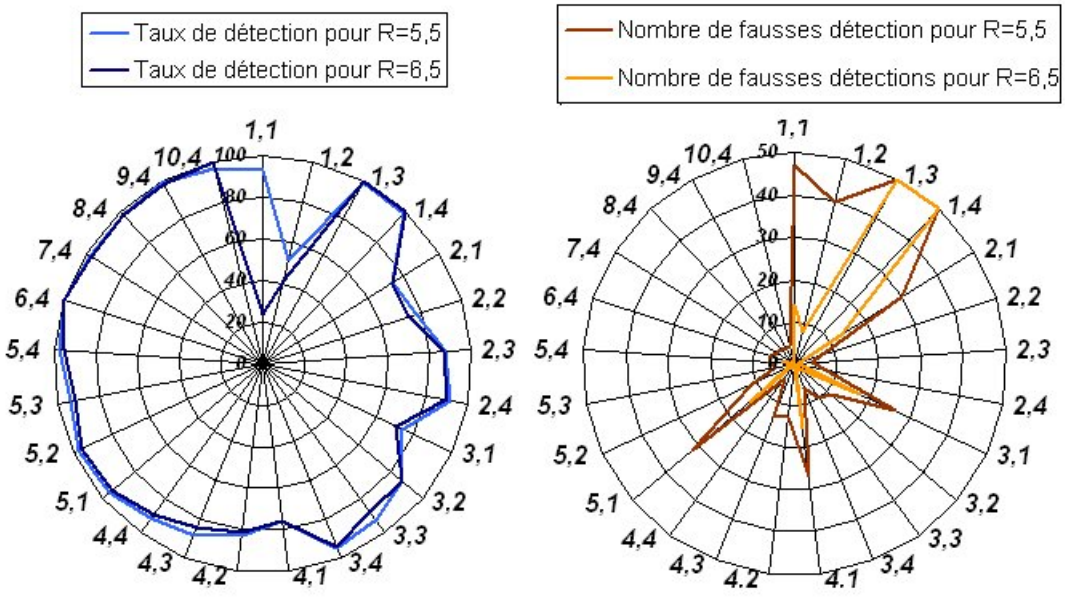


FIG. 5.10 – Diagrammes circulaires de comparaison de la sensibilité au bruit pour la famille Coifflet.

On observe que les réponses de l'ondelette sont plus franches pour les hauts niveaux de décomposition, plus facilement identifiables, et permettent donc de mieux résister au bruit. L'augmentation du paramètre R fait chuter le nombre de fausses détections, mais rend en parallèle la détection plus délicate. En effet, dans l'exemple de l'ondelette Db5.4, lorsque R évolue de 5.5 à 6.5, le nombre de fautes évolue de 7 à 0, par contre les non-détections augmentent de 3 à 6.

Comparaison entre les familles d'ondelettes

On souhaite désormais comparer les familles d'ondelettes. Pour cela on procède exactement comme pour la comparaison des ondelettes de même famille. Le résultat est donné figure 5.11. Il propose la comparaison de deux ondelettes par famille pour les familles Coiflet, Symmlet et Debauchie en fonction de la robustesse au bruit R. Ce dernier paramètre est défini comme la valeur de l'amplitude de bruit à partir de laquelle le taux de détection est inférieur à 95 %.

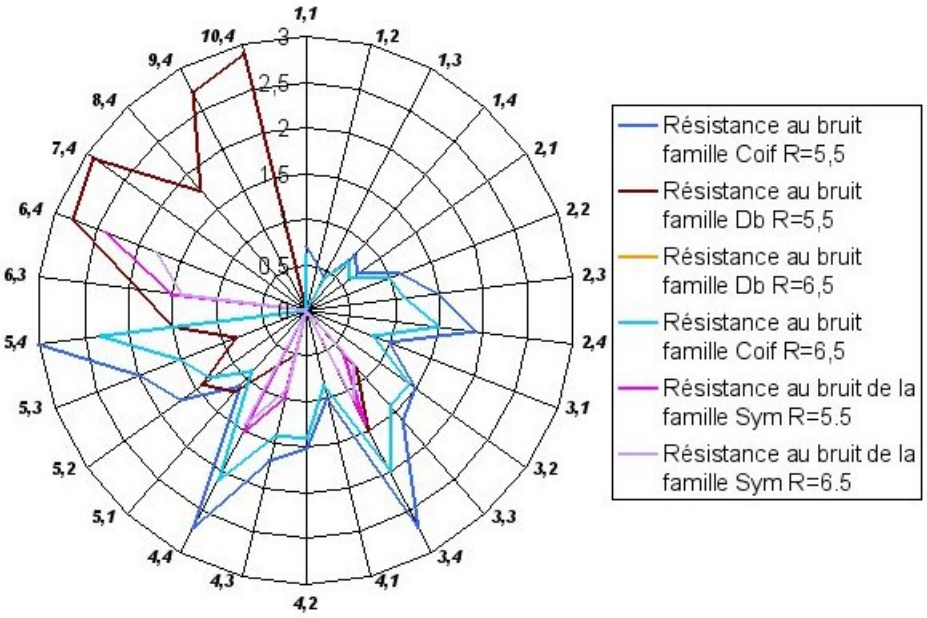


FIG. 5.11 – Comparatif de la robustesse au bruit des familles Coiflet, Symmlet et Debauchie.

Nous observons que la famille Symmlet reste dans l'ensemble moins résistante au bruit que les autres ondelettes de notre étude. Par ailleurs, avec les ondelettes Daubechies et Coiflet, on arrive à atteindre une bonne robustesse pour Coif 5.4, Db6.4, Db7.4 et Db10.4.

5.2.4 Ondelette pour la détection

La détermination rigoureuse d'une telle ondelette exige des développements mathématiques qui sortent du cadre de cette thèse. Nous pouvons cependant tenter d'approcher l'ondelette optimale par simulation sous Matlab. Pour cela, il nous a semblé judicieux de construire une ondelette directement liée à la forme du signal à détecter. La figure 5.12, fournit un exemple de détection dans lequel le motif de l'ondelette épouse la forme caractéristique du courant d'arc. La détection est testée sur un signal synthétique comportant deux amorçages d'arc à des fréquences différentes. Le plan temps fréquence représentatif de la DWT associé laisse clairement apparaitre la possibilité d'une détection fiable des arcs.

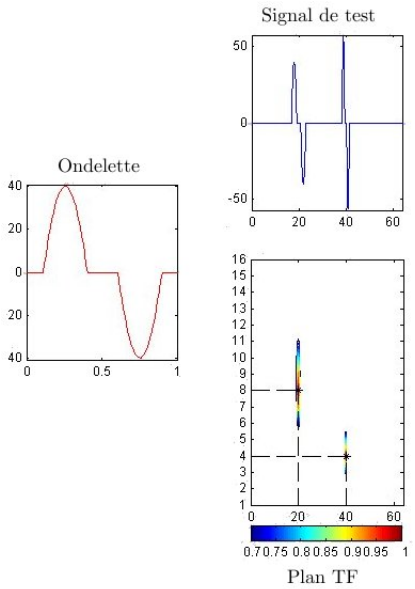


FIG. 5.12 – Signaux et plan temps fréquence avec une ondelette adaptée.

Une expérience similaire est à présent réalisée sur le même signal test sur lequel a été superposé 20 % de bruit. La figure 5.13 compare les plans temps-fréquence obtenus, d'une part avec l'ondelette adaptée, et d'autre part avec l'ondelette de Coiflet 5. Nous constatons que la signature des deux amorçages d'arc reste localisable en temps et fréquence avec la DWT adaptée.

En conclusion, le développement d'un ondelette adaptée spécialement dimensionnée pour la détection d'arc sur des signaux électriques semble une voie de recherche très intéressante. Une des perspectives consiste en la détermination des coefficients des filtres numériques associés afin de permettre une exploitation sous la forme d'un algorithme de détection opérationnel.

5.2.5 Simulation sous Matlab

Pour simuler une implantation de la DWT, il convient de prendre en compte les ressources et la structure de l'architecture matérielle sur laquelle sera implanté l'algorithme. Ainsi, pour un contrôleur de signal DSPIC, nous nous sommes limités à l'ondelette Debauchie 6 pour une observation des détails de niveau 1. Les tests de détection sont réalisés sur des signaux du courant d'arc (figure 5.14) et de la tension d'arc (figure 5.15) série reels obtenus avec le GDARC (AC 50 Hz, fe=400kHz, N=8bits).

Le graphique supérieur correspond au signal de courant filtré préalablement par un module numérique CIC. Ce filtre permet de réduire notablement le niveau de bruit tout en améliorant la résolution en amplitude, en divisant la fréquence d'échantillonnage par 32. Le graphique du milieu représente la transformée de détail de niveau 1. La sortie binaire obtenue par redressement et seuillage de la transformée apparait sur la graphique inférieur. L'algorithme s'avère adaptée pour la détection des discontinuités caractéristiques de la présence d'un arc.

Les mêmes algorithmes que précédemment sont appliqués au signal de tension d'arc représenté sur la figure 5.15. Là encore, la détection de l'arc est possible moyennant le choix d'un seuil adapté.

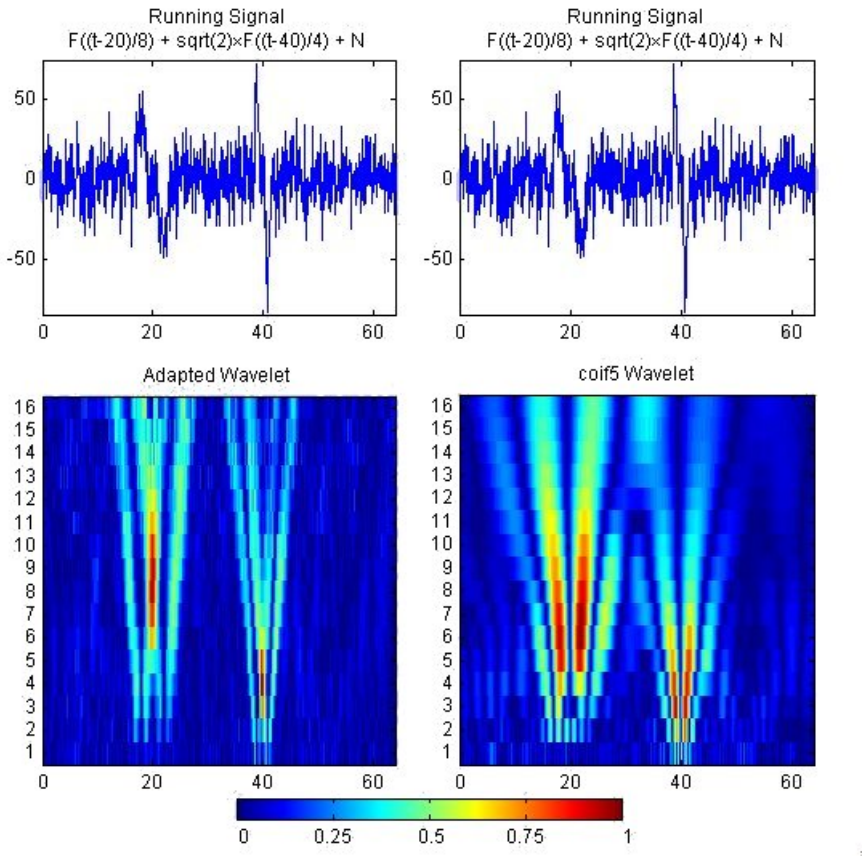


FIG. 5.13 – Comparaison des plan temps fréquence entre l'ondelette adaptée et l'ondelette Coif5.

5.2.6 Conclusion sur l'exploitation de la DWT pour la détection d'arc

Notre étude à permis de dégager deux intérêts majeurs à l'utilisation de la DWT :

- le premier réside dans le fait que le même algorithme peut être appliqué au courant et à la tension d'arc bien qu'ils présentent des allures très différentes. Qui sont deux indicateurs fortement corrélés de présence d'arc peuvent être extraits simultanément.
- le second : cette approche offre la possibilité de construire une ondelette mère particulière adaptée aux artéfacts à détecter. On se rapproche ainsi de l'élaboration d'un détecteur optimal comme ceux utilisés dans les récepteurs de transmission numérique.

Le principal inconvénient de la DWT est lié à la grande quantité de calcul qu'elle nécessite.

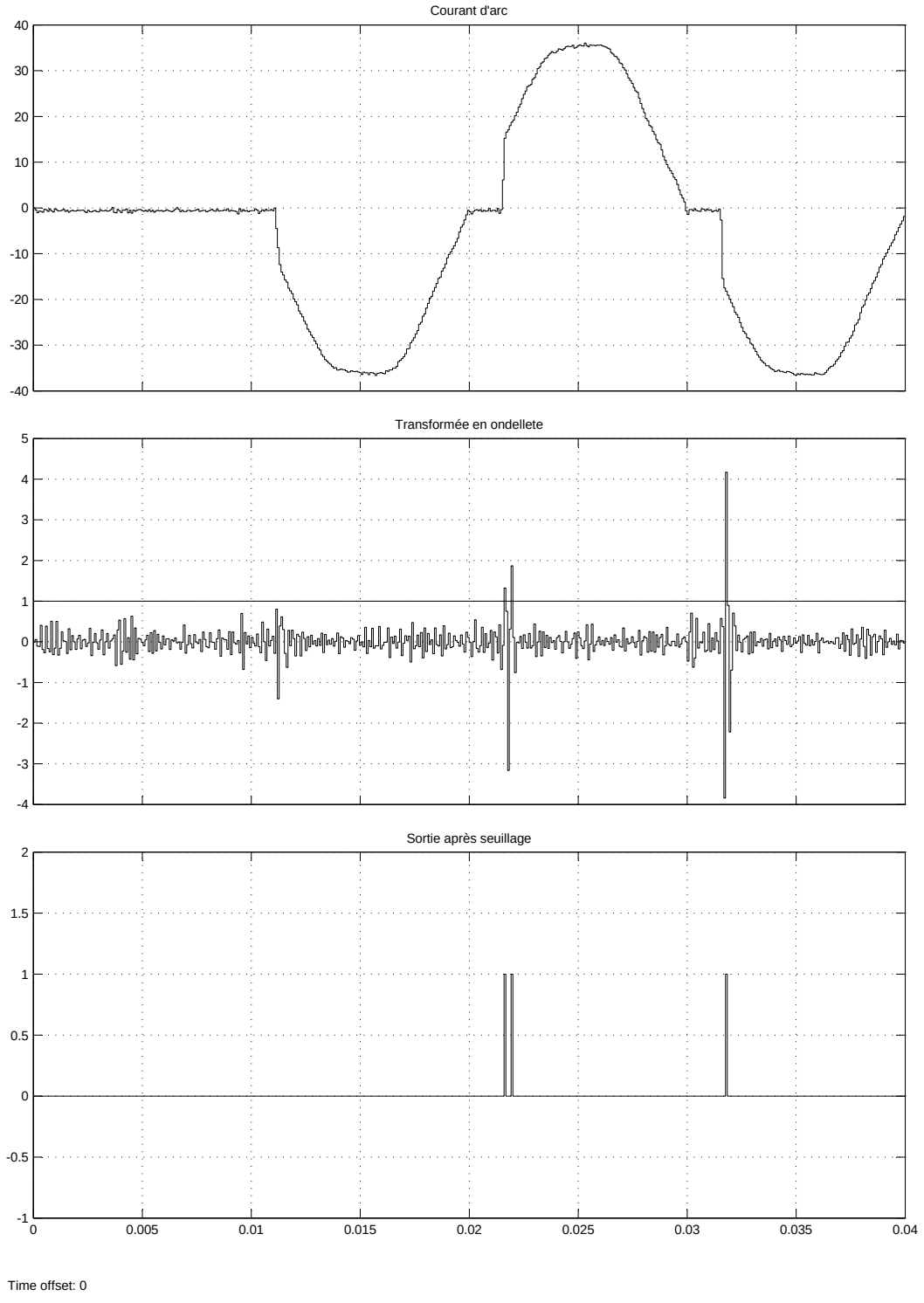


FIG. 5.14 – Détection d'un défaut d'arc par transformée en ondelettes du courant.

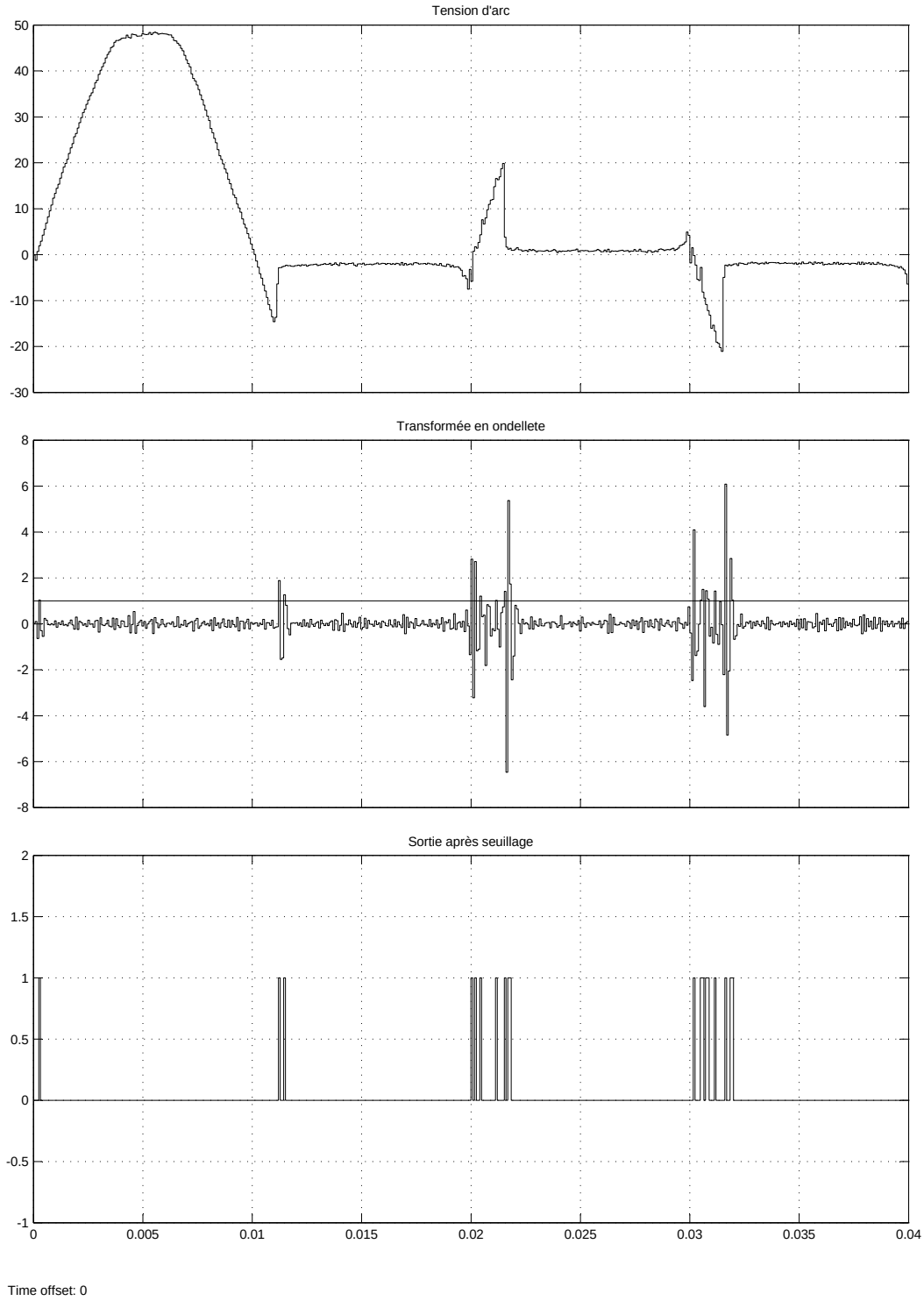
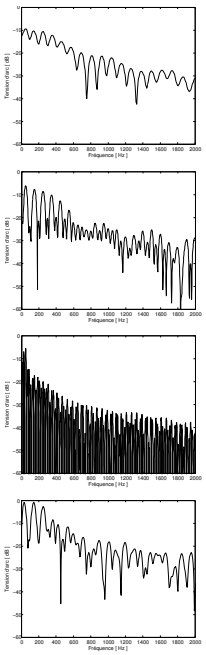
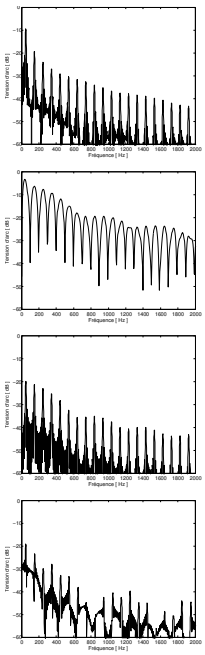
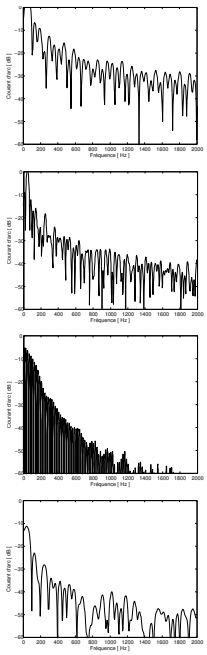
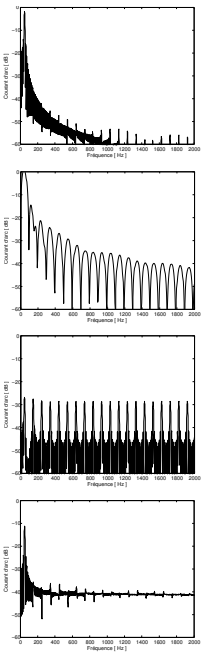


FIG. 5.15 – Détection d'un défaut d'arc par transformée en ondelettes de la tension.

5.3 Détection par analyse spectrale

5.3.1 Principe de fonctionnement

Le principe de la détection fréquentielle est basé sur la composition du contenu fréquentiel des signaux d'arc. L'allure d'une tension d'arc en AC ressemble fortement à celle d'un signal carré, et l'allure du courant à celle d'une sinusoïde. Cela signifie que le spectre de ces signaux doit également posséder une enveloppe similaire. Par exemple, la tension d'arc possède les mêmes harmoniques qu'un signal carré mais avec des amplitudes différentes. Le contenu fréquentiel constitue donc le phénomène observé. Nous avons réalisé à la fois des analyses harmoniques à partir des signaux expérimentaux obtenus au laboratoire et également à partir du méta-modèle. Les résultats obtenus avec les quatre types d'arc est donnée table 5.3.1.

Tension mesurée	Tension simulée	Courant mesuré	Courant simulé
			

TAB. 5.1 – Contenu fréquentiel des signaux de courant et de tension pour les quatre types d'arc.

La plupart des spectres obtenus possèdent à la fois des harmoniques paires et impaires, et l'enveloppe en amplitude varie significativement d'un type d'arc à l'autre. Pour l'instant, il nous est impossible de déterminer dans ces contenus spectraux un phénomène précis qui serait identifiable quel que soit le type d'arc. Donc, la seule possibilité pour la mise en œuvre est de connaitre tous les spectres possibles et de pouvoir les identifier. Cela impose de posséder une base de données d'harmoniques de signaux d'arc. Le problème consiste ici à détecter une composition d'harmoniques et à la comparer à une base de données.

5.3.2 Détection des harmoniques

Nous proposons une méthode originale de détection d'harmoniques basée sur la transformée de Fourier.

La transformée de Fourier numérique d'un signal s'écrit :

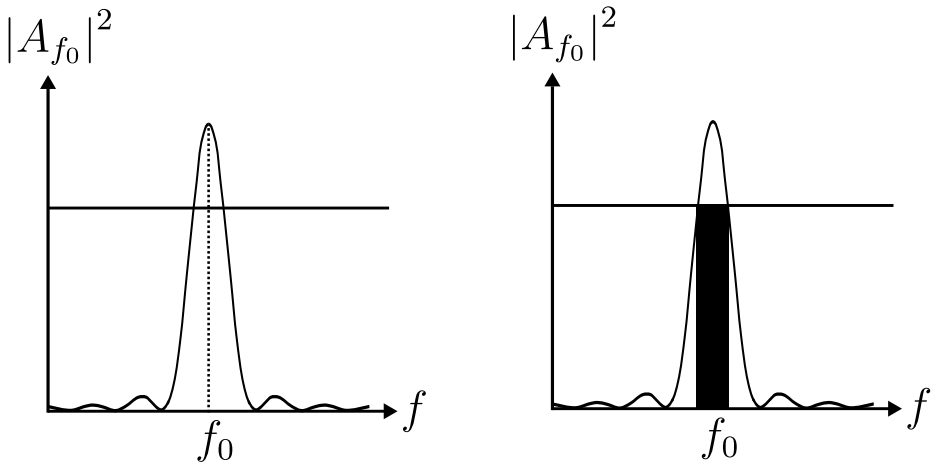
$$S(f) = \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \cdot e^{-\frac{2j\pi fn}{N}} \tag{5.17}$$

N représente le nombre d'échantillons du signal, et f la fréquence d'analyse. Lors d'une analyse complète, ce calcul est répété pour toutes les fréquences souhaitées. Considérons que l'on souhaite détecter une harmonique de fréquence particulière f_0 et que le signal $S(k)$ ne soit constitué que d'une seule fréquence f_0. Donc $S(k) = \sin(2\pi f_0 kTe)$, avec T_e la période d'échantillonnage. Pour détecter une tonalité il suffit d'effectuer le calcul de la transformée uniquement pour la fréquence f_0. Plus précisément, on se limite à la densité spectrale $|A_{f_0}|^2$ qui va donc être donnée par :

$$|A_{f_0}|^2 = Re(S(f_0))^2 + Im(S(f_0))^2 \tag{5.18}$$

$$|A_{f_0}|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \cdot \cos^2(-\frac{2j\pi f_0 n}{N}) + \sum_{k=0}^{N-1} S(k) \cdot \sin^2(-\frac{2j\pi f_0 n}{N}) \tag{5.19}$$

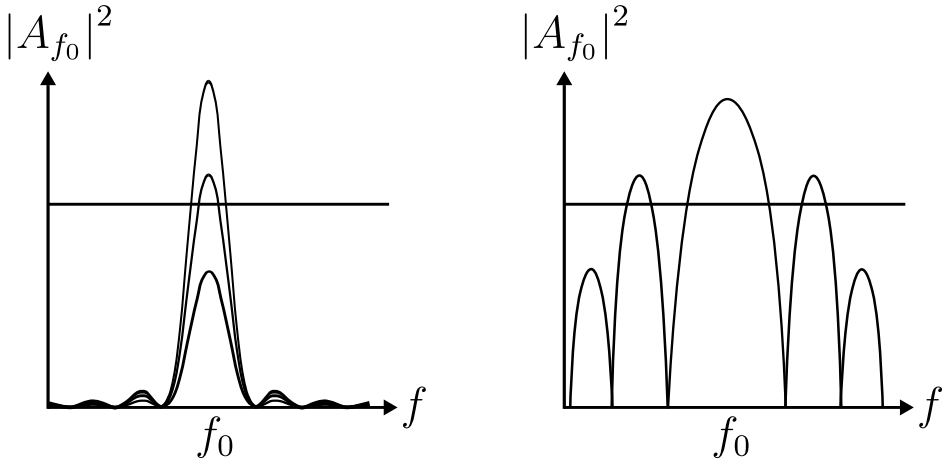
En faisant varier la fréquence f du signal $S(k)$, on peut tracer l'évolution de $|A_{f_0}|^2$, celle-ci est donnée figure 5.16.



(a) Densité spectrale d'énergie pour f_0 (b) Bande de détection

FIG. 5.16 – Évolution de la densité spectrale d'énergie du signal $S(k)$.

Cela signifie qu'à mesure que la fréquence f du signal $S(k)$ se rapproche de f_0, la valeur de la densité spectrale $|A_{f_0}|^2$ tend vers un maximum. Enfin pour détecter la présence de la fréquence f_0, il suffit de positionner un seuil (représenté par la ligne droite de la figure 5.17) sur $|A_{f_0}|^2$. Lorsque ce dernier est franchi la fréquence f_0 est considérée présente.
Avec cette logique à seuil, on constate que, si il existe dans le signal une fréquence proche de f_0 cela peut conduire à une fausse détection de f_0. La figure 5.17 montre le phénomène qui conduit à une plage réelle de détection en fréquence. Ce phénomène peut-être accentué lorsque l'amplitude du signal de fréquence proche est élevée. Dans ce cas $|A_{f_0}|^2$ peut dépasser le seuil comme le montre la figure 5.17 (a). On peut également observer un autre phénomène sur la figure 5.17 (b) lié à l'échantillonnage et au nombres d'échantillons utilisés pour le calcul. Ici, le seuil de détection de fréquence peut être franchi à différentes plages de fréquences du signal $S(k)$.



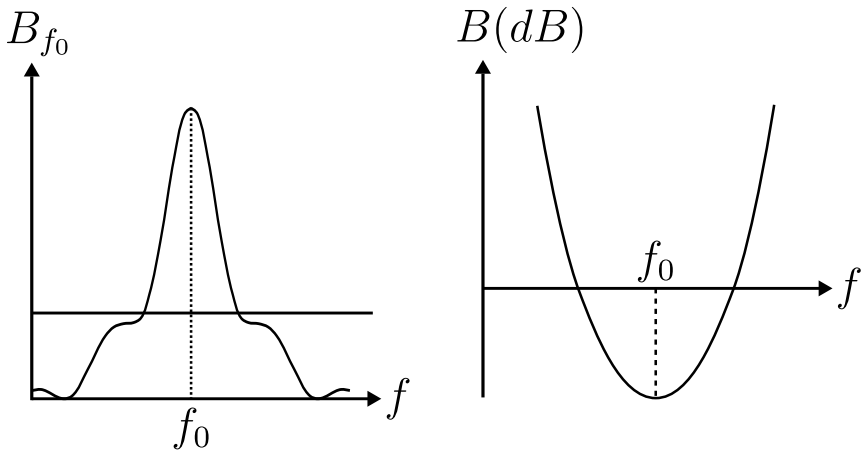
(a) Évolution en fonction de l'amplitude (b) Effet de l'échantillonnage

FIG. 5.17 – Réponse en fréquence d'un détecteur surveillant f_0.

Pour répondre à ce problème, on propose de calculer à partir de trois fréquences de bases f_0, $f_0 + m\Delta f$ et $f_0 - m\Delta f$. La formulation proposée s'écrit :

$$B_{f_0} = \frac{|A_{f_0 - m\Delta f}|^2}{\beta} + |A_{f_0}|^2 + \frac{|A_{f_0 + m\Delta f}|^2}{\beta} \tag{5.20}$$

L'écart de fréquence $m\Delta f$ représente l'écart entre deux fréquences proches et qui dépend de la résolution Δf utilisée pour l'analyse. Le coefficient β est supérieur à 1 et doit être calculé pour que B_{f_0} soit, d'une part, continuellement croissante entre 0 et f_0, et d'autre part, continuellement décroissante entre f_0 et l'infini. Lorsque cette condition est respectée, on obtient la courbe de la figure 5.18 (a).



(a) Allure de B_{f_0} (b) Gabarit de détection

FIG. 5.18 – Réponse spectrale du détecteur et gabarit de détection.

Cette configuration permet de minimiser en partie les problèmes liés à l'échantillonnage, et de s'affranchir de la proximité d'une fréquence parasite (proche de la fréquence a détecter). En faisant varier l'amplitude et la fréquence du signal $S(k)$ on peut tracer le gabarit de détection donné figure 5.18 (b). Il signifie que pour une fréquence donnée du signal $S(k)$, le détecteur réagit en fonction

de l'amplitude $S(k)$. Autrement dit, plus la fréquence de $S(k)$ est éloignée de la fréquence f_0, plus l'amplitude de $S(k)$ devra être importante pour déclencher le seuil. En fonction des paramètres choisit (β, m, Δf et le niveau de seuil), il est tout à faible possible de configurer la détection de l'harmonique f_0 d'un signal $S(k)$ en incluant une gigue de fréquence. Pour ce faire, il suffit de mesurer la fréquence du fondamental et de calculer à nouveau les paramètres de l'équation 5.15 en temps réel. Ce type de détection s'applique efficacement pour les systèmes dont la fréquence fondamentale risque de fluctuer.

5.3.3 Schéma du système de détection

Il est possible de dupliquer ce principe de détection en fonction du nombre d'harmonique à surveiller. Bien entendu, plus le nombre souhaité est élevé plus la quantité de ressources nécessaires sera important. Il est courant de ne s'intéresser qu'aux harmoniques impairs ou pairs du signal à la fois. Pour isoler, les harmoniques (pairs ou impairs) on utilise un filtre « in-between » . Le gabarit idéal du filtre est le suivant :

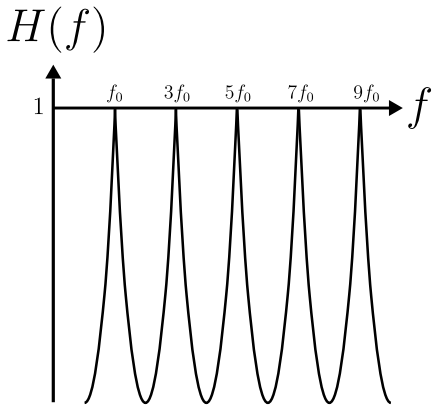


FIG. 5.19 – Filtre « in-between » pour harmoniques impaires.

Lorsqu'une harmonique est détectée, il convient de savoir durant combien de temps cette dernière est présente. Ainsi lorsque le seuil de détection est franchi, un compteur est déclenché pour évaluer le temps de présence de la tonalité. Le schéma global du détecteur est décrit figure 5.20.

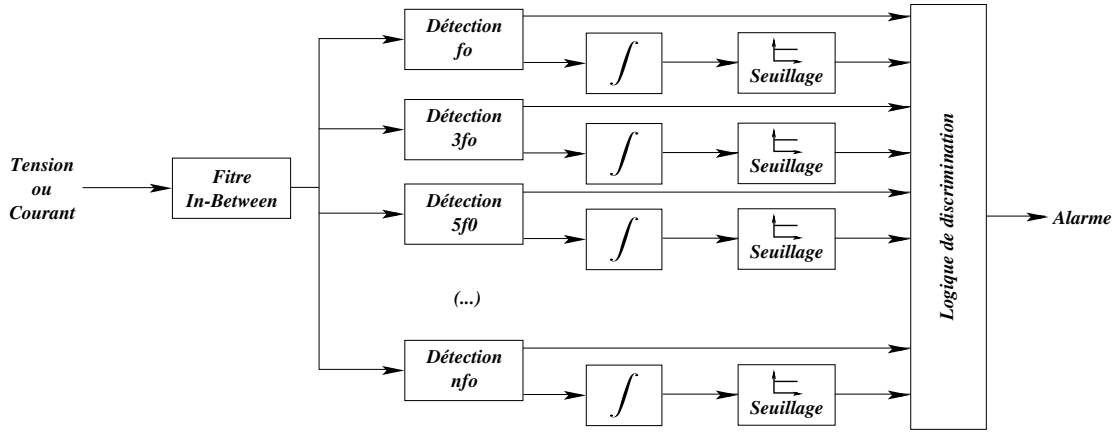


FIG. 5.20 – Schéma de principe d'un détecteur multi-harmonique proposé.

5.3.4 Logique de discrimination

Lorsque l'on observe le schéma de la figure 5.20, on constate que pour chaque harmonique observé, le système de discrimination reçoit deux informations : le niveau de l'harmonique et le temps de présence de cette dernière. En dehors de la contrainte de la courbe de disjonction, le système de discrimination doit, à partir de ces informations, conclure sur la présence d'un arc. Pour ce faire, il existe deux méthodes : soit les niveaux et les temps de présence des tonalités sont comparés à une base de données, soit un algorithme « intelligent » tel que l'algorithme à réseaux de neurones est utilisé pour reconnaitre le spectre d'un arc. Dans les deux cas, le système résultant est conséquent. Avec la première méthode, il faut pouvoir stocker en mémoire tous les cas d'arc ainsi que les leurres sous la forme d'une base de données. Avec la deuxième méthode, l'algorithme « intelligent » doit subir un apprentissage. Cet apprentissage se fait également à partir d'une base de vecteurs d'observation.

5.3.5 Conclusion

Le coût d'implantation de ce système est très élevé, car il faut procéder à un nombre de calculs importants : il faut autant de transformées réduites à trois fréquences par harmonique. Ce système nécessite également des capacités mémoire importante, puisqu'il faut pouvoir stocker la base de données. Ne possédant pas suffisamment d'enregistrements de signaux d'arc, il nous a été impossible de valider ce système notamment en ce qui concerne l'évaluation des taux de détection. Les analyses spectrales réalisées en vue de proposer une logique de discrimination n'ont pas permis de fournir un résultat satisfaisant. C'est pourquoi nous avons décidé de ne pas retenir cette méthode. Cependant, nous pensons qu'une étude spécifique du modèle d'arc proposé, permettrait d'améliorer la compréhension du contenu fréquentiel engendré par la présence d'un arc. Ce contenu n'est pas encore identifié [JL03], c'est pourquoi cette méthode constitue un axe à approfondir.

5.4 Méthode par différenciation temporelle

La méthode par différenciation temporelle peut être comparée à une auto-corrélation. Elle est utile, pour détecter un défaut quelconque et notamment la présence d'un arc. Associée à d'autre algorithmes, elle constitue un moyen efficace pour discriminer les phénomènes périodiques du signal qui peuvent être considérés comme un arc.

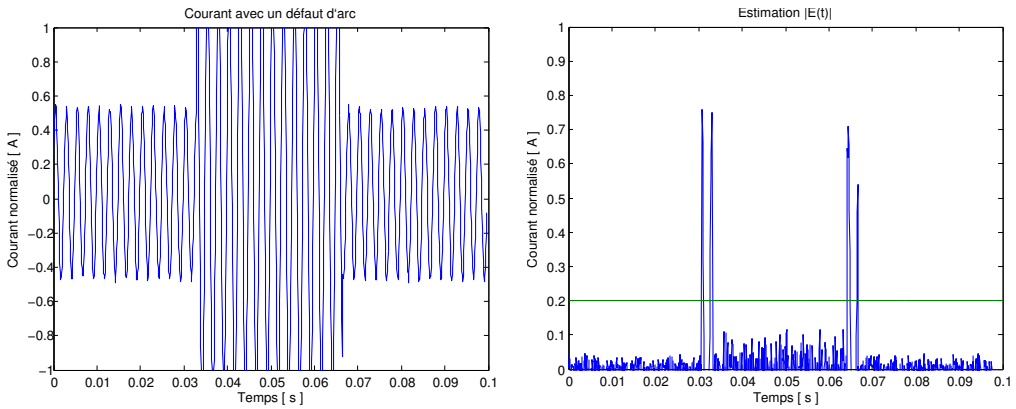
5.4.1 Principe de fonctionnement

Une simple différence notée E est effectuée entre le signal observé $S(t)$ à l'instant présent et la valeur de ce même signal une période T plus tôt :

$$E(t) = |S(t) - S(t - T)| \tag{5.21}$$

(le calcul peut être évalué pour plusieurs périodes du signal : $2T$, $3T$, $4T$, ...). On considère que le signal observé est périodique de période T. Dans ce cas, la différence $E(t)$ est constamment nulle. Si une variation inattendue apparaît dans le signal, alors $E(t)$ n'est plus nulle et devient égale à cette variation. Si cette variation est périodique de la même période que le signal observé, $E(t)$ redevient nulle.

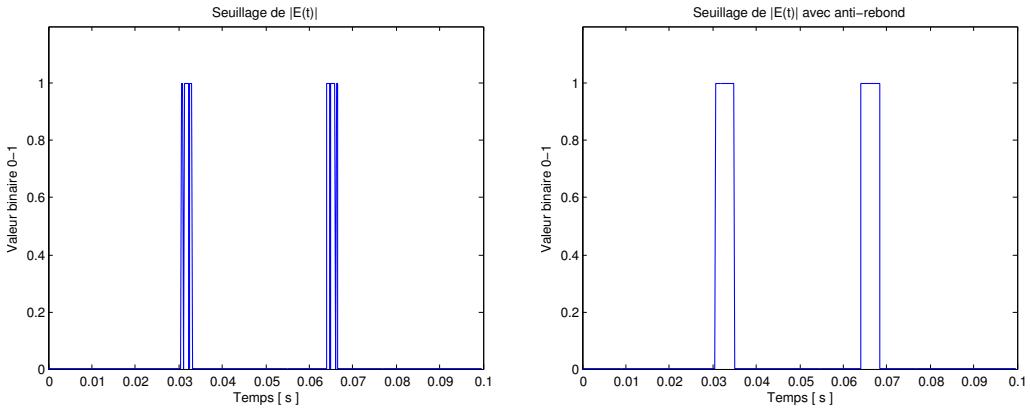
La figure 5.21 (a) montre l'exemple d'un signal de courant bruité (10 % de bruit) où il apparaît une augmentation d'amplitude momentanée. Cette augmentation peut être due à un défaut, mais elle ne correspond pas nécessairement un un défaut d'arc.



(a) Courant quelconque (b) Différence $E(t)$

FIG. 5.21 – Méthode de différenciation appliquée à un signal présentant une variation soudaine d'amplitude [0.03s-0.065].

La figure 5.21 (b) décrit le signal $E(t)$ résultant lorsque la méthode différentielle est appliquée au signal de courant de la figure 5.21 (a). On pourra noter l'apparition de deux pics indiquant qu'il y a une différence importante dans le courant. Ils se situent exactement aux instants où le courant présente une variation significative. On définit alors un seuil de détection (ligne verte sur la figure 5.21 (b)). Le franchissement du seuil par $E(t)$ indique la présence d'une variation à cet instant. Le seuillage sur $E(t)$ permet d'obtenir le signal de la figure 5.22 (a). Le signal de la figure 5.22 (b) est obtenu par l'application d'un système « anti-rebond » supplémentaire. Ce dernier résultat constitue un indicateur logique de la présence de variations significatives dans le signal.

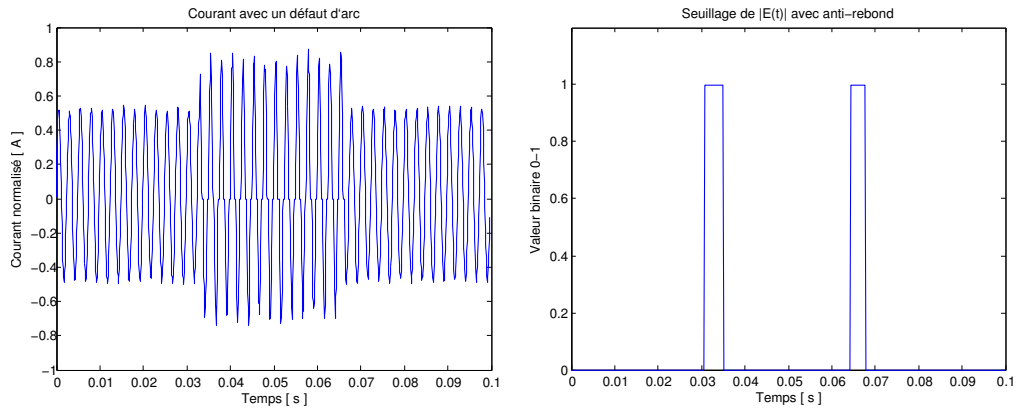


(a) Seuillage de $E(t)$ (b) Seuillage de $E(t)$ avec anti-rebond

FIG. 5.22 – Résultat de la méthode de différenciation après binarisation par seuillage.

5.4.2 Application à la détection de défaut d'arc

On teste à présent cet algorithme pour traiter un défaut d'arc. La figure 5.23 (a) présente un défaut d'arc simulé avec Matlab. Ce défaut comprend une augmentation de l'amplitude du courant et il contient des passages à zéro du courant caractéristiques d'un défaut d'arc.



(a) Courant avec défaut d'arc (b) Résultats du traitement

FIG. 5.23 – Application du traitement à un signal présentant un défaut d'arc.

Cette technique permet de discriminer un signal d'arc qui apparaîtrait dans un signal d'allure proche de celle d'un signal d'arc. Le signal binaire de sortie issu du traitement indique la présence de défauts d'arc et délivre précisément l'instant de départ et de fin du défaut.

5.4.3 Application sur un signal leurre

Un signal leurre est un signal dont l'allure ressemble fortement à celle d'un arc électrique. Des exemples de signaux leurres sont données en figure 5.24.

Le signal leurre se retrouve par exemple dans un circuit comprenant un composant du type diac ou triac. Le schéma de la figure 5.25 (a) montre un circuit qui produit un signal leurre. L'allure du courant de la figure 5.25 (b) est identique à celle d'un courant d'arc du type 1 ou 2.

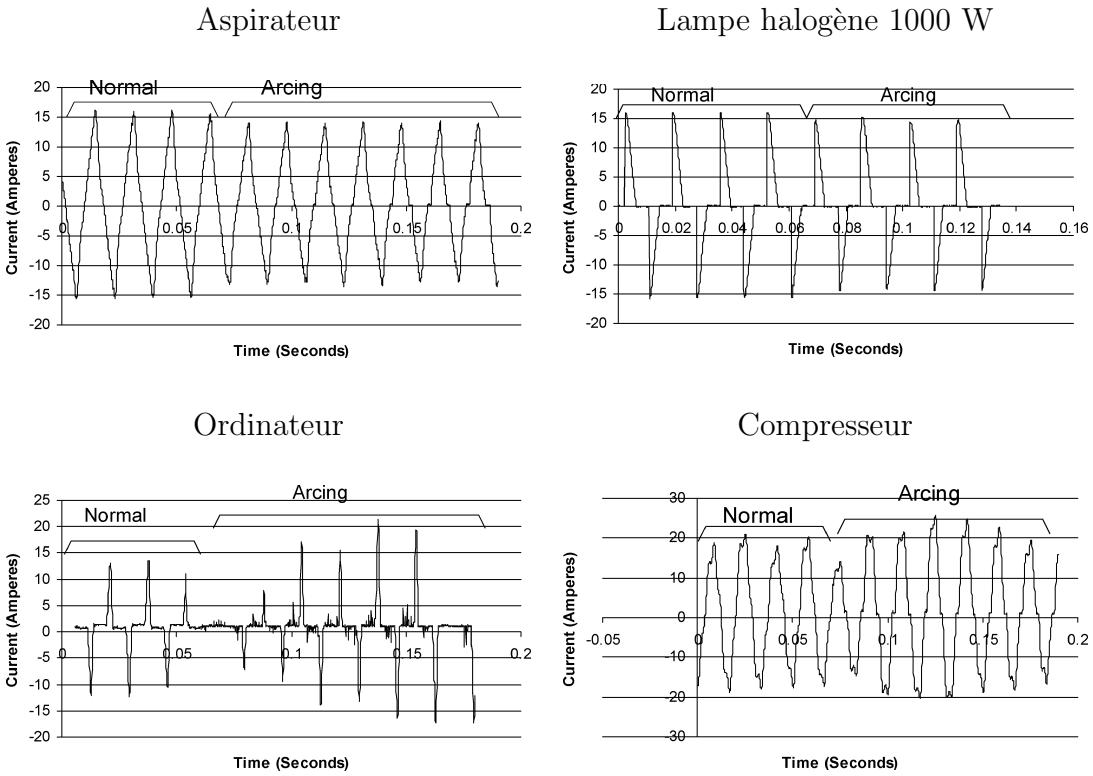
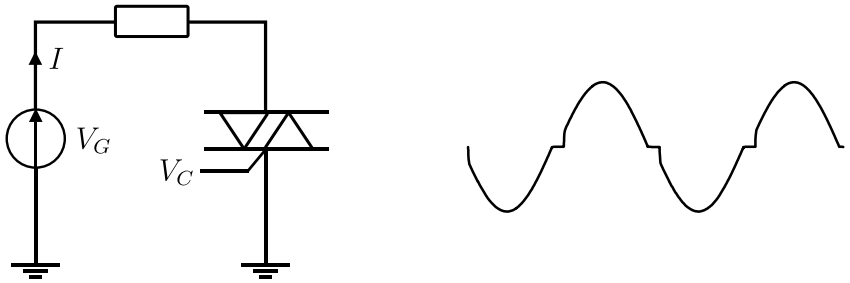


FIG. 5.24 – Signaux de courant leurres. Figures extraites de [GWD03]

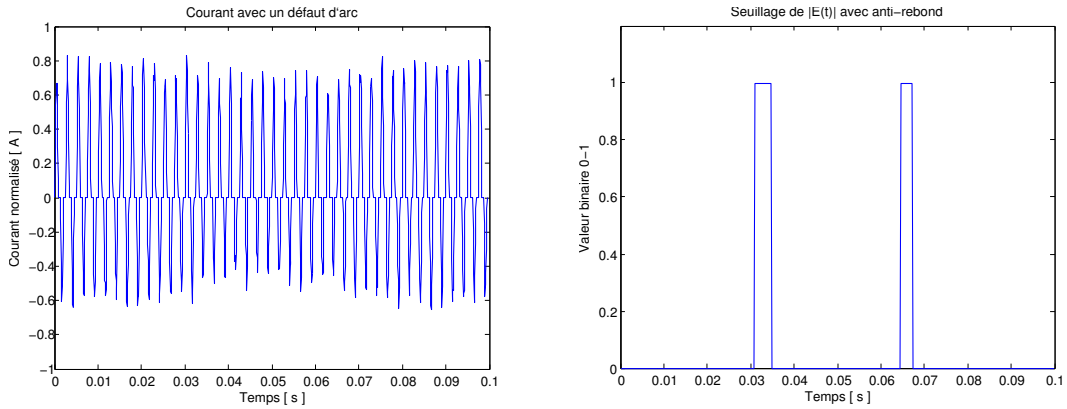


(a) Schéma leurre (b) Signal de courant leurre

FIG. 5.25 – Circuit permettant de leurrer un algorithme de détection.

Nous testons à présent cette méthode de détection sur un signal délivré par un circuit triac et comportant un défaut d'arc. La figure 5.26 (a) présente un courant de type triac simulé avec Matlab, dans lequel un défaut d'arc est survenu. On sait qu'un signal de courant d'arc se compose de passages périodiques à zéro tout comme un signal de courant d'un système à triac. Lorsqu'un arc apparait dans un signal de type triac, la durée de ce passage à zéro fluctue. Elle ne dépend plus uniquement du circuit comportant le triac mais également des caractéristiques de l'arc électrique. Cette variation est détectée avec notre méthode. Le résultat, donné figure 5.26, est obtenu dans le cas où le niveau de bruit est important (environ 12 %) et lorsque la variation du temps de passage à zéro est faible lors de l'apparition du défaut d'arc (5 %).

Les résultats montrent que la méthode permet de discriminer un signal d'arc confondu dans un signal qui lui ressemble. Il faut cependant noter que si le seuil de détection appliqué est mal choisi, la sortie peut éventuellement changer d'état intempestivement lorsque la variation de la durée du



(a) Courant de type triac avec défaut d'arc (b) Résultats du traitement

FIG. 5.26 – Application à un défaut d'arc simulé avec le méta-modèle.

passage à zéro du courant devient faible. Cela signifie que la variation du passage à zéro du courant ne doit pas être inférieure à une valeur minimale. Cette valeur étant définie indirectement par le niveau du seuil.

5.4.4 Simulation sous Matlab

Les simulations sont effectuées avec Matlab sur des signaux d'arc réels obtenus avec le GDARC. Les résultats sont donnés figures 5.27 et 5.28 qui comportent chacune quatre courbes :

- la première courbe représente le signal filtré préalablement avec un filtre CIC,
- la deuxième indique l'état du signal une période auparavant. Comme la durée représentée ici correspond approximativement à deux périodes, la première moitié de cette courbe représente une période. On remarque que pendant ce laps de temps le signal est nul. En effet ceci est lié au fait que le signal une période avant n'existe pas au démarrage de l'algorithme. **Ainsi, la première sortie fournie après le démarrage de l'algorithme sera toujours non représentative**.
- La troisième courbe présente la différence entre les deux premières ainsi que le seuil de détection.
- Enfin, la quatrième et dernière courbe correspond à l'indicateur de sortie du traitement.

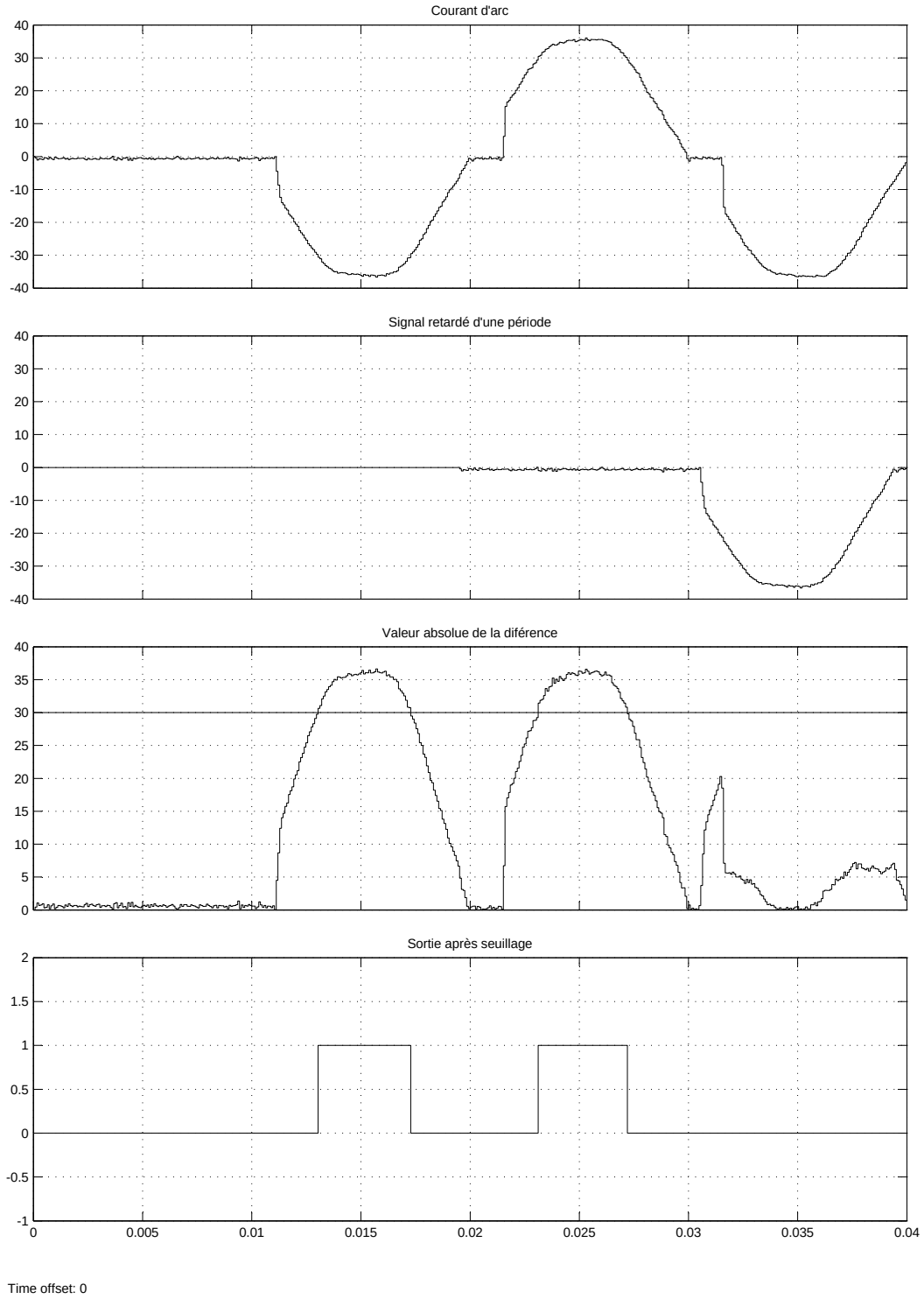


FIG. 5.27 – Détection d'un défaut de courant d'arc par méthode de différenciation temporelle.

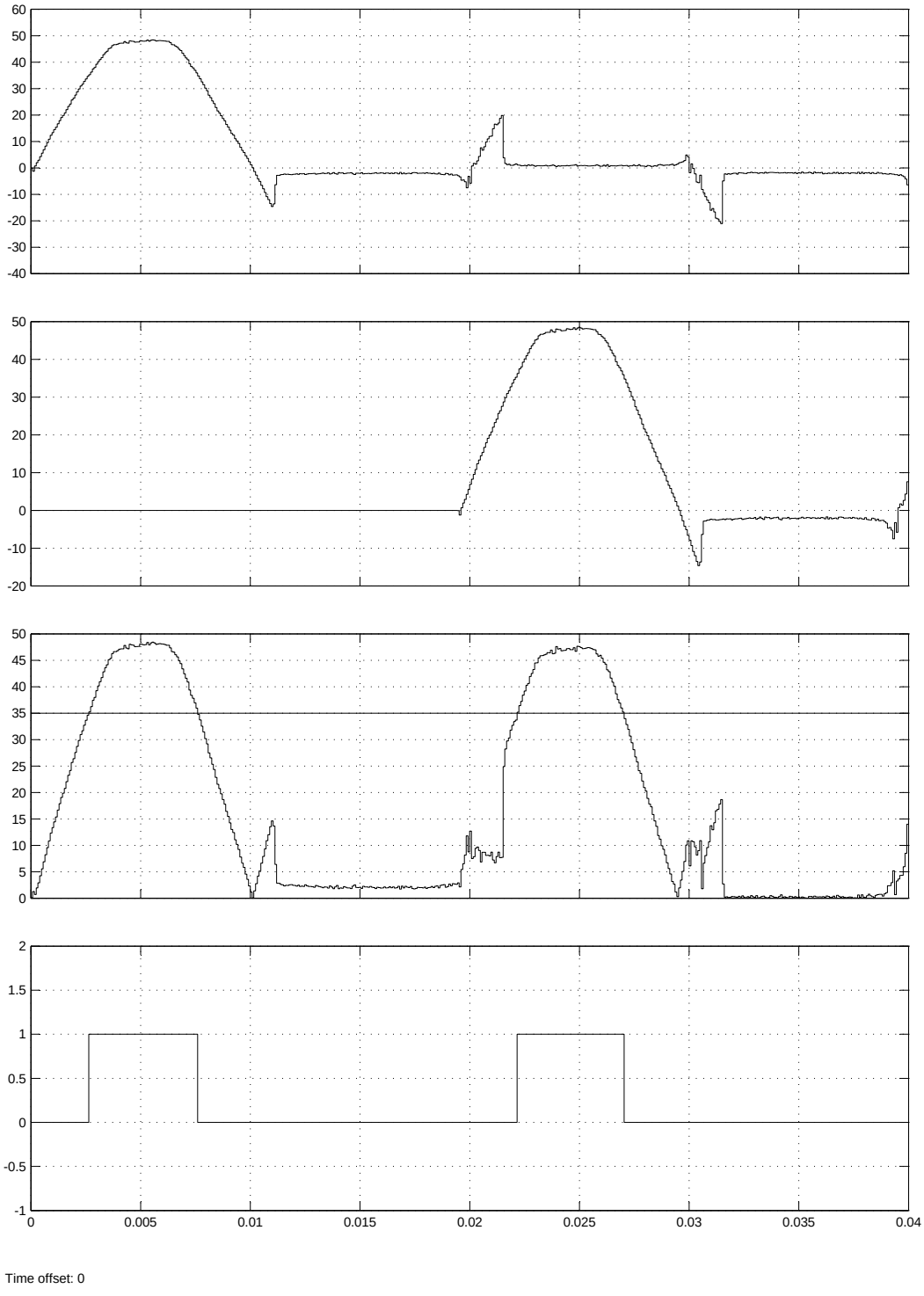


FIG. 5.28 – Détection d'un défaut de tension d'arc par méthode de différenciation temporelle.

5.5 Algorithme d'interpolation pour la détection

Nous présentons ici une méthode de détection basée sur le sur-échantillonnage des signaux. Elle fait partie des méthodes de prédictions temporelles. Elle présente l'avantage d'être peu couteuse en implantation et fournit de bons résultats. Il s'agit, plus exactement d'une méthode d'interpolation que l'on va utiliser pour effectuer une prédiction du signal. Le signal d'erreur est ensuite calculé en effectuant la différence entre le signal réel et le signal prédit. La présence d'un défaut d'arc est souvent caractérisée par une variation brutale du signal (soit une chute de tension, soit une élévation de courant) qui induit l'apparition d'un écart. Lorsque l'écart est trop important, un signal d'alarme est déclenché.
Cette méthode est basée sur les équations d'interpolation de Lagrange. Cette méthode s'avère particulièrement efficace si le signal est continu.

5.5.1 Équations de Lagrange

Il est possible d'interpoler une courbe avec quelques points d'un signal à partir des équations de Lagrange. Lagrange définit la fonction polynomiale $P_n(t) = a_n t^n + a_{n-1}t^{n-1} + \cdots + a_1 t^1 + a_0$. Les coefficients a_n sont calculés à partir des équations suivantes :

$$L_m(t) = \prod_{i=0;i\neq m}^{n} \frac{t - t_i}{t_m - t_i} \tag{5.22}$$

$$P_n(t) = \sum_{m=0}^{n} P_n(t_m) \cdot L_m(t) \tag{5.23}$$

Où :
- $P_n(t_m)$ sont les points de collation (ou point d'appui).
- n l'ordre du polynôme.
- $n+1$ le nombre de points d'appuis.
- m est l'index des instants t_m tel que $m \in \{0, 1, ..., n\}$.

5.5.2 Application pour le traitement du signal

Pour appliquer la méthode de Lagrange aux systèmes temps réels on définit t_m tel que $t_m - t_{m-1} = T_{in}$. Dans ce cas, un point d'appui peut être considéré comme un échantillon du signal x_k. Le polynôme $P_n(t)$ est donc la fonction qui passe par les $(n+1)$ échantillons du signal d'entrée. Nous pouvons alors calculer un nombre N d'échantillons supplémentaires entre deux échantillons du signal d'entrée. Pour ce faire, nous introduisons un nouvel index temporel j qui représente le temps entre deux échantillons interpolés. Les équations de Lagrange peuvent être réécrites :

$$P_n(j) = \sum_{m=0}^{n} x_{k-(n-m)} \cdot L_m(j) \tag{5.24}$$

$$L_m(j) = \frac{1}{N^n} \prod_{i=0;i\neq m}^{n} \frac{j - iN}{m - i} \tag{5.25}$$

On constate que $P_n(j)$ est l'équation d'un filtre à réponse impulsionelle finie où les $L_m(j)$ sont des coefficients variables. En pratique, l'implantation peut-être réalisée en utilisant une architecture classique comme celle donnée en figure 5.29 qui représente une interpolation numérique entre les

échantillons x_k, x_{k-1}, x_{k-2}. Les coefficients du filtre $L_m(j)$ sont stockés dans une mémoire ROM (figure 5.29).

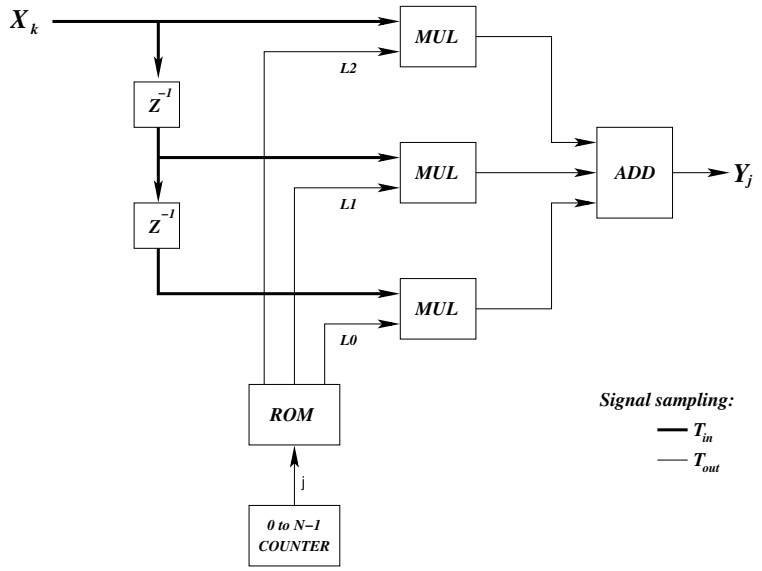


FIG. 5.29 – Structure d'un filtre RIF interpolateur d'ordre 2.

Le principe peut-également être amélioré si l'on prend en compte les phénomènes de discontinuités des dérivés liés à l'utilisation de cet algorithme. La méthode consiste à réaliser simultanément deux interpolations pour chaque nouvel échantillon entrant comme illustré figure 5.30. Les valeurs communes issues des deux interpolations sont moyennées pour obtenir la valeur finale.

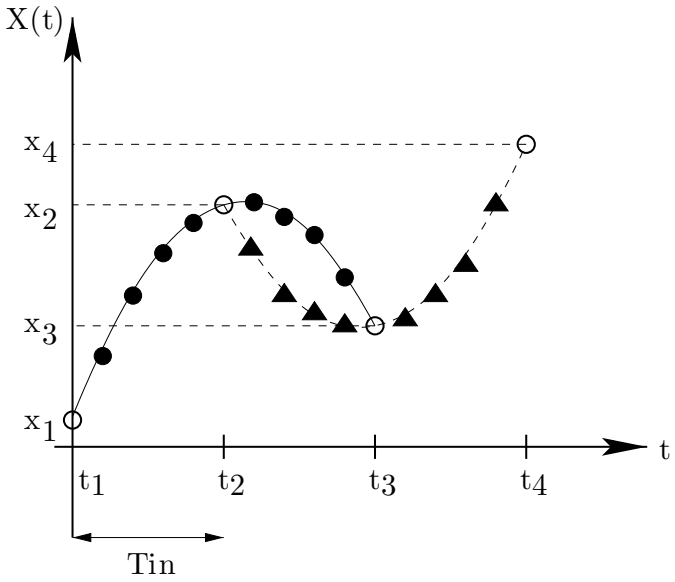


FIG. 5.30 – Principe de l'interpolation moyennée.

○ : points de collation, ● : premiers points interpolés, ▲ : seconds points interpolés.

On obtient ainsi l'équation du filtre interpolateur moyenné :

$$y_j = \sum_{m=0}^{2n-1} (x_{k-(2n-1-m)} \cdot G_m(j)) \tag{5.26}$$

Si $m < n$:

$$G_m(j) = \frac{1}{nN^n} \sum_{p=0}^{n} \left(\prod_{i=0; i \neq m-p}^{n} \frac{j + (n-1-p-i)N}{m-p-i} \right) \tag{5.27}$$

Sinon, si $m \geq n$ on utilise la symétrie des coefficients en remplaçant j par $N - j$.

5.5.3 Architecture de Farrow

Farrow propose une autre architecture pour ce filtre [FAR88] en introduisant un délais fractionnaire D. De sorte que $j = ND$. D est constamment inférieur à 1 d'où le nom de délai fractionnaire. En remplaçant j dans l'équation 5.27, on peut déterminer la nouvelle équation du filtre en fonction de D. Par exemple, pour un filtre interpolateur moyenné d'ordre deux on obtient :

$$z^{-D}Y(z) = C_0(z) + C_1(z) \cdot D + C_2(z) \cdot D^2 \tag{5.28}$$

avec :

$$\begin{aligned} C_0(z) &= z^{-2} \\ C_1(z) &= \frac{-1}{4} + \frac{5}{4}z^{-1} - \frac{3}{4}z^{-2} - \frac{1}{4}z^{-3} \\ C_2(z) &= \frac{1}{4} - \frac{1}{4}z^{-1} - \frac{1}{4}z^{-2} + \frac{1}{4}z^{-3} \end{aligned}$$

Ce qui conduit à l'architecture du filtre du second ordre de la figure 5.31, dont les réponses en gain et en phase en fonction du délai sont données figure 5.32.

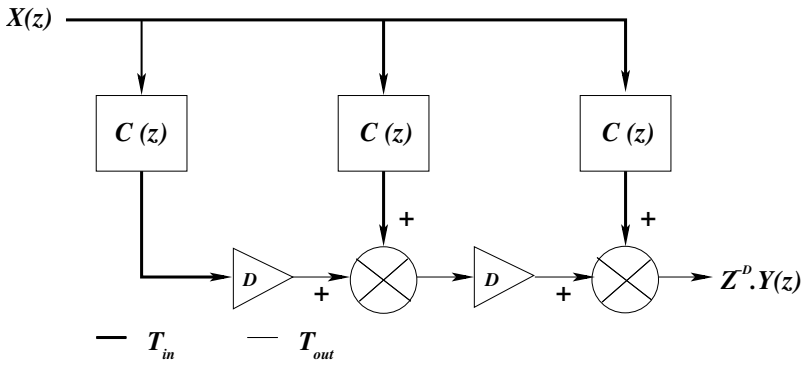
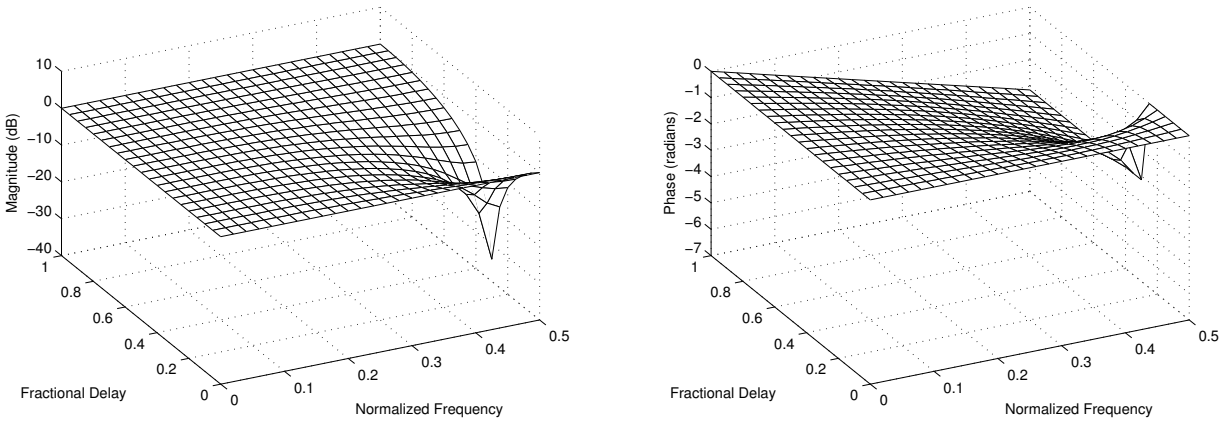


FIG. 5.31 – Architecture de Farrow du second ordre.



(a) Gain du filtre moyenné (b) Phase du filtre moyenné

FIG. 5.32 – Représentation de la fonction de transfert du filtre en fonction du délai D.

5.5.4 Application à la détection

Filtre extrapolateur

Afin d'appliquer le filtre précédant à la détection d'arc, il convient de l'utiliser en extrapolateur. Pour cela, on fait varier le délai fractionnaire D avec des valeurs supérieures à 2. Le filtre produit en temps réel une prédiction des échantillons du signal. En effet, si le délai varie entre 0 et 1 alors l'interpolation se fait pour des échantillons de sortie survenant entre les échantillons X_{k-1} et X_{k-2}. En revanche si le délai varie entre 2 et 3, alors le filtre devient extrapolateur et fournit une sortie pour les échantillons entre X_k X_{k+1}. Comme les formules de Lagrange utilisent des polynômes, une sinusoïde, ou toutes autres allures similaires, seront correctement estimées par le filtre. Mais si un défaut survient dans le signal, en particulier s'il est composé de hautes fréquences, l'estimation du filtre est erronée. C'est la différence entre l'estimation et la valeur réelle d'un échantillon qui indique la présence d'un défaut.
Pour effectuer ce traitement on décide d'extrapoler les 10 échantillons à venir puis on effectue la différence comme indiqué sur le schéma de la figure 5.33 suivante :

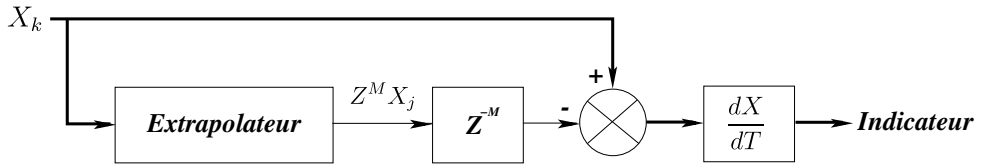
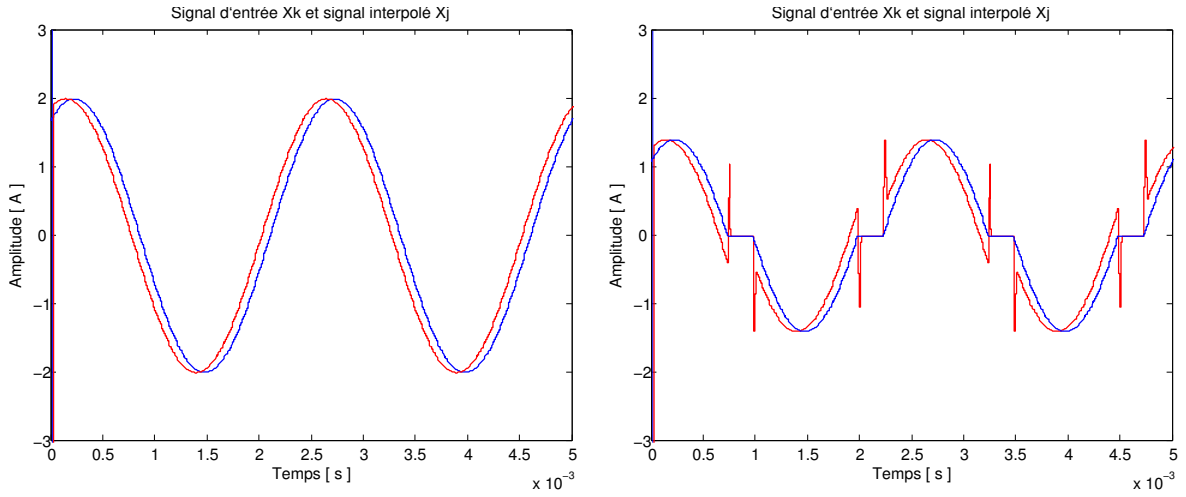


FIG. 5.33 – Schéma de principe de détection utilisant le filtre extrapolateur.

La méthode est testée sur un signal de courant sinusoïdal d'amplitude 2A et de fréquence 50 Hz, échantillonnée à 100 kHz et extrapolée à une fréquence 32 fois supérieure, c'est-à-dire 3.2 MHz. L'extrapolation est réalisée pour la prédiction de 10 échantillons du signal, ce qui représente 320 valeurs calculées. La figure 5.34 (a) montre que le signal obtenu est bien en avance de phase

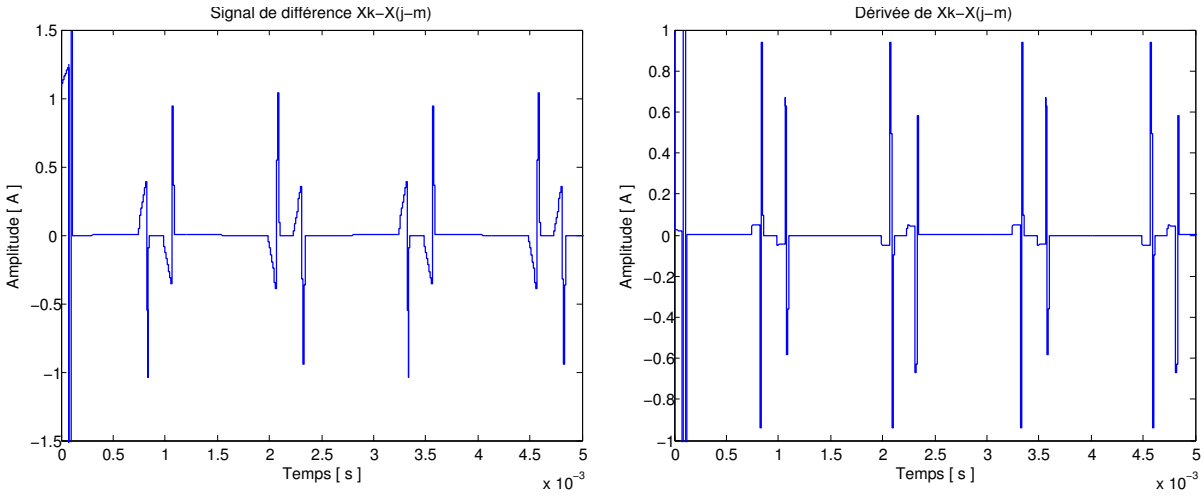
Lorsque l'on présente à l'entrée un signal d'arc en courant, on obtient le résultat de la figure 5.34 (b). Cette figure présente le signal d'arc ainsi que le signal extrapolé. On notera que le signal d'arc au moment du passage à zéro comporte une discontinuité.



(a) Courant sinusoïdale (b) Courant d'arc

FIG. 5.34 – Signaux en entrée (bleu) et en sortie (rouge) de l'extrapolateur.

La figure 5.35 (a) représente la différence entre le signal extrapolé et le signal d'entrée. Celle-ci comporte comporte des discontinuités liées au passage à zéro du courant d'arc. Comme l'extrapolateur est basé sur l'estimation par polynôme, une discontinuité ne pourra être estimée correctement. Il apparait alors successivement un pic positif suivit deux pics de polarité inverse sur le signal de différence. Ces pics constituent à eux seuls un indice de présence de l'arc. Le signal prédit restant sinusoïdal, les méplats caractéristiques du courant d'arc aux passages à zéro engendrent un signal d'erreur qui croît de façon quasiment linéaire. Une dérivation du signal d'erreur aboutit au résultat donné figure 5.35 (b). Après élimination des pics, on obtient un signal carré indicateur de la présence d'un arc.



(a) Signal de différence (b) Dérivée de la différence

FIG. 5.35 – Signaux d'arc en entrée (bleu) et en sortie (rouge) de l'extrapolateur.

L'inconvénient majeur de cette méthode est qu'elle nécessite un signal très peu bruité. En effet, si le signal comporte un minimum de bruit (10 %), alors la prédiction des échantillons extrapolés devient erronée.

Filtre interpolateur et simulation

Afin de s'affranchir des problèmes cités précédemment, on procède à une variante : on utilise le filtre en mode interpolateur. Cependant, de part la nature du filtre, la sortie ne pourra pas être calculée sans retard comme pour la première méthode. La figure 5.36 présente le schéma général de la méthode. Le schéma est constitué d'un échantillonneur-bloqueur (EB), du filtre interpolateur et d'une différenciation. Le principe consiste à sous-échantillonner le signal afin de réduire l'information. Ensuite, l'interpolation de ce signal sous échantillonné est effectuée afin de reconstruire l'information manquante. Si le signal possède une allure sinusoïdale, la sortie du filtre interpolateur fournit également une sortie sinusoïdale. Enfin une différence est effectuée entre le signal réel et le signal estimé. Si la différence excède un seuil définit la sortie est affectée à 1 (figure 5.36 4). La valeur du seuil est fixée arbitrairement, néanmoins elle est choisie de telle sorte qu'elle soit supérieure au niveau de bruit introduit par la méthode en l'absence de toutes perturbations sur le signal. Les résultats de simulations, donnés figures 5.37, et 5.38 sont obtenus à partir de signaux réels d'arc.

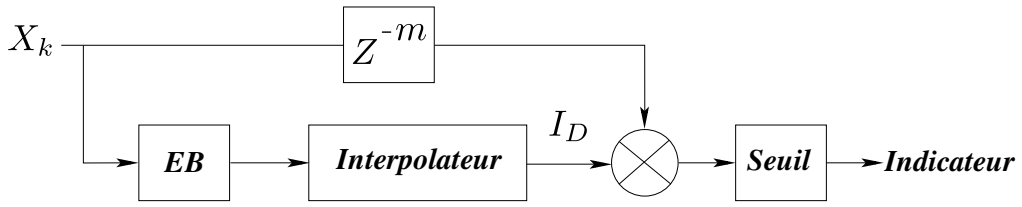


FIG. 5.36 – Principe de détection utilisant le filtre interpolateur.

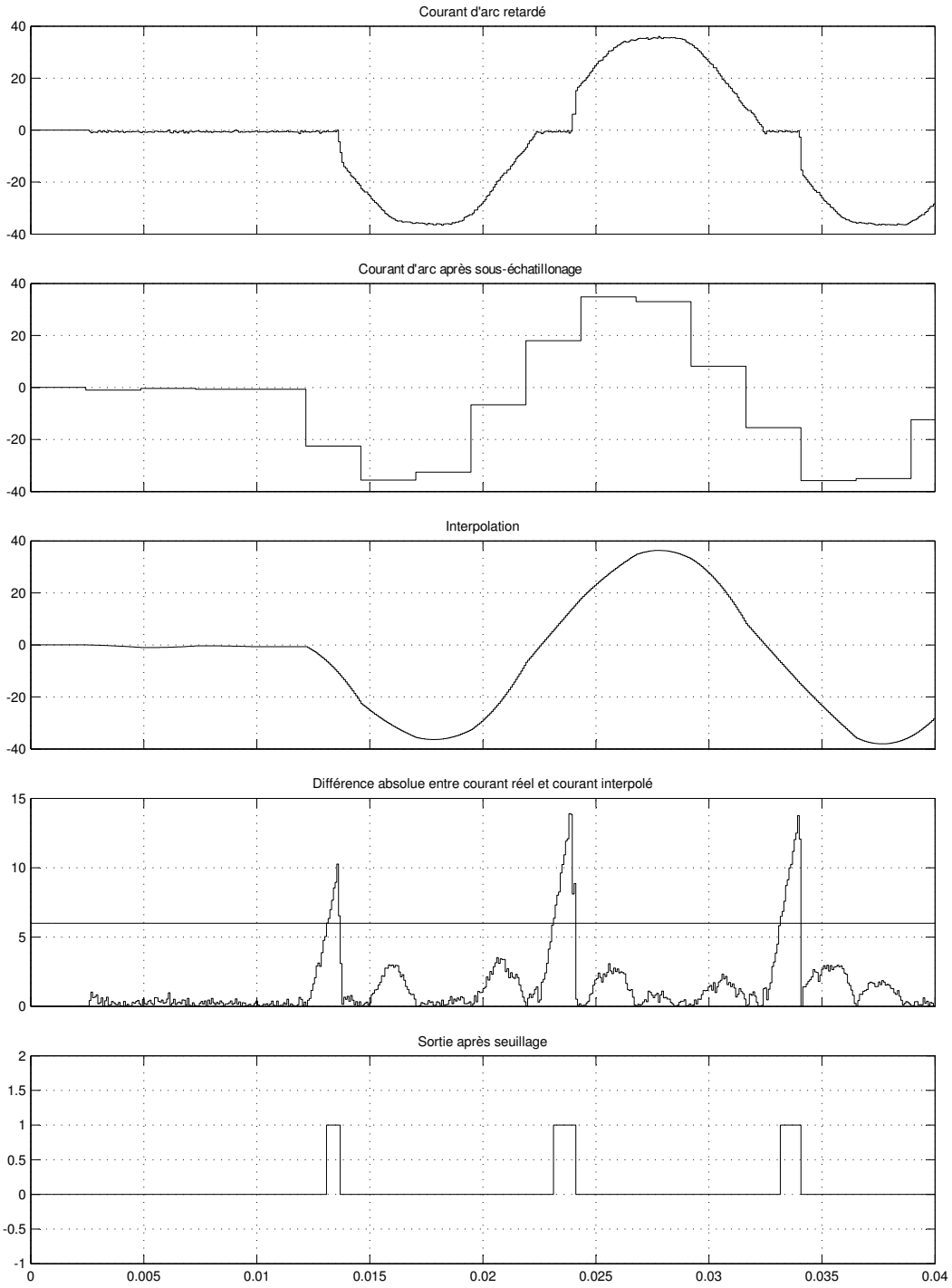


FIG. 5.37 – Détection d'un défaut d'arc par méthode d'interpolation du courant.

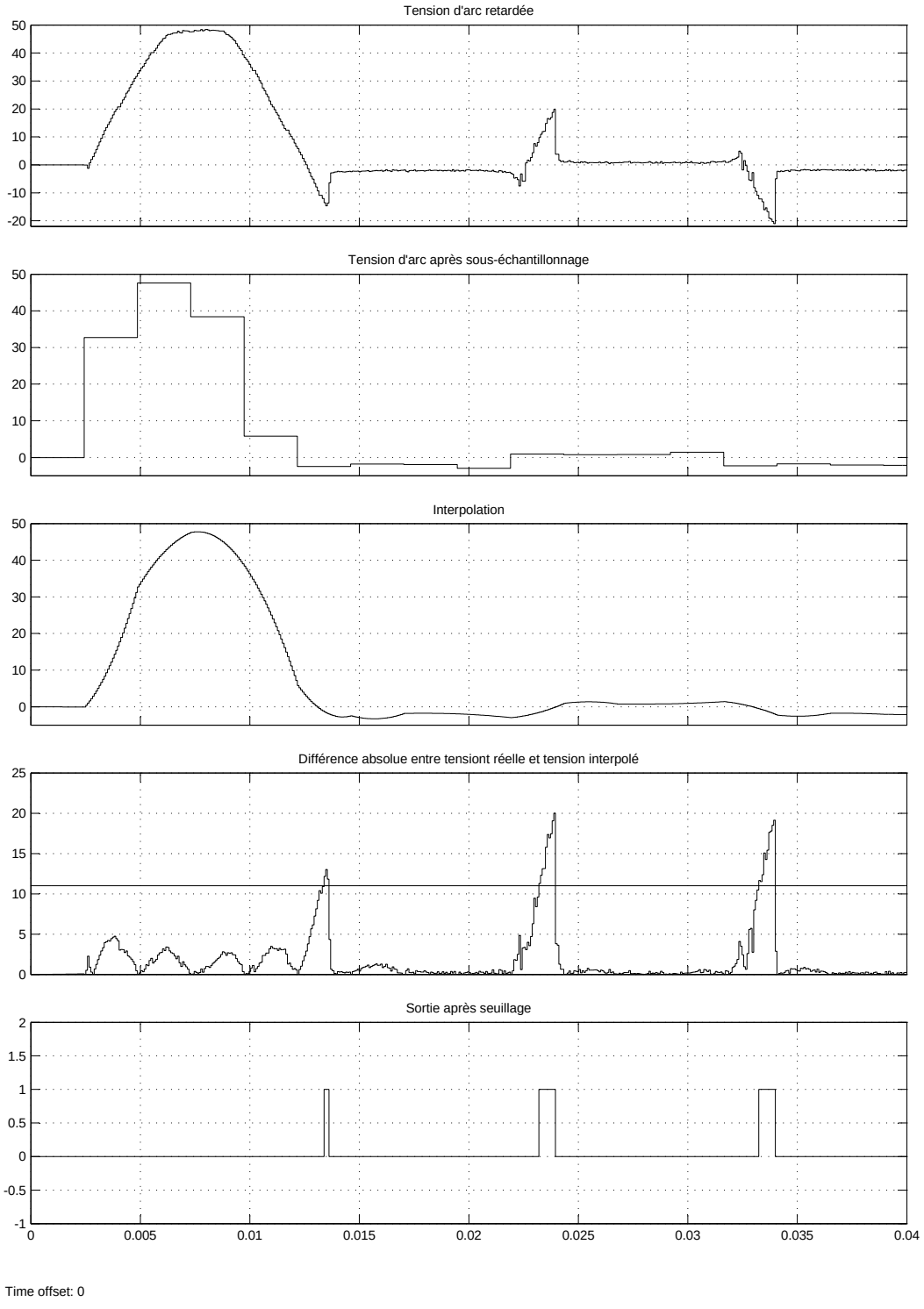


FIG. 5.38 – Détection d'un défaut d'arc par méthode d'interpolation de la tension.

5.6 Algorithme de détection basé sur la dérivée

Dans la pluspart des articles mais également dans les brevets [S99][LR01][P99], la dérivée du signal de courant est utilisée pour réaliser la détection. Cette dérivée peut être soit calculée à partir du signal, soit directement fournie par le capteur de courant. C'est notamment le cas pour les capteurs de courant utilisant un tore de Rogowski qui délivre en sortie une tension proportionnelle à la dérivée du courant.
Le calcul de la dérivée est rarement appliqué seul pour réaliser la détection, il est souvent utilisé comme complément. Le signal dérivé peut également servir de support, de sorte que les algorithmes de détection sont employés sur le signal dérivée à la place du signal lui-même. Ce qui est le cas lorsque le capteur est un tore de Rogowski.
La détection simple à partir de la dérivée s'effectue par un seuillage. Comme la dérivée est sensible au bruit du signal, un filtre CIC est utilisé avant d'effectuer le calcul. Les signaux des figures 5.39 et 5.40 présentent les résultats du traitement sur des signaux réel d'arc.

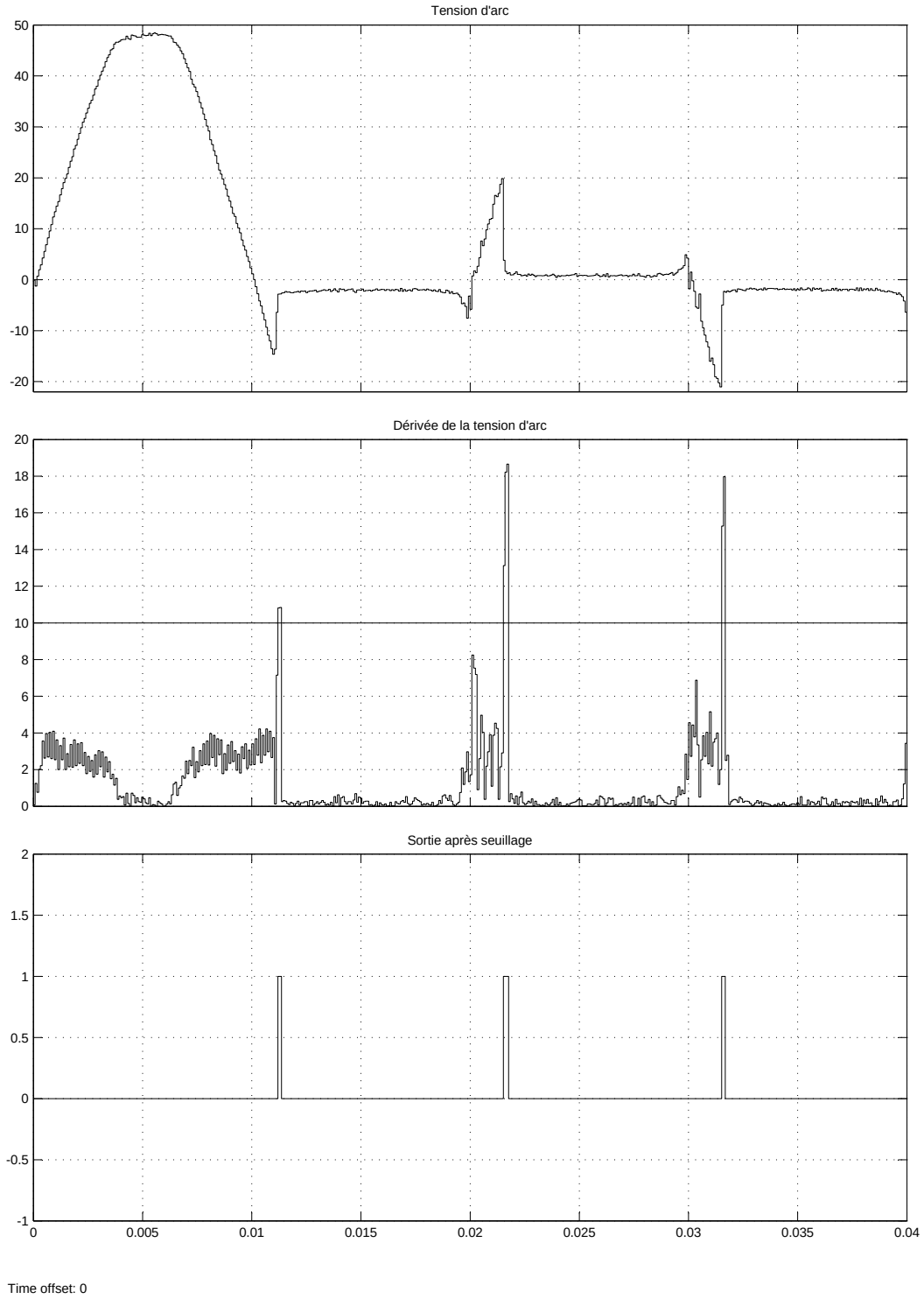


FIG. 5.39 – Détection d'un défaut d'arc par méthode de la dérivée de la tension.

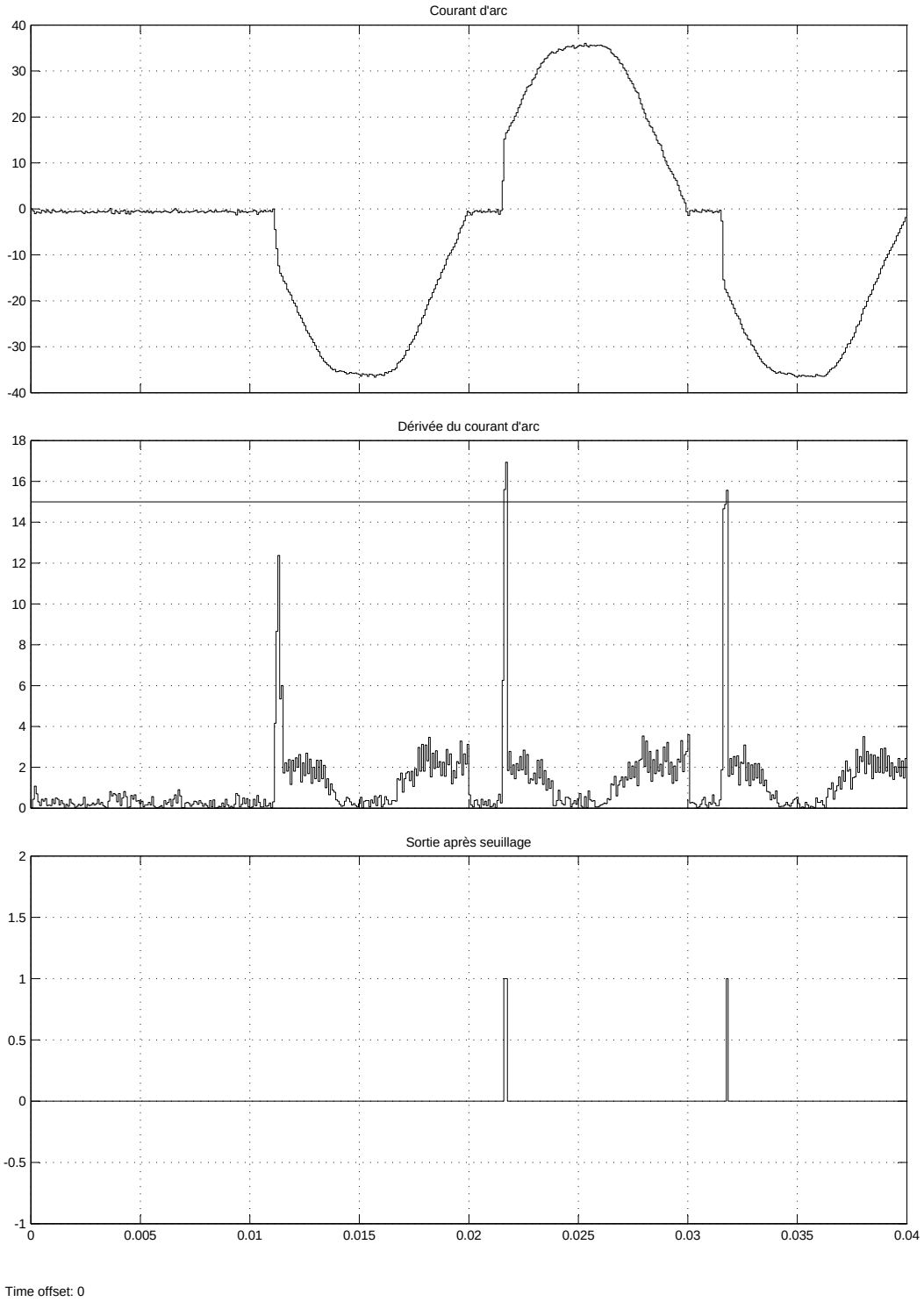


FIG. 5.40 – Détection d'un défaut d'arc par méthode de la dérivée du courant.

5.7 Comparaison des simulations des algorithmes

Afin de déterminer les performances des algorithmes, ces derniers ont été testés sur des signaux réels selon la classification présentée dans le chapitre trois.

5.7.1 Simulation Matlab

Nous avons simulé le détecteur dans son ensemble avec un modèle Matlab proche de la réalité et ce avec des signaux réels. Son schéma général est donné figure 5.41 :

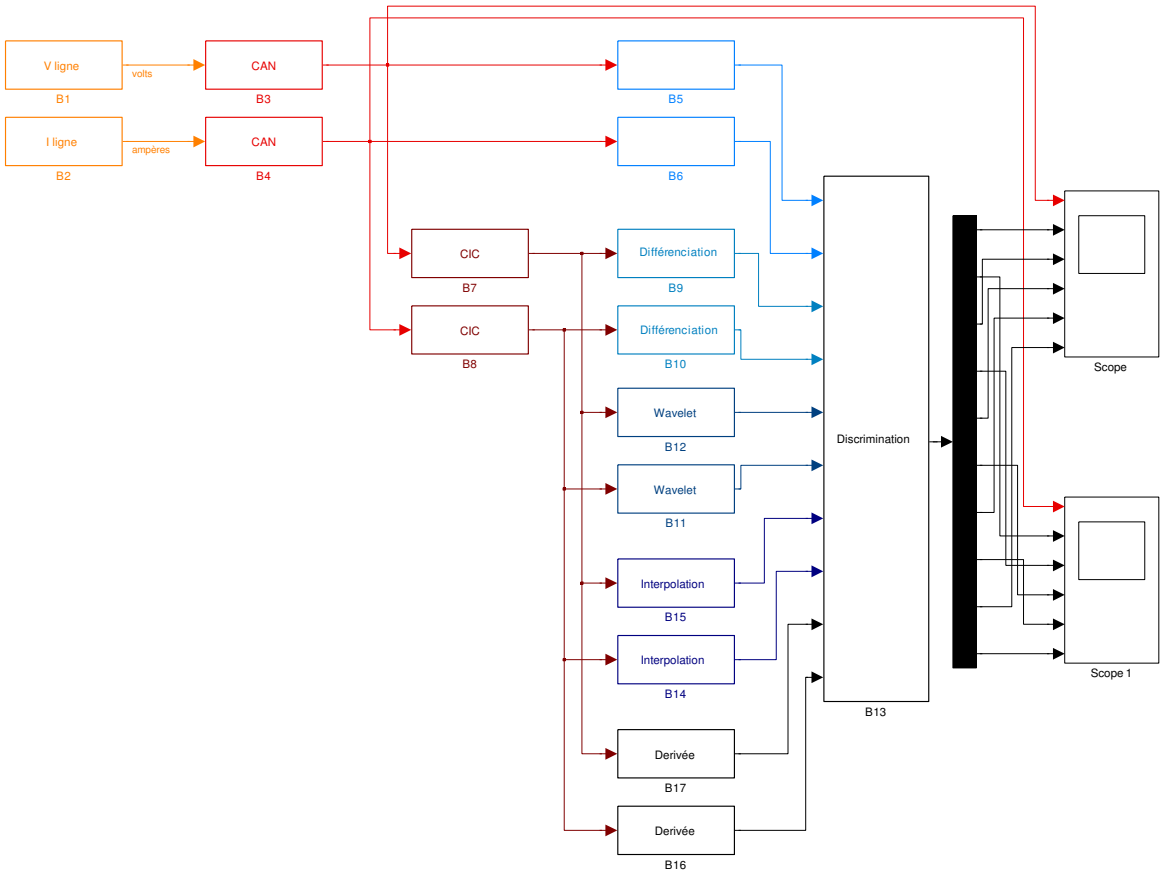


FIG. 5.41 – Diagramme Matlab-Simulink du détecteur.

Le schéma contient tous les blocs correspondant aux algorithmes présentés précédemment. Les signaux de courant et de tension d'arc sont obtenus avec le générateur GDARC et la comparaison des résultats de simulation est obtenue en même temps pour chaque algorithme testé.

Un soin particulier a été pris pour minimiser les ressources nécessaires à l'implantation de chaque algorithme afin que celui-ci soit réalisable avec le système cible. On contraint également l'implantation du système pour que tous les algorithmes testés puisse être implantés simultanément dans la cible. Ce qui conduit à l'addition de contraintes supplémentaires liées à chaque algorithme. Par exemple, pour la transformée en ondelettes : seul le premier niveau de détails de la transformée en ondelettes est calculée avec une ondelette de Debauchie 6. Cela se traduit par l'implantation d'un

filtre à 12 coefficients. Ces derniers sont quantifiés sur 16 bits.
Un prototype à également été réalisé (voir annexes), celui-ci intègre les différents alogrithmes de détections présentés précédement ainsi que la logique de discrimination selon la figure 5.41.

5.7.2 Comparaison des performances

Pour classer les algorithmes entre eux, il est indispensable de prendre en compte en premier lieu le taux de détection et de fausses détection. La fonction d'un algorithme de détection est de fournir un indicateur de la présence de l'arc (qu'il soit significatif ou non). D'une manière générale, cette fonction est correctement réalisée. Ainsi, la plupart des algorithmes possèdent un taux de détection proche de 100%. On comprend que le taux de détection, aussi important soit-il, ne constitue pas un critère suffisant pour effectuer une comparaison.
Le taux de fausse détection est un critère qui permet de classer exhaustivement les algorithmes. En effet, la sureté de fonctionnement exigée dans le domaine de l'aéronautique n'autorise pas que l'on puisse émettre de fausses alarmes. Cela signifie qu'aucun compromis ne devrait-être fait entre le critère du taux de fausse détection et d'autres critères comme, par exemple, la ressource demandée où la charge de calcul. Dans la pratique, il en est bien sur autrement : ici nous souhaitons tout de même minimiser autant que possible l'implantation et la charge de calcul.
Pour évaluer le taux de fausses détections, il faut connaître tous les signaux de courant et de tension susceptibles de leurrer chaque algorithmes. Il faut également connaître toutes les charges et tous les types de circuits associés à ces signaux. L'acquisition de cette connaissance sur les signaux leurres est un travail dont l'ampleur est difficilement quantifiable pour le moment. Cela constitue un thème de recherche en tant que tel. Comme nous ne possédons que peu d'enregistrements de ces signaux leurres, nous n'avons pu évaluer le taux de détection que qualitativement. Néanmoins, nous pensons que l'évaluation de ce taux (et indirectement, la construction d'une base de données de signaux d'arc et de leurres) constitue une priorité.
Cette étude qualitative se basent sur plusieurs critères :

- le taux de détection : comme nous l'avons vu, il est toujours suffisant quel que soit l'algorithme.
- Le taux de fausse détection : ce taux n'est ici que apprécié ou extrapolé.
- La charge de calcul,
- le temps de réponse,
- la robustesse : résistance au bruit.

La table 5.3 présente les résultats tandis que la table 5.2 donne la comparaison qualitative des algorithmes.

Abréviation	Nom complet
DWT	Transformée en ondelettes
TFD	Méthode par transformée de Fourier
DIFF	Différenciation temporelle
EXT	Extrapolations
INT	Interpolation
DRV	Dérivée
TD	Taux de détection
TF	Taux de fausses détection

Tab. 5.2 – Liste d'abréviations utilisées avec la table 5.3.

	TD	TF	Charge	Réponse	Implentation	Robustesse
DWT	+ + +	+	- - -	-	- -	- -
TFD	?	?	- -	+	- -	+
DIFF	+ +	+	+ + +	+	- - -	+
EXT	+ +	-	+	+	+	- - -
INT	+ +	-	+	- -	+	+
DRV	+	-	+	- -	+	- -

TAB. 5.3 – Comparaison qualitative des algorithmes de détection.

5.7.3 Simulation et comparaisons sur des signaux réels AC

Les arcs de type 1 et de 2 présentent des courants aux allures quasiment identiques et des signaux de tension similaires au déphasage près. C'est pourquoi nous testons et comparons nos algorithmes que pour les arcs de types 1, 3 et 4. Les signaux résultants des simulations pour chaque modèles et pour chaque type sont donnés figures 5.42, 5.44 et 5.46 pour le courant d'arc et figures 5.43, 5.45 et 5.47 pour la tension d'arc.
Un résumé est donné table 5.4 et 5.5 :

Courant	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
DWT	✓	✓	✗	✗
TFD	✓	✓	✓	✗
DIFF	✓	✓	✓	✗
EXT	✓	✓	✓	✗
INT	✓	✓	✓	✗
DRV	✓	✓	✗	✗

TAB. 5.4 – Comparaison des algorithmes par type pour l'analyse du courant d'arc.

Tension	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
DWT	✓	✓	✓	✓
TFD	✓	✓	✓	✓
DIFF	✓	✓	✓	✓
EXT	✓	✓	✓	✓
INT	✓	✓	✓	✓
DRV	✓	✓	✓	✓

TAB. 5.5 – Comparaison des algorithmes par type pour l'analyse de la tension d'arc.

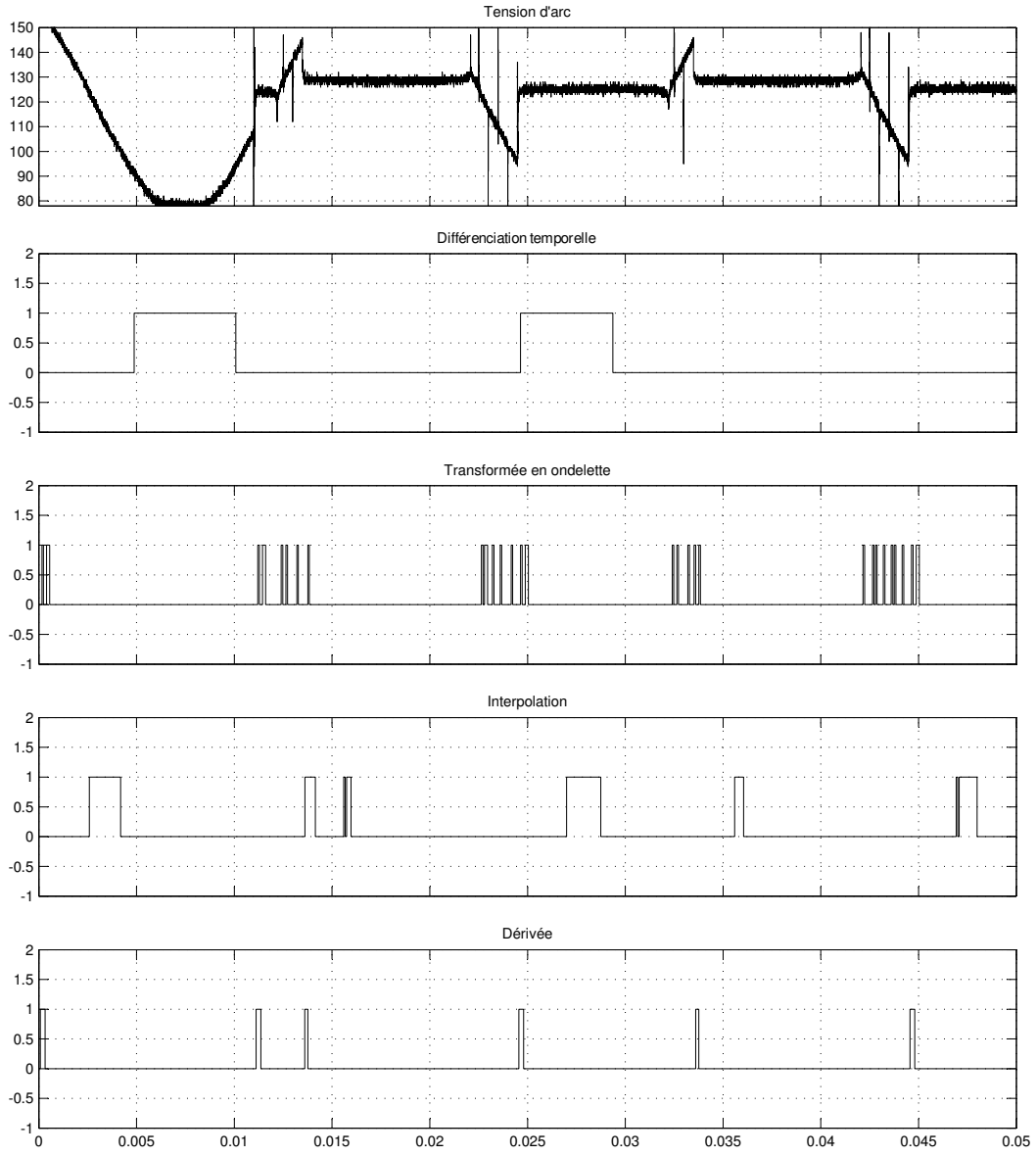


FIG. 5.42 – Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 1 ou 2.

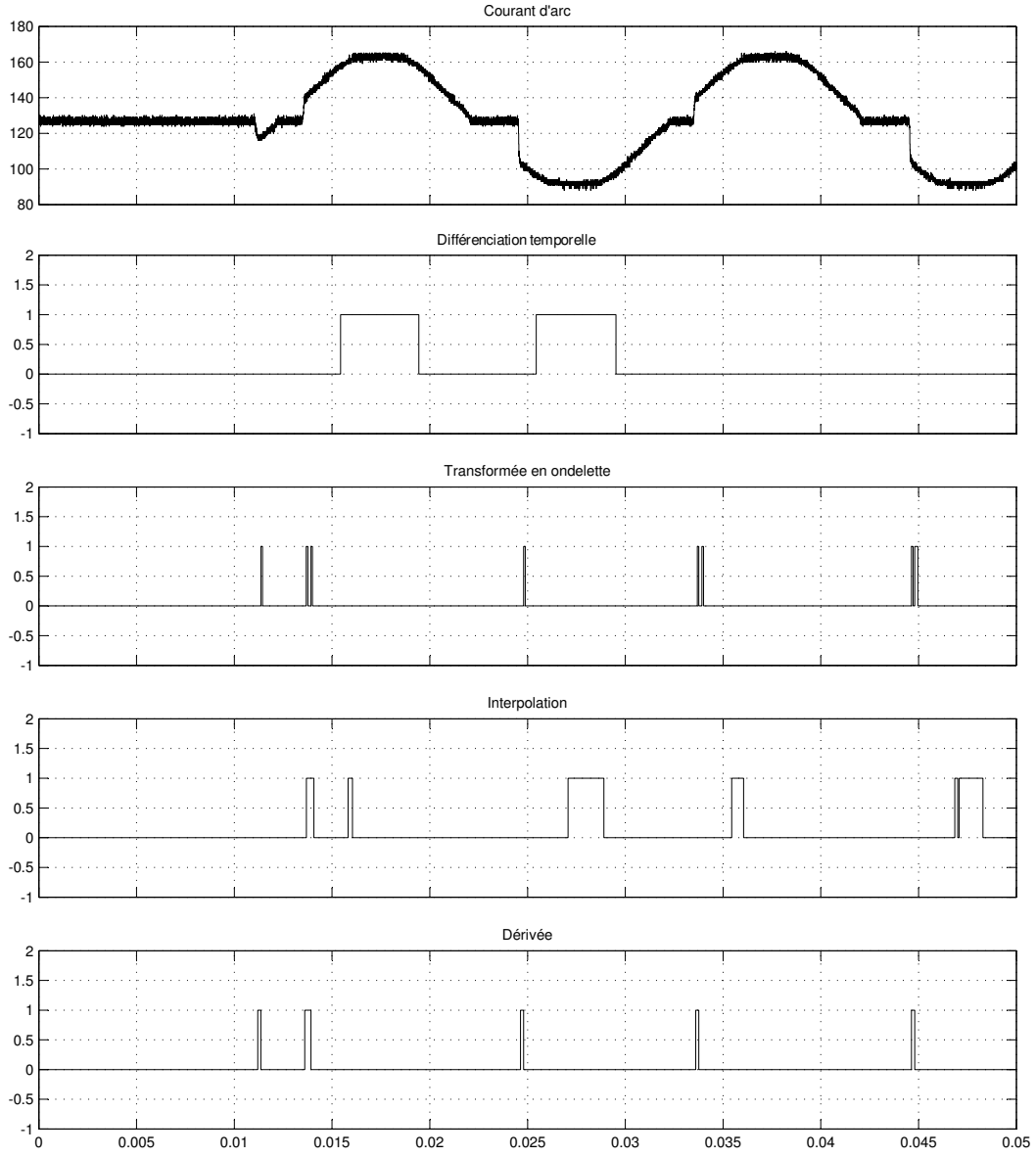


FIG. 5.43 – Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 1 ou 2.

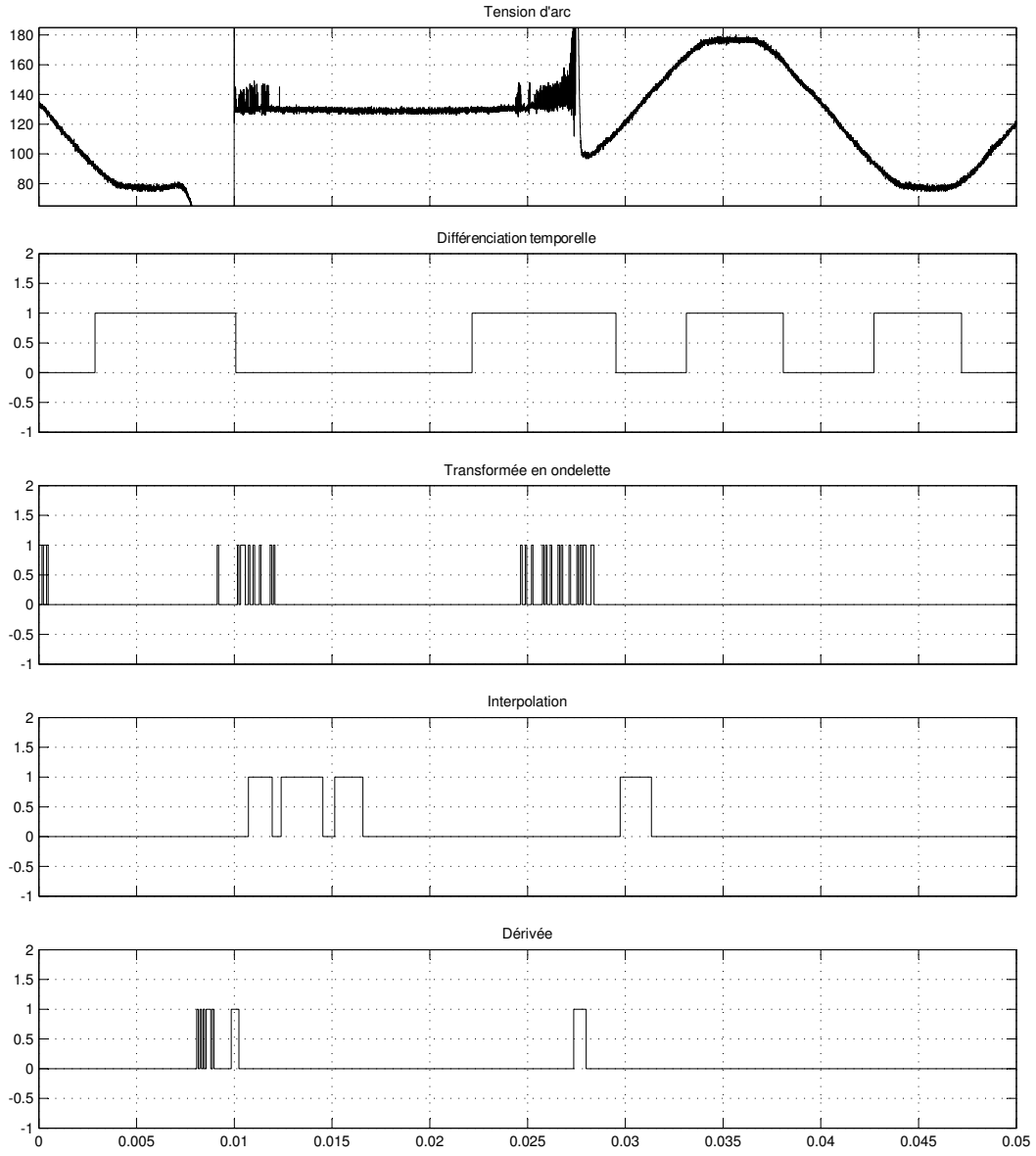


FIG. 5.44 – Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 3.

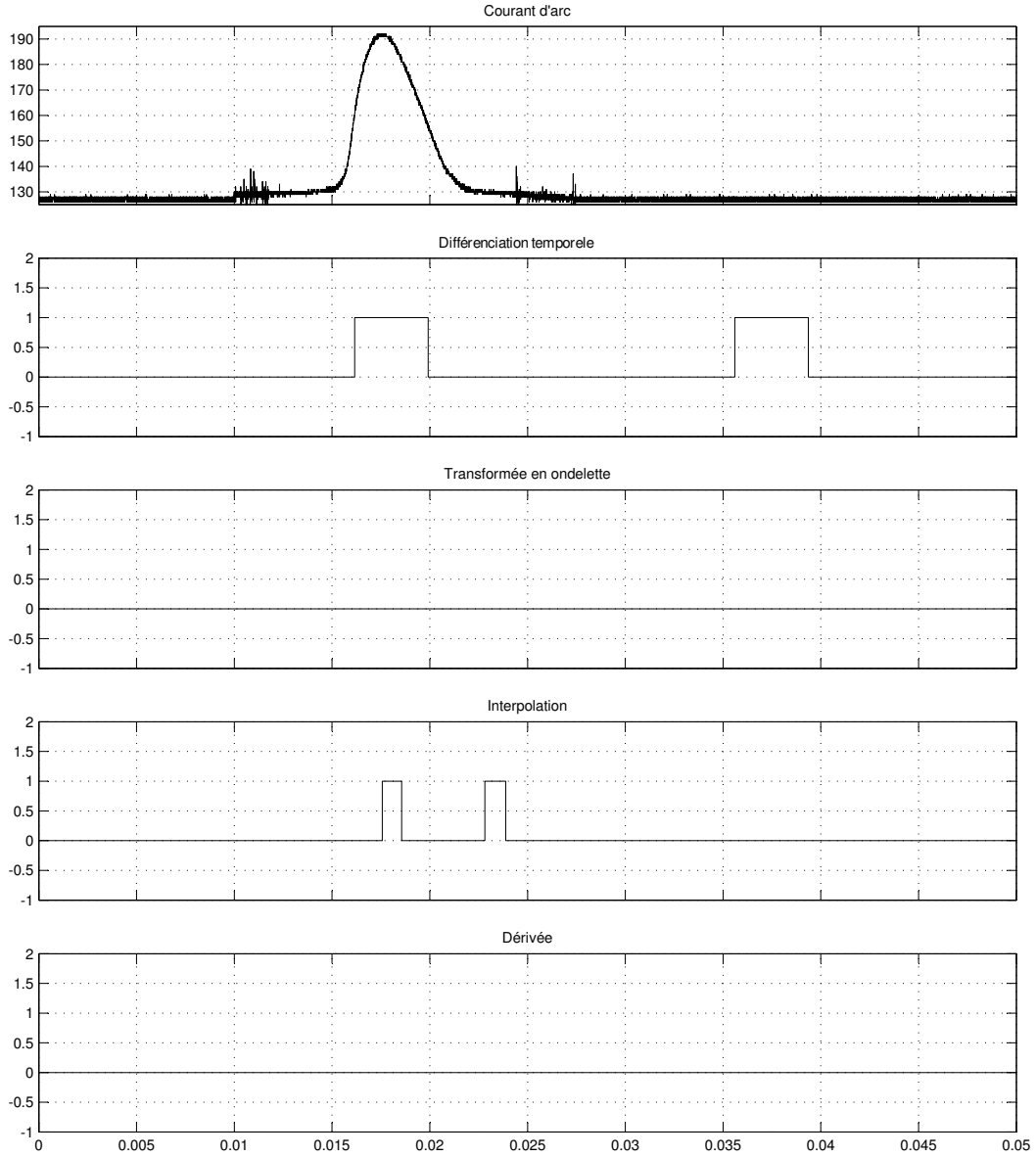


FIG. 5.45 – Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 3.

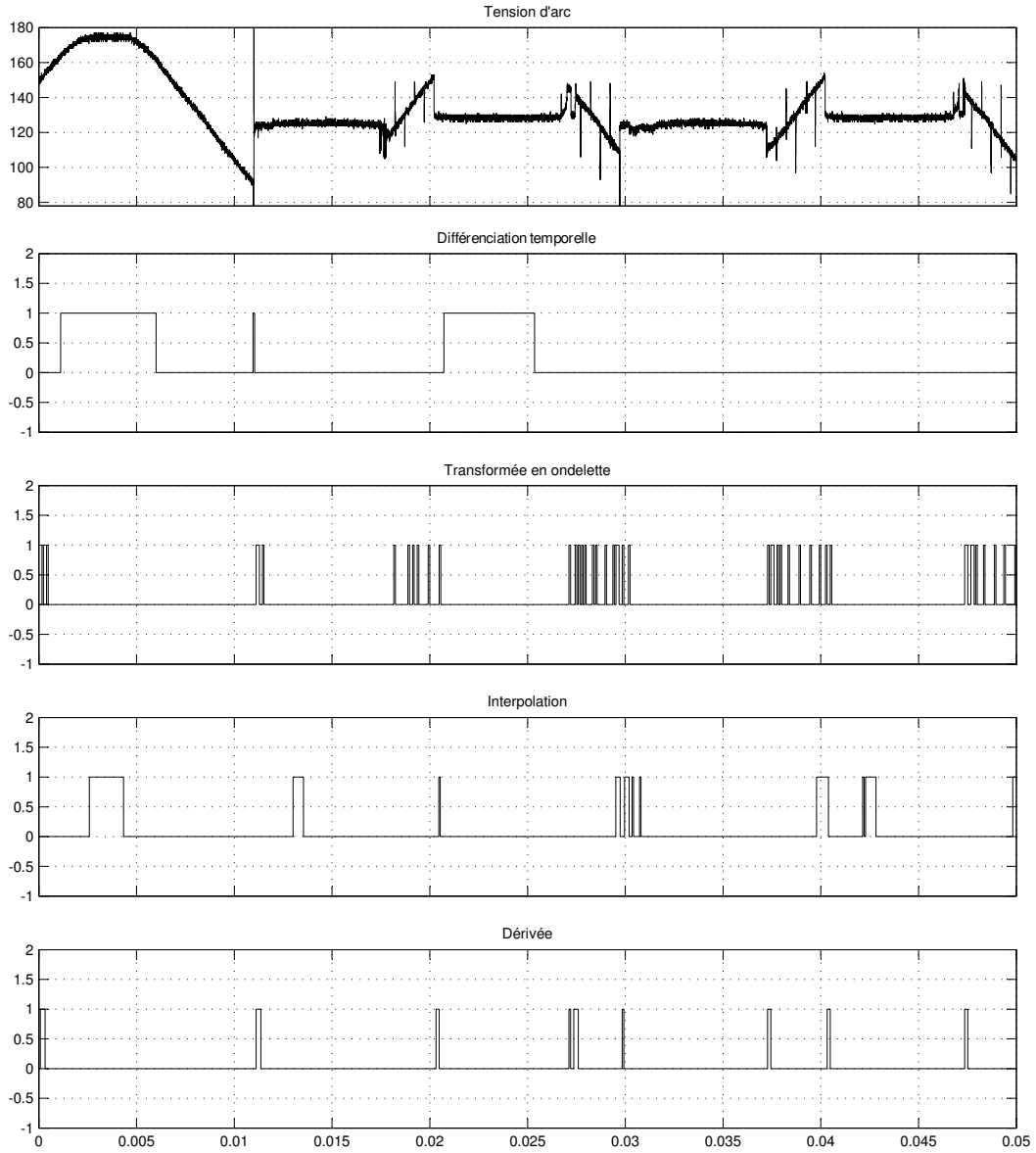


FIG. 5.46 – Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 4.

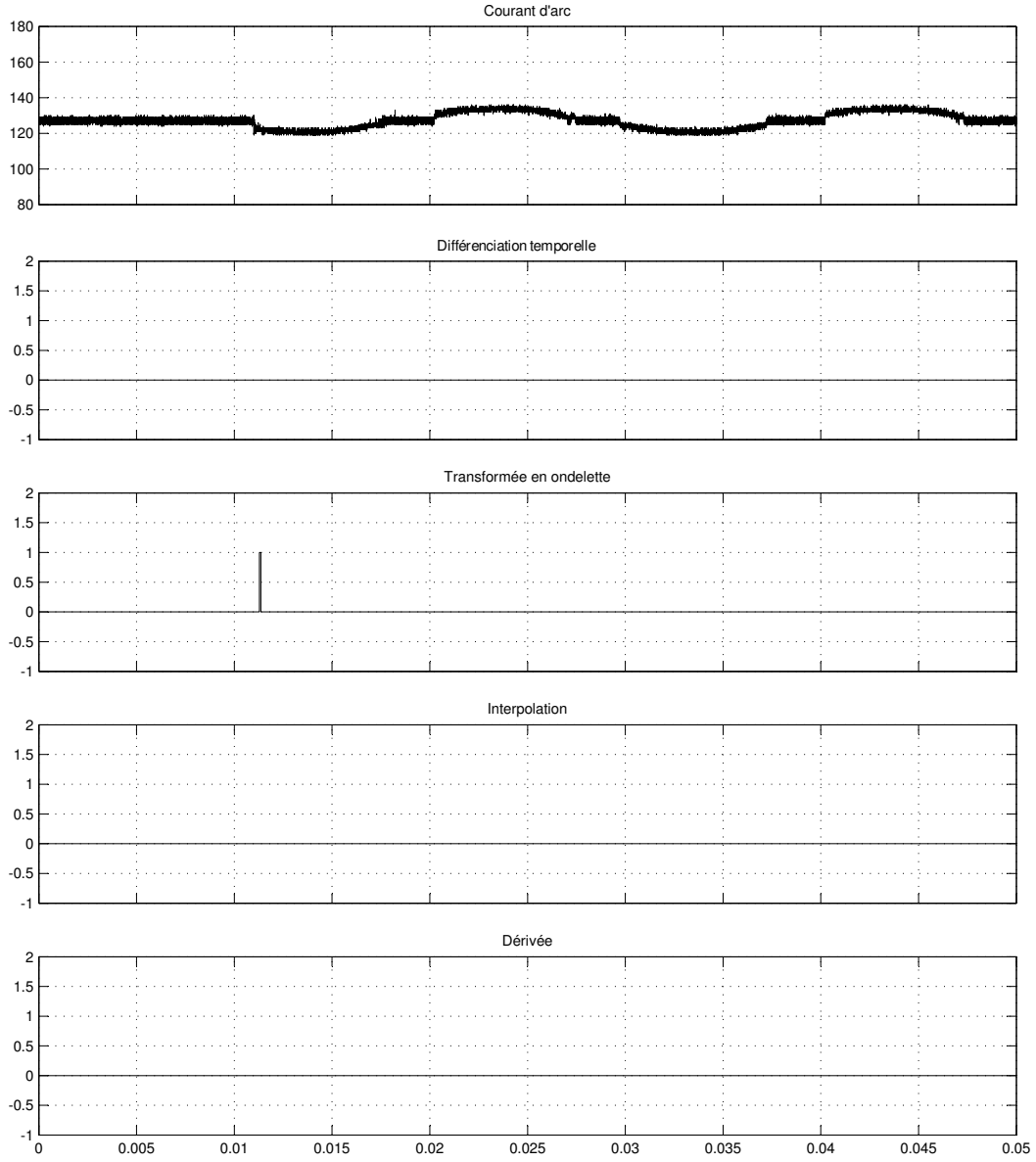


FIG. 5.47 – Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 4.

5.8 Logique de discrimination

5.8.1 Discrimination

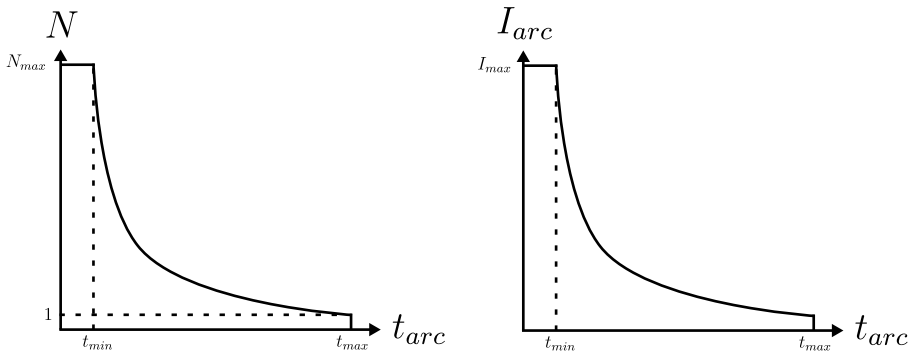
La logique de discrimination est l'algorithme supplémentaire qui traite les différents indicateurs issus des algorithmes de détection comme le montre la figure 5.41. Cette logique réalise la prise de décision quant à la présence d'un arc et actionne le déclenchement de la protection. Quelque soit le nombre d'algorithmes de détection utilisés ou quelque soit leur efficacité, les performances principales du système de détection dépendent presque uniquement des performances de la logique de discrimination.

Une logique de discrimination efficace ne peut être élaborée qu'à partir d'une base donnée de signaux d'arc et de signaux leurres. Par soucis de confidentialité vis-à-vis de EPS, la logique utilisée n'est pas détaillée ici. Néanmoins, on donne tout de même le principe de fonctionnement : comme un algorithme de détection réagit à un ou plusieurs phénomènes en particulier, on liste un certain nombre de phénomènes et on obtient donc une série d'algorithmes. Les échantillons de la base de données sont alors soumis à ces algorithmes qui fournissent chacun un indicateur. Puis on en déduit le comportement séquentiel qui dicte l'évolution des différents indicateurs en cas de présence d'arc. Il est désormais possible de construire une machine d'état qui analyse l'évolution des indicateurs pour identifier un arc en temps réel.

5.8.2 Courbe de disjonction

Le temps de détection est également une contrainte significative. Il est en général déterminé par le constructeur avionique. Par exemple Boeing impose que l'arc soit détecté en moins de 8 demi-périodes du signal. Certains algorithmes comme la transformée en ondelettes peuvent nécessiter un temps de calcul important. La difficulté de réalisation sera l'implantation temps-réel de ces algorithmes.
Une contrainte que l'on souhaite mettre en avant, est qui est peu traité dans la littérature, et celle de la courbe de disjonction. Il apparait que certains arcs ne doivent pas être considérés comme dangereux et qu'ils ne nécessitent pas l'ouverture de la protection du circuit. Par exemple, comme déjà cité, l'arc série produit dans un contacteur lors de l'ouverture du circuit. Un autre exemple : lorsqu'un arc survient de manière isolé qui ne se réamorce pas. Soit un dégât à été occasionné et le circuit à protéger ne fonctionne plus correctement. Cela ne constitue pas un danger d'un point de vue électrique, donc il n'est pas nécessaire d'enclencher la protection électrique. Soit aucun dégât n'a été occasionné, le circuit à protéger fonctionne correctement, il n'est pas non plus nécessaire d'enclencher la protection. En revanche, si le défaut se répète de manière intempestive cela peut engendrer un incendie par élévation de température. Cela va dépendre de l'environnement et de la nature des câbles.
On définit la courbe de disjonction (figure 5.48 a) par un seuil à partir duquel une disjonction est considérée nécessaire. Dans sa définition classique, la courbe représente le seuil d'intensité d'un arc en fonction de sa durée. Elles suit l'allure typique hyperbolique donnée figure 5.48. Dans une seconde définition, la courbe de disjonction représente le nombre N d'occurrence d'un arc exprimé en Hz. Ce nombre comptabilise la quantité d'arcs survenus dans un intervalle de temps définit. Le seuil de disjonction est ainsi déterminé par la fréquence minimale d'occurrences d'un arc pour une durée donné t_{arc} de cet arc (figure 5.48 a).

Une troisième représentation peut-être imaginée à partir de ces deux courbes en remarquant qu'elles possèdent une dimension commune : la durée de l'arc t_{arc}. Il est alors possible de tracer une



(a) Fréquence d'occurrence (b) Courant d'arc

FIG. 5.48 – Courbes de disjonctions du détecteur.

figure en trois dimensions (figure 5.49) à partir de la fusion des deux courbes de disjonction.

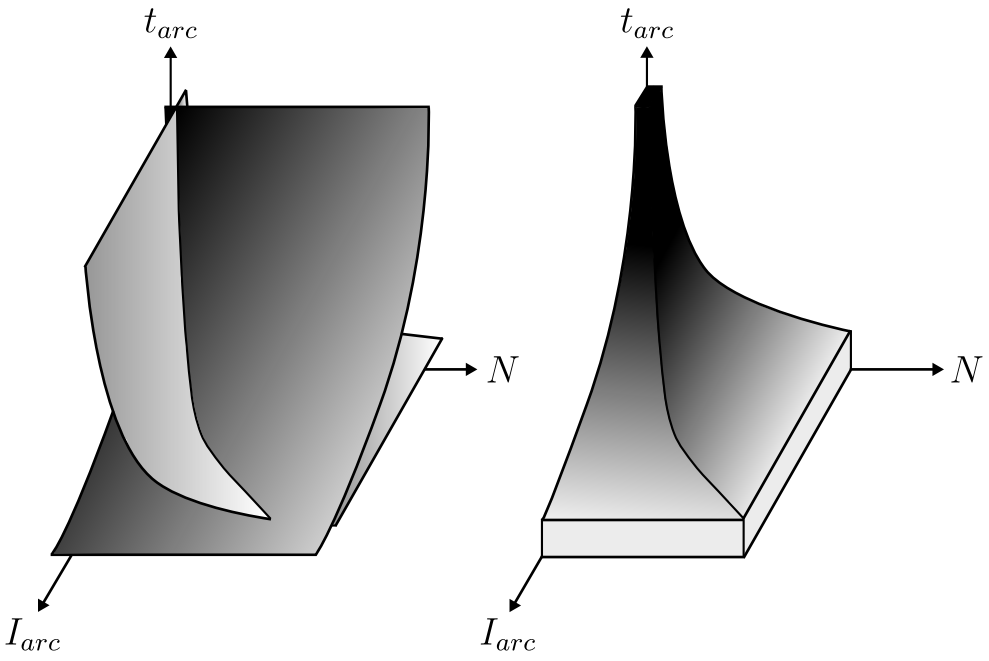


FIG. 5.49 – Représentation 3D de la courbe de disjonction.

Cela conduit alors à la définition d'un volume dans lequel un arc sera considéré comme non dangereux et qui n'impose pas l'ouverture du circuit de protection. Ce principe de disjonction peut-être décrit sous la forme d'un algorithme supplémentaire à adjoindre à la logique de discrimination représentée figure 5.41.

Chapitre 6

Conclusion générale et perspectives

La génération, la modélisation, ainsi que la détection des arcs électriques dans les systèmes embarqués, constituent trois thématiques anciennes, mais dont les premières applications apparaissent seulement dans le domaine de l'aéronautique. Ce travail de thèse a permis de synthétiser l'état de l'art de l'ensemble de ces trois grands axes, mais surtout a permis de fournir une première approche de la problématique de la détection de défaut d'arc. Des solutions ont été apportées pour répondre à cette problématique, respectivement : un générateur de défaut d'arc calibrés et reproductibles, un méta-modèle pour la caractérisation des arcs et le développement des disjoncteurs, ainsi qu'une première architecture d'un détecteur à logique de discrimination.

Plusieurs méthodes sont actuellement utilisées pour générer des défauts d'arc afin de tester la fiabilité d'un détecteur. Il s'agit principalement des tests de la guillotine, du plot vibrant et d'ouverture de circuit. Cependant ces méthodes empiriques ne permettent pas de générer des arcs aux caractéristiques reproductibles.

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont conduit à mettre au point un générateur de défauts d'arc. Ce système permet de produire des arcs contrôlés en intensité et en durée selon les modes série, parallèle, DC et AC. Il permet de reproduire la plupart des situations pouvant être rencontrées en pratique

- arcs en série ou en parallèle avec une charge quelconque,
- arcs sur une ligne AC ou DC,
- arcs de durée contrôlée,
- arcs calibrés en courant et en tension,
- arcs sur câbles ou électrodes, ou tout autre géométrie.

Avec le GDARC, le problème de la caractérisation de défauts d'arc peut être abordé avec une méthode différente et plus rigoureuse que les tests actuels.

A ce jour, le GDARC est un prototype fonctionnel dont il est possible d'améliorer le fonctionnement et de réduire l'encombrement notamment en réduisant le transformateur d'amorçage. Une seconde version de la carte de contrôle est actuellement à l'étude pour automatiser les mesures.

Différents types de modèles d'arc ont été étudiés, chaque modèle possède une plage de validité qui lui est propre. En les combinant il est possible d'améliorer les résultats de simulation. Nous avons proposé un méta-modèle associant les caractéristiques de différents modèles comportementaux et impédencemétriques. Le coté novateur de cette approche est de prendre en compte le phénomène de décharge corona matérialisé par une impédance supplémentaire ajoutée dans le circuit.

Le méta-modèle peut être amélioré significativement en effectuant une étude plus approfondie de la décharge couronne et des décharges HF. Par ailleurs, le méta-modèle présenté, basé sur les équations de Mayr, peut être reconstruit à partir d'autres modèles. Une piste intéressante en cours d'étude concerne la modélisation de la conductance de l'arc électrique par une mesure du champ électrique engendrée par ce dernier.

Les signaux de tension et de courant obtenus lors de l'apparition d'un arc montrent des discontinuités caractéristiques, mais ils sont fortement perturbés par les phénomènes d'induction, le transfert de matière, les parasites de commutation...

La détection de la signature d'arc se rapproche d'un problème de détection d'informations fortement bruitées, pour lequel peu de solutions ont été jusqu'à présent proposées, car cette recherche est relativement nouvelle...

Nous avons proposé une voie pour la réalisation d'un système de détection basé sur des indicateurs et des algorithmes multiples, complétés par une logique de discrimination. Cette logique ne peut-être améliorée qu'à partir d'une base de signaux d'arcs et de signaux leurres. Elle devra intégrer également une nouvelle courbe de disjonction d'arc.

Chapitre 7

Annexes

7.1 Valorisation et communication scientifique

- Participation à des congrès internationnaux :
  - **Calibrated AC and DC Arcing Fault Generator**, Jonathan Andrea, Patrick Schweitzer, Etienne Tisserand, IEEE HOLM International Conference on Electrical Contacts Charleston Octobre 2010
  - **A New DC and AC Arc Fault Electrical Model**, Jonathan Andrea, Patrick Schweitzer, Etienne Tisserand, Patrice Roth, Serge Weber, IEEE HOLM International Conference on Electrical Contacts Charleston Octobre 2010.
  - **Arc Fault Generation and Modelling**, Jonathan Andrea, Patrick Schweitzer, Robert Hugon, Ludovic De Poucques, MIATEC Magnetron, Ion Processing and Arc technologies European Conference, Metz 2010. MIATEC 2010, ISBN : 978-2-918641-04-9
  - **Repeatable and Calibrated Arc Fault Generator**, Jonathan Andrea, Patrick Schweitzer, Etienne Tisserand, Patrice Roth, Serge Weber, ISIE 2010 IEEE proceedings, pages 1022-1026.
  - **Averaged Lagrange Method for Interpolation Filter**, Jonathan Andrea, Frederic Coutard, Patrick Schweitzer, Etienne Tisserand, Acoustics 2008 Paris, pages 4653-4657.
  - **Averaged Lagrange Method for Interpolation Filter (A)**, Jonathan Andrea, Frederic Coutard, Patrick Schweitzer, Etienne Tisserand, Journal of the Acoustical Society of America, vol. 123, issue 5, p. 3746.
  - **Arc Fault Model of Conductance. Application to the UL1699 Tests Modelling.**, Jonathan Andrea, Patrick Schweitzer, J.M. Martel, IEEE HOLM International Conference on Electrical Contacts Mineapolis september 2011.
- Un dépôt de brevet est en cours sur le générateur de défaut d'arcs. Cabinet Mark et Clerk, France SNC.
- Le projet d'amélioration du banc a également été retenu pour un soutient financier dans le cadre de l'appel à projet « maturation 2010 » de l'Université Henri Poincaré.
- Le dépot d'un brevet sur l'algorithme de détection développé par la sociète Esterline est actuellement sujet à discussions.

7.2 Réalisation d'un prototype d'AFCB

Ce système est basé sur une architecture construite autour d'un microprocesseur de traitement de signal DSPIC33F dont la photographie est donnée en figure 7.1.

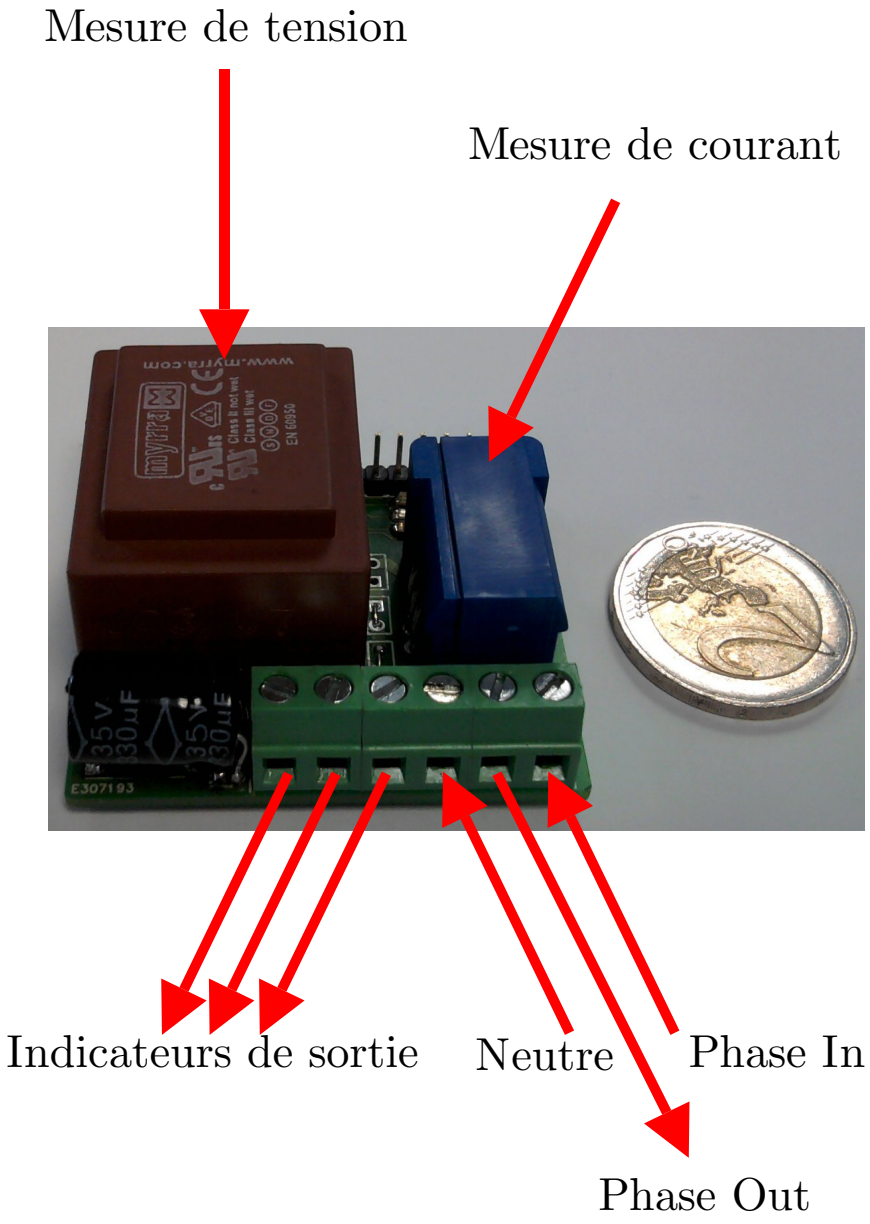
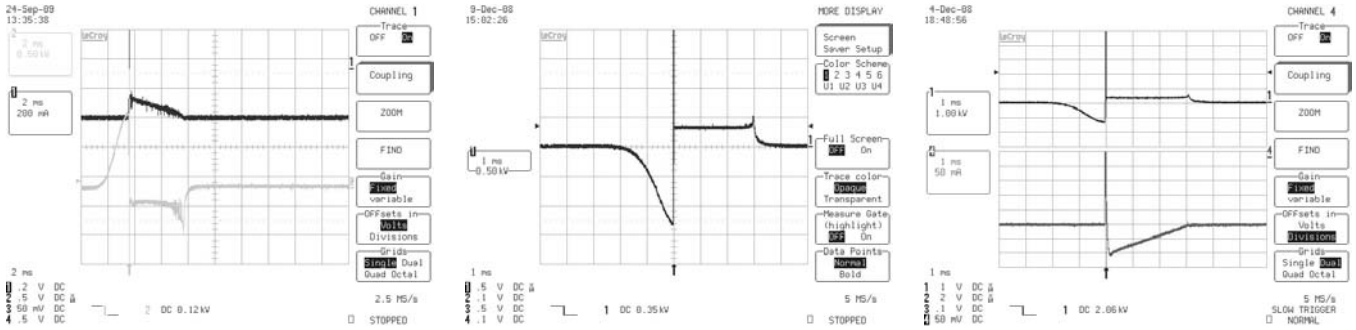


Fig. 7.1 – Architecture du détecteur proposé

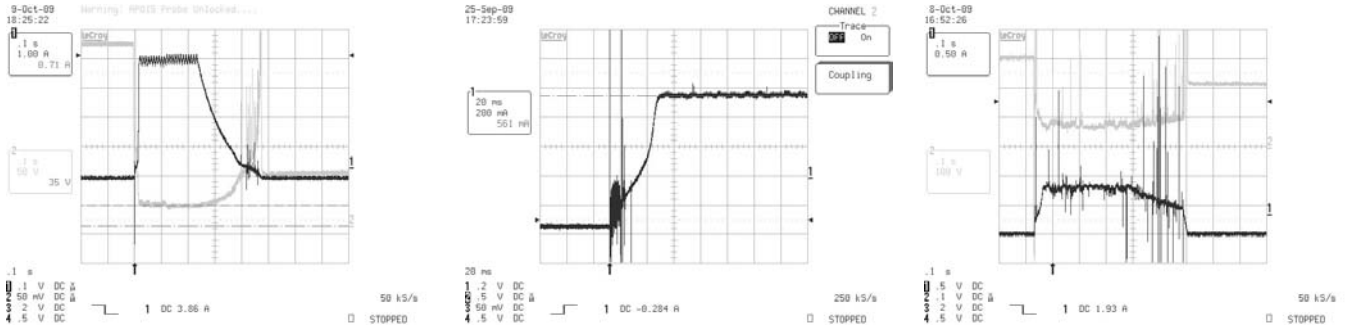
La mesure de courant est réalisée directement sur ligne avec un capteur torique , la mesure de tension est réalisée à l'aide d'un transformateur abaisseur. Ces mesures sont échantillonnées à 400 kHz puis traitées par le DSPIC afin de détecter l'arc. Le système de détection présenté en chapitre 4 est implanté avec sa logique de discrimination et sa courbe de disjonction.

7.3 Gallerie de signaux d'arc

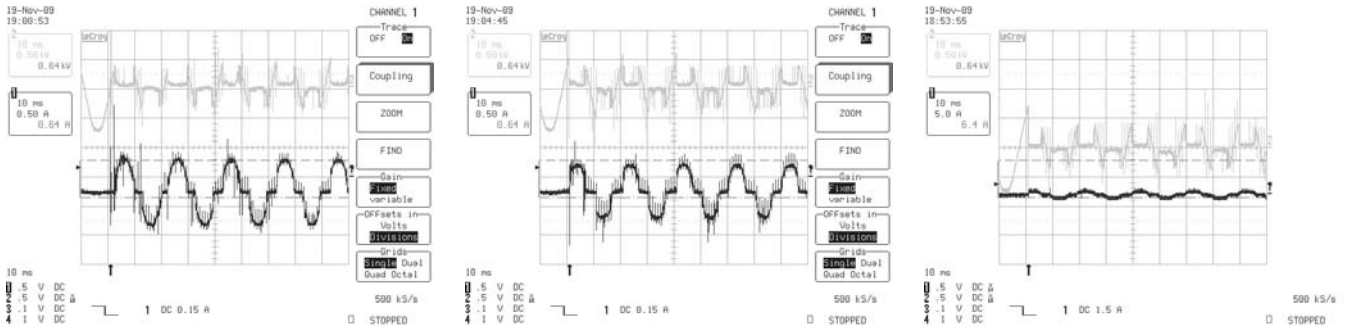
Arc à vide



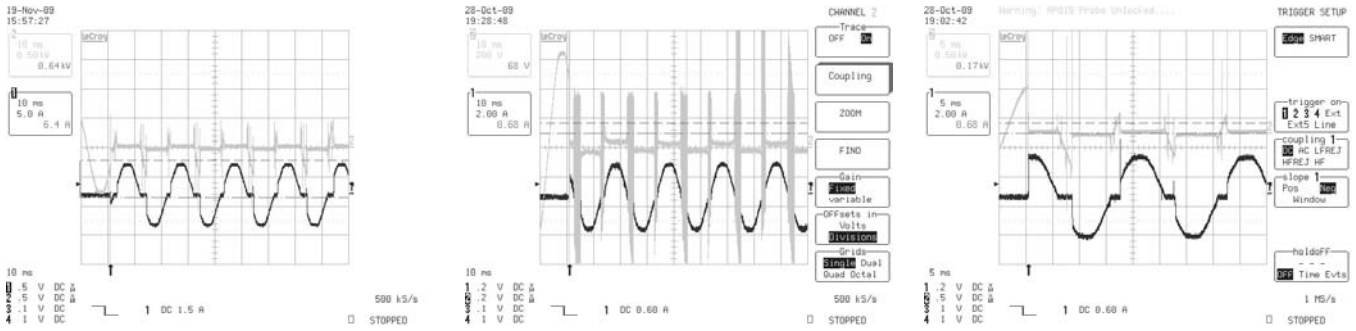
Arc DC



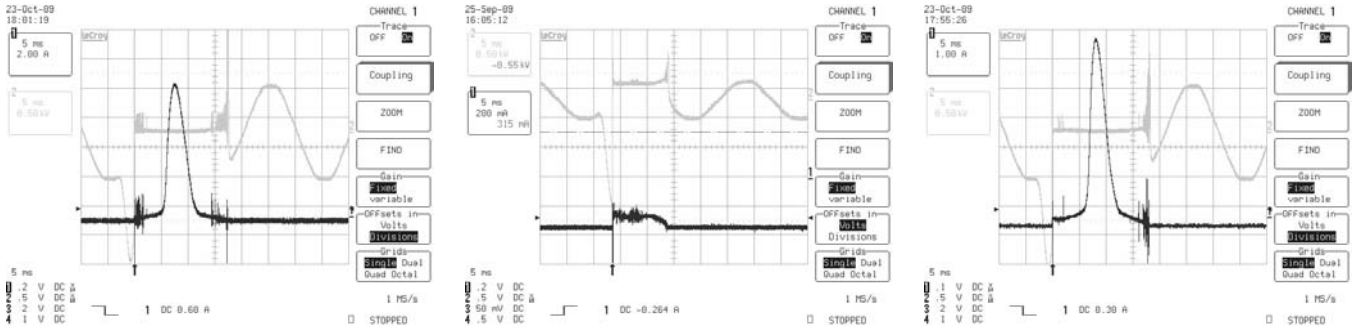
Arc AC type 1



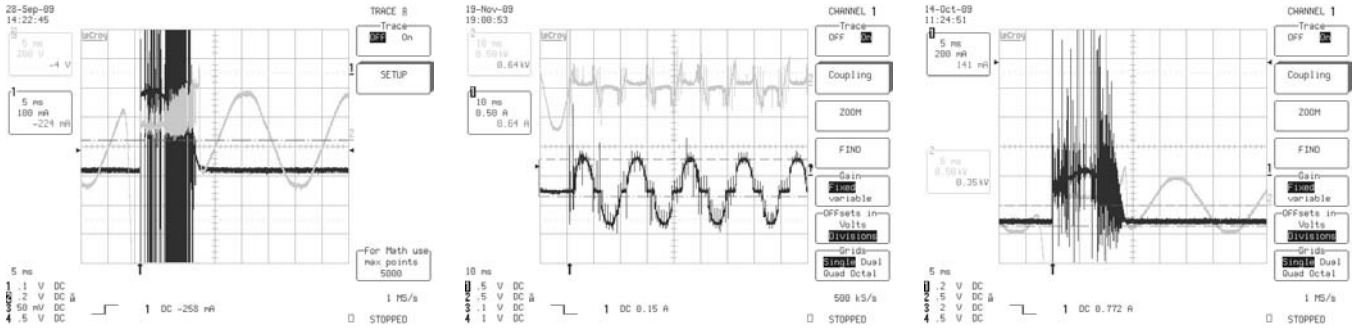
Arc AC type 2



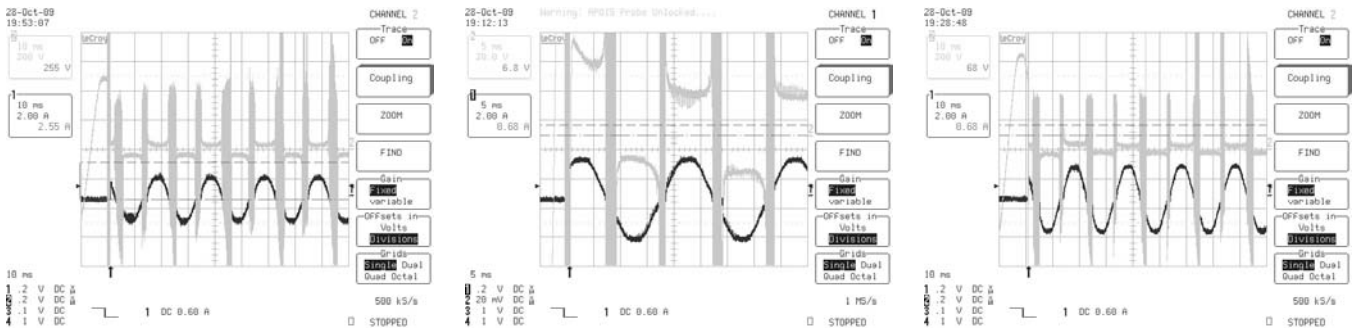
Arc AC type 3



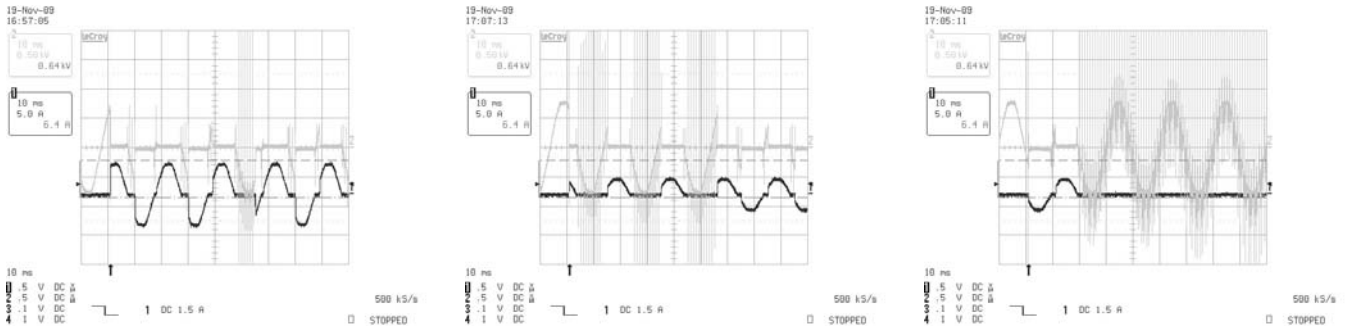
Arc AC type 4



Arc avec HF



Arc et réamorçage



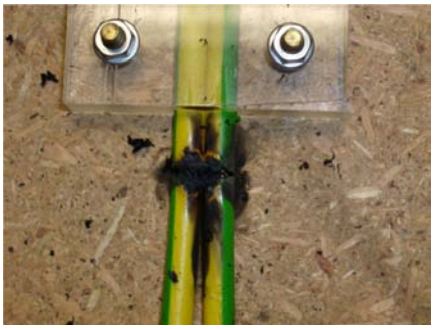
7.4 Gallerie de photo d'arc

Arc sur câbles

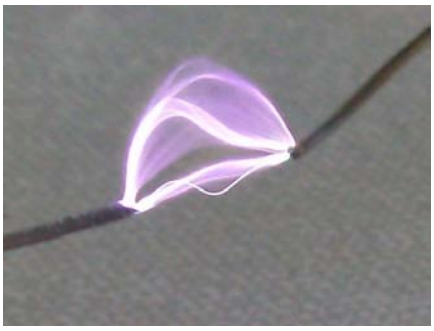
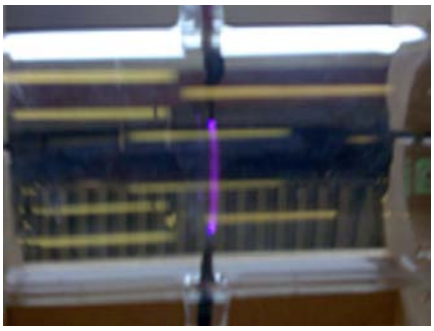
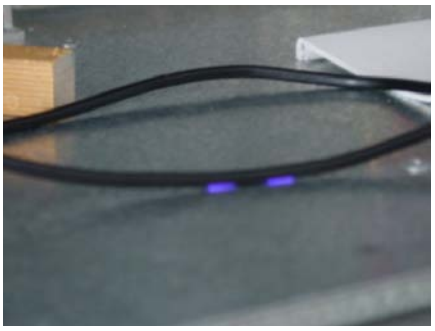




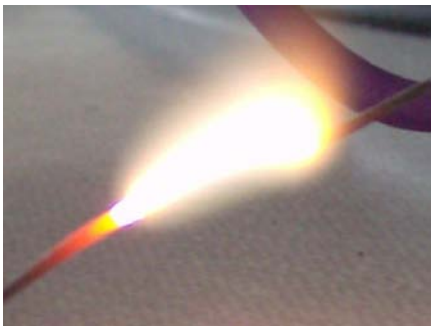
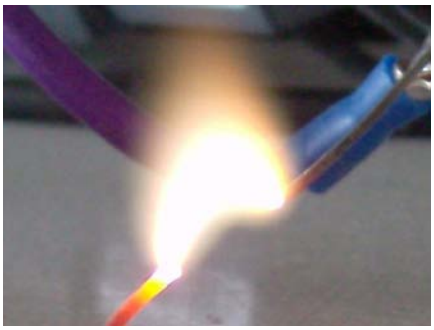
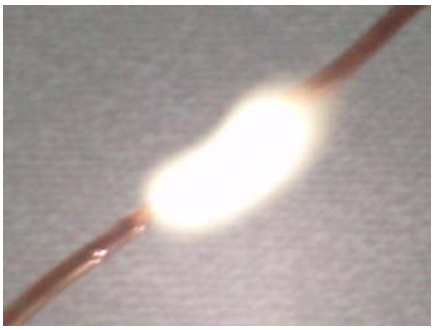
Dégâts provoqués par un arc

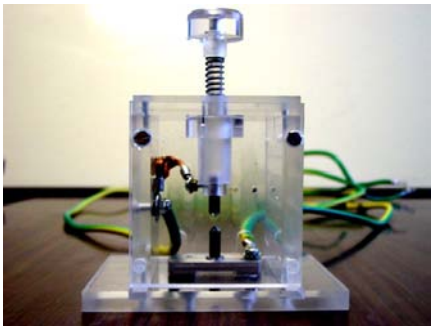

Décharge corona

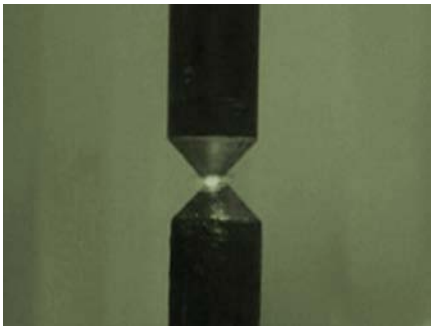




Arc a vide pulsés

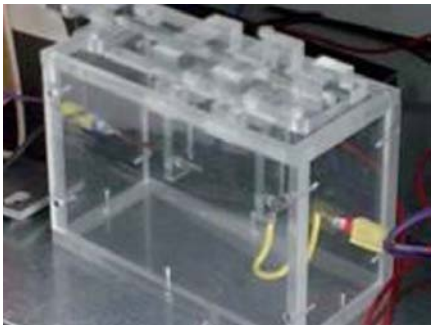
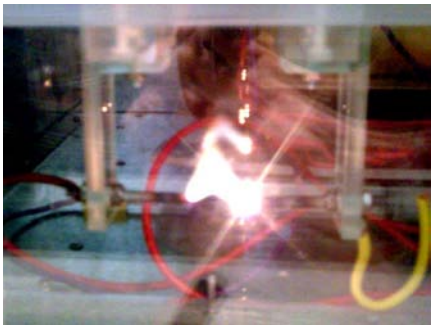
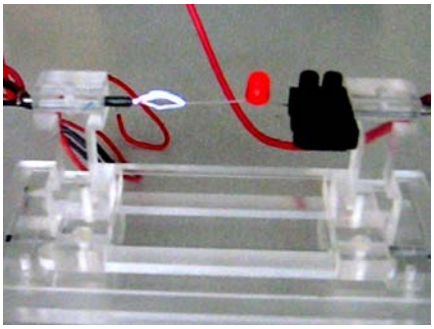




Test de la guillotine

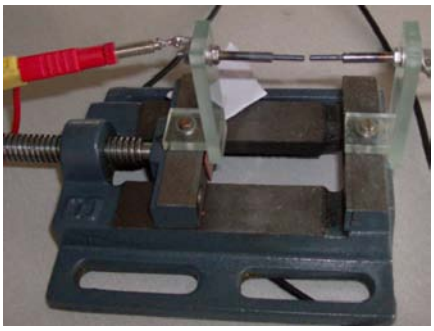
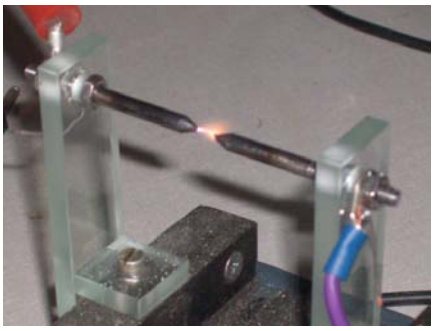
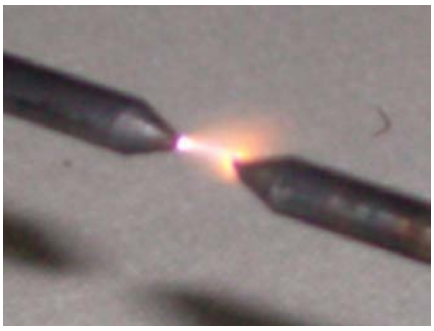
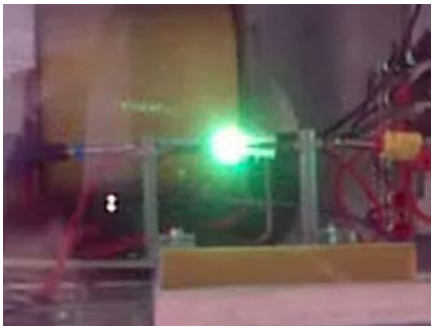
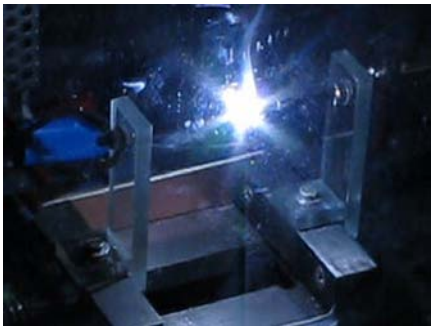




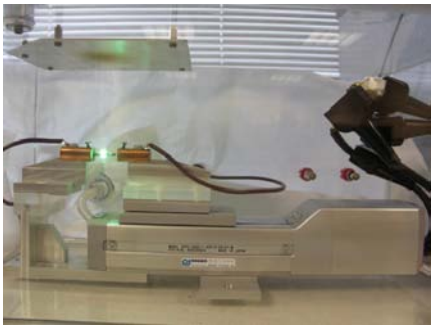
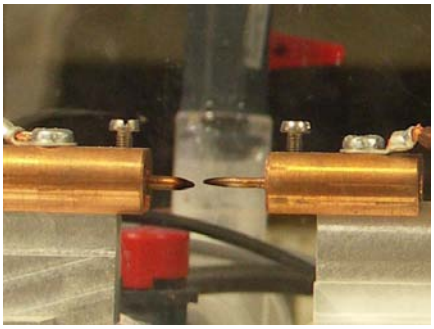
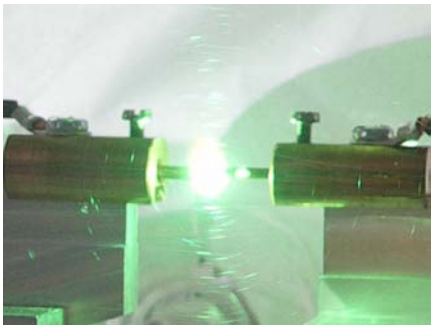
Premier système mécanique

Deuxième système mécanique


Troisième système mécanique

Extrait de vidéos slowmotion

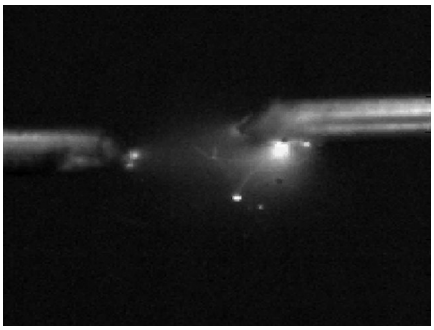
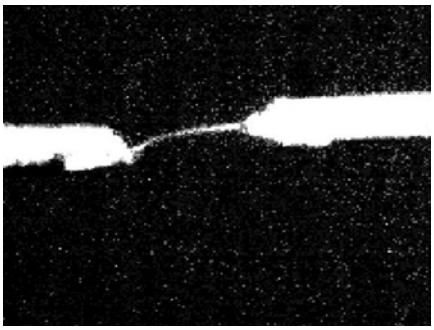




Table des figures

2.1 Architecture simplifiée du réseau électrique dans un avion. 19
2.2 Types d'arc. 21
2.3 Causes et lieux d'apparition des défauts d'arc. 22
2.4 Organes et composants sujets aux défauts d'arc. 22
2.5 Situations susceptibles d'amorcer un défaut d'arc. 23
2.6 MetraHIT 27I produit par GMC qui permet de verifier l'état des isolants et la conductance des câbles. 24
2.7 Réflectométre TDR produit par Megger. 24
2.8 Position des AFCB. 25
2.9 Mesure de tension effectuée par le détecteur. 26
2.10 Méthode directe de mesure du courant effectuée par le détecteur. 26
2.11 Méthode indirecte de mesure du courant effectuée par le détecteur. 27
2.12 AFCB BR12AF de la marque Eaton. 28
2.13 Position des SSPC. 28
2.14 Schéma interne du L318 [STM03] et exemple d'application [BRE98]. 29
2.15 Shéma de principe interne d'un AFCB de marque Eaton. Figure extraite de [EAT08]. 29
2.16 Position des SSPC. 30
2.17 Modèle comportemental d'un SSPC. Figure extraite de [IBSFZ09] 31
2.18 Représentation de la courbe de disjonction I^2t d'un SSPC. 31
2.19 RP-263XXN0 Solid State Power Controller 32

3.1 Lampadaire à arc du 18ème siècle. 35
3.2 Lampe à arc du 18ème siècle. 36
3.3 Les 5 étapes du processus de décharge DC. 38
3.4 Caractéristique courant-tension aux bornes des électrodes. 39
3.5 Phases d'apparition d'un arc électrique. Photographies réalisées au LIEN. 40
3.6 Caractéristique statique de l'arc et droite des charges. 41
3.7 Caractéristique dynamique obtenue au laboratoire. 42
3.8 Exemple de caractéristiques dynamiques expérimentales. 43
3.9 Asymptotes de la caractéristique statique. 45
3.10 Courant et tension d'arc simulés à l'amorçage de l'arc DC avec les modèles de Mayr (trait plein) et Cassie (trait pointillé) comparés aux mesures expérimentales (trait gris). 47
3.11 Allure de la tension et du courant d'arc et modèle simple à diode. 50
3.12 Allure de la tension et du courant d'arc selon le modèle de Matthiews (figure extraite de [GM00]). 52
3.13 Signaux de tension et de courant d'arc obtenus par simulation Matlab. A gauche les signaux issus du modèle de Matthiews, à droite l'allure attendue des signaux d'arc. 53

3.14 Allure de la tension et du courant d'arc selon le modèle de Kauffman (extraite de [MK98]). . . . 54
3.15 Type de signaux d'arc rencontrés expérimentalement. . . . 57
3.16 Étapes successives de la décharge en fonction du courant d'arc. . . . 61
3.17 Modélisation de la caractéristique statique AC. . . . 62
3.18 Modèle proposé. . . . 63
3.19 Méta-modèle d'Ayrton. . . . 64
3.20 Méta-modèle d'Ayrton simplifié. . . . 64
3.21 Modèle proposé. . . . 66
3.22 Simulation de l'impédance du modèle proposé au cours d'une période complète du courant d'arc. . . . 67
3.23 Schéma électrique du méta-modèle sous Spice. . . . 67
3.24 Simulation du courant et de la tension avec Spice. . . . 68
3.25 Modèle MATLAB Simulink simplifié. . . . 69
3.26 Mesures et simulations du courant d'arc (à gauche) et de la tension d'arc (à droite). En rouge la mesure expérimentale, en pointillé court le modèle de Mayr, en pointillé long le modèle proposé, en continue long le modèle proposé avec correction de constante de temps. . . . 70
3.27 Évolution de la constante de temps en fonction du courant. . . . 72
3.28 Mesures et simulation de courant d'arc (à gauche) et de tension d'arc (à droite). En rouge : la mesure expérimentale, en continu long : le modèle proposé. . . . 72
3.29 Simulation de courant et de tension d'arc (gauche). Mesures expérimentales (à droite). 73
3.30 Simulations de la tension et du courant d'arc prenant en compte le non ré-amorçage et les décharges HF. . . . 77
3.31 Mesure de la tension et du courant d'arc avec décharge HF et non ré-amorçage. . . . 77
3.32 Tension d'arc et courant du test des plots vibrants (courbes supérieures) confrontés aux résultats de simulations du méta-modèle (courbes inférieures). . . . 78

4.1 Lignes de courants à travers deux contacts après amorçage d'un arc. . . . 81
4.2 Arc provoqué par une guillotine. Photographie extraite de [JW03]. . . . 82
4.3 Montage et circuit électrique du test des plots vibrants. Figure extraite de l'AS5692. 83
4.4 Test des plots vibrants. Figure extraite de l'AS5692. . . . 84
4.5 Test du chemin humide. A, B et C sont les 3 phases du système. Figures extraites de l'AS5692 . . . 84
4.6 Evolution de la tension de claquage en fonction du produit pd. Ici la distance d est fixée à 1 cm. Les électrodes utilisées sont sphériques et de diamètre 1 cm. . . . 86
4.7 Photographie du banc de génération d'arc réalisé au laboratoire. . . . 87
4.8 Composition du banc de test. . . . 88
4.9 Surtension (HV pulse) créée sur une ligne. . . . 88
4.10 Amorçage d'une décharge électrique dans un tube « néon ». . . . 89
4.11 Illustration du test des clous. . . . 90
4.12 Système d'amorçage par surtension. . . . 91
4.13 Signaux électriques du circuit d'amorçage. . . . 91
4.14 Tension de sortie V_S aux bornes de la bobine secondaire L_S. . . . 92
4.15 Arc généré à vide avec un transformateur flyback. . . . 93
4.16 Circuit électrique du générateur. . . . 93
4.17 Configurations du circuit secondaire. . . . 94
4.18 Le Transistor MOS de commutation et son radiateur. . . . 94

4.19 Transformateur. 95
4.20 Photographie du contrôleur de circuit d'amorçage. 96
4.21 Contrôleur du circuit d'amorçage. 96
4.22 Système de contrôle de la durée de maintien. 96
4.23 Charges résistives utilisées avec le GDARC. 97
4.24 Schéma de l'alimentaion de ligne. 98
4.25 Circuit de redressement. 98
4.26 Premier système mécanique réalisé. 99
4.27 Second système mécanique réalisé. 100
4.28 Jeu de cales de précision pour l'ajustement manuel de la distance inter-électrodes. . 100
4.29 Dernier système mécanique développé. 100
4.30 Enceinte hermétique à pression réglable. 101
4.31 Géométries des électrodes utilisées. 102
4.32 Influence de la géométrie des électrodes utilisées. 102
4.33 Méthode d'amorçage par surtension avec câbles électriques. 103
4.34 Exemple d'utilisation du GDARC avec des câbles. 103
4.35 Décharge corona entre un câble et la masse. 104
4.36 Signaux d'arc à vide. 104
4.37 Signaux d'arc à vide. 105
4.38 Signaux alternatifs de courant et de tension d'arc obtenus avec le GDARC en mode AC. 105
4.39 Signaux de courant et de tension d'arc obtenus avec le GDARC en mode DC. 106
4.40 Caractéristique statique obtenue avec des électrodes de tungstène. 107
4.41 Relevés du courant d'arc en fonction de la distance inter-électrodes d. 107
4.42 Impédance corona et évolution de la constante de temps en fonction de la longueur d'arc. 108
4.43 Relevés du courant d'arc en fonction de la charge du circuit. 109
4.44 Caractéristique dynamique. 109

5.1 Architecture proposée. 114
5.2 Entrées et sortie du système de détection SD. 114
5.3 Schéma général du système de détection. 115
5.4 Localisation de deux Gaborettes $G(b_1, \omega_1)$ et $G(b_2, \omega_2)$. 117
5.5 Plan temps-fréquence. 118
5.6 Exemple de décomposition d'une tension d'arc réalisé avec l'outil Matlab sur des signaux bruités obtenus avec le méta-modèle. 120
5.7 Représentation des coefficients d'une ondelette et de leur spectre. 121
5.8 Exemple de décomposition d'un signal de courant d'arc réalisée avec l'outil Matlab. 121
5.9 DWT par Daubechie 10 avec bruit (gauche) et sans (d5 = détail de niveau 5). . . . 122
5.10 Diagrammes circulaires de comparaison de la sensibilité au bruit pour la famille Coifflet. 123
5.11 Comparatif de la robustesse au bruit des familles Coiflet, Symmlet et Debauchie. . . 124
5.12 Signaux et plan temps fréquence avec une ondelette adaptée. 125
5.13 Comparaison des plan temps fréquence entre l'ondelette adaptée et l'ondelette Coif5. 126
5.14 Détection d'un défaut d'arc par transformée en ondelettes du courant. 127
5.15 Détection d'un défaut d'arc par transformée en ondelettes de la tension. 128
5.16 Évolution de la densité spectrale d'énergie du signal $S(k)$. 130
5.17 Réponse en fréquence d'un détecteur surveillant f_0. 131
5.18 Réponse spectrale du détecteur et gabarit de détection. 131

5.19 Filtre « in-between »pour harmoniques impaires. 132
5.20 Schéma de principe d'un détecteur multi-harmonique proposé. 132
5.21 Méthode de différenciation appliquée à un signal présentant une variation soudaine d'amplitude [0.03s-0.065]. 134
5.22 Résultat de la méthode de différenciation après binarisation par seuillage. 135
5.23 Application du traitement à un signal présentant un défaut d'arc. 135
5.24 Signaux de courant leurres. Figures extraites de [GWD03] 136
5.25 Circuit permettant de leurrer un algorithme de détection. 136
5.26 Application à un défaut d'arc simulé avec le méta-modèle. 137
5.27 Détection d'un défaut de courant d'arc par méthode de différenciation temporelle. . 138
5.28 Détection d'un défaut de tension d'arc par méthode de différenciation temporelle. . 139
5.29 Structure d'un filtre RIF interpolateur d'ordre 2. 141
5.30 Principe de l'interpolation moyennée. 141
5.31 Architecture de Farrow du second ordre. 142
5.32 Représentation de la fonction de transfert du filtre en fonction du délai D. 143
5.33 Schéma de principe de détection utilisant le filtre extrapolateur. 143
5.34 Signaux en entrée (bleu) et en sortie (rouge) de l'extrapolateur. 144
5.35 Signaux d'arc en entrée (bleu) et en sortie (rouge) de l'extrapolateur. 144
5.36 Principe de détection utilisant le filtre interpolateur. 145
5.37 Détection d'un défaut d'arc par méthode d'interpolation du courant. 146
5.38 Détection d'un défaut d'arc par méthode d'interpolation de la tension. 147
5.39 Détection d'un défaut d'arc par méthode de la dérivée de la tension. 149
5.40 Détection d'un défaut d'arc par méthode de la dérivée du courant. 150
5.41 Diagramme Matlab-Simulink du détecteur. 151
5.42 Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 1 ou 2. 154
5.43 Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 1 ou 2. 155
5.44 Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 3. 156
5.45 Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 3. 157
5.46 Comparatif des méthodes de détection avec un courant d'arc de type 4. 158
5.47 Comparatif des méthodes de détection avec une tension d'arc de type 4. 159
5.48 Courbes de disjonctions du détecteur. 161
5.49 Représentation 3D de la courbe de disjonction. 161

7.1 Architecture du détecteur proposé 169

Liste des tableaux

2.1 Capacité d'une architecture à détecter un type d'arc. 27
2.2 Types de protections réalisées par un AFCB. Table extraite de [JW03] 30

3.1 Tension du générateur (noir), courant d'arc (rouge), tension d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle exponentiel-hyperbolique. 49
3.2 Tension du générateur (noir), courants d'arc (rouge), tensions d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle le modèle à diodes. 51
3.3 Tension du générateur (noir), courant d'arc (rouge), tension d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle de Matthews. 53
3.4 Tension du générateur (noir), courants d'arc (rouge), tensions d'arc (bleu) et caractéristiques dynamiques obtenus avec le modèle de Kauffman. 55
3.5 Tableau comparatif des allures de tension et de courant d'arc expérimentales et simulées. 58
3.6 Tableau comparatif des caractéristiques dynamiques expérimentales et simulées. . . 59
3.7 Possibilités de modélisation suivant les types d'arcs. 60
3.8 Possibilités de modélisation suivant le mode d'alimentation. 60
3.9 Tableau comparatif des formes de courant et de tension. 75
3.10 Tableau comparatif des caractéristiques dynamiques obtenues expérimentalement et en simulation. 76

4.1 Elements du circuit d'amorçage. 92
4.2 Sondes de mesures. 99

5.1 Contenu fréquentiel des signaux de courant et de tension pour les quatre types d'arc. 129
5.2 Liste d'abréviations utilisées avec la table 5.3. 152
5.3 Comparaison qualitative des algorithmes de détection. 153
5.4 Comparaison des algorithmes par type pour l'analyse du courant d'arc. 153
5.5 Comparaison des algorithmes par type pour l'analyse de la tension d'arc. 153

Bibliographie

[A02] Ayrton H., « The Electric Arc » , *Printing and Publishing Company*, London, 1902.

[AF06] Airbus France, « Procédé et dispositif de détection d'un phénomène d'arc électrique sur au moins un câble électrique. » , *Organisation Mondiale de la Propriètè Intellectuelle*, WO 2006/037874 A1, 2006.

[AGB92] J.I. Agbinya, « Interpolation using the discrete cosine transform, » *Electronics Letters*, Vol. 28, No. 20, September. 1992.

[AS08] Society of Automotive Engineers, « AS5692 » , Revised, 2008.

[B06] Berger S., « Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits » , *ICEC 2006*, Sendai, 6-9 June 2006.

[BCR98] Brooks, Charles, Reneau, « Arcing fault detector testing and demonstration system » , *United States Patent*, 5834940, 1998.

[BER06] Berger S., « Mathematical approach to model rapidly elongated free-burning arcs in air in electric power circuits » , *ICEC 2006*, , Sendai, 6-9 June 2006

[BHE09] M. Banejad, R. Allah Hooshmand and M. Torabian Esfahani, « Exponential Hyperbolic Model for Actual Operating conditions of three phase arc furnaces » , *American journal of applied sciences*, 6, n°8, pp. 1539-1547, 2009.

[BP07] Abhishek Bansal, G. N. Pillai. « High Impedance Fault Using LVQ Neural Networks » , *International journal of computer, information, and system science, and engineering*, volume 1, 2007 ISSN 1307-2331.

[BRE98] A. Bremond, « Slic protection » , *ST Application Note AN386/0898*, 1998.

[C07] Crouzet, « Dispositif de détection d'arc électrique, dispositif de coupure comportant un tel dispositif et procédé de détection d'arc électrique » , *Brevet Européen*, EP 1845599 A1.

[C39] Cassie A. M., « Théorie nouvelle des arcs de rupture et de la rigidité des circuits » , *CIGRE Report, 102*, 1939.

[CB10] C. boucher « Cours de physique des plasmas, chapitre 7, sources et réacteus plasma » , *INRS-ERT*, NRG9002, 2010.

[CBTBJ09] Carvou, E. Ben Jemaa, N. Tian, S. Belhaja, Z. Jusselin, B. « Electrical Arc Characterization For Ac-Arc Fault Applications » , *Proceedings of the 55th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2009

[DA05] B. Diong S. Arunachalam, « A Parametric Model Approach to Arc Fault Detection for DC and AC Power Systems » , *Industry Applications Conference*, 41st IAS Annual Meeting, 2006.

[DB01] D. Brechtken, « Preventive Arc Fault Protection » , *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2001 IEEE/PES.

[DL05] H. A. Darwish and N. I. Elkalashy, « Universal Arc Representation Using EMTP » , *Transactions on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 772-779, April 2005

[DH98] C. Dick and F. Harris, « FPGA interpolators using polynomial filters, » *The 8th International Conference on signal Processing applications and technologie,* pp. 361-364, September. 1998.

[E08] Eaton corporation, « Zone Arc Fault Detection » , *United States Patent*, US 2008/0100305 A1, 2008.

[EAT08] Eaton Corporation, « How does an AFCI works ? » , *Arc Faults Circuit Interrupter Application Note*, November, 2008.

[EL07] N. I. Elkalashy, M. Lehtonen, « Modeling and Experimental Verification of High Impedance Arcing Fault in Medium Voltage Networks » , *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 14, No. 2 ; April 2007.

[FAR88] C.W. Farrow, « A continuously variable digital delay element, » *IEEE International Symposium on Circuits and Systems,* pp. 2641-2645, June. 1988.

[FK09] F. Koliatene, « Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique » , l'Université Toulouse III 2009.

[FR02] R. de Castro Fernandez, H. N. Diaz Rojas, « An overview of wavelet tranforms application in power systems » , *14th PSCC, Sevilla, Juin 2002, Session 01, Paper 6.*

[FK09] F. Koliatene, « Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique » , l'Université Toulouse III 2009.

[G08] E.J. Guérin, « Le docteur Joseph-Ignace Guillotin » , *Bulletin de la Société des Archives Historiques de Saintonge et d'Aunis, tome XXVIII année 1908*, tome XXVIII, 1908.

[GM00] T. Gammon, J. Matthiews, « Arcing-Fault Models for Low-Voltage Power Systems » , *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, 2000 IEEE.

[GM99] T. Gammon, J. Matthiews, « The historical evolution of arcing-fault models for low-voltage systems » , *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference.* 1999 IEEE.

[GMGB01] Parise, G., Martirano, L., Grasselli, U., Benetti, L., « The arc-fault circuit protection » , *Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting.*, 2001 IEEE.

[GMT07] M.A.Golkar, S.Meschi, M.Tavakoli Bina, « A Novel Method of Electrical Arc Furnace Modeling for Flicker Study » , *ICREPQ07*, 2007.

[GS98] Gregory, G.D., Scott, G.W., « The arc-fault circuit interrupter, an emerging product » , *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1998 IEEE* , 1998.

[GWD03] Gregory, G.D., Kon Wong, Dvorak, R., « More About Arc-Fault Circuit Interrupters » , *Industry Applications Conference*, IEEE 2003.

[H89] U. Habedank, « Improved evaluation of shortcircuit breaking tests » , *Report at the Colloquium of CIGRE SC 13*, Sarajevo (Yogoslavia), May 1989.

[HBE08] R. Hooshmand, M. Banejad, M. Torabian Esfahani, « A new time model domain model for electric arc furnace » , *journal of electrical engineering*, vol 59, n°4, pp. 195-202, 2008.

[HDE05] Hatem A. Darwish, Nagy I. Elkalashy, « Universal Arc Representation Using EMTP » , *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol 20, n2, april 2005, pp. 81-88.

[HDNE05] Hatem A. Darwish, Nagy I. Elkalashy, « Universal Arc Representation Using EMTP » , *IEEE Transactions on power delivery*, vol 20, n°2, april 2005, pp. 81-88.

[HHH98] S-J Huang, C-T Hsieh, C-L Huang, « Application of wavelets to classify power system disturances » , *Electric Power Systems Research*, Elsevier, 1998.

[HI05] Honeywell International Inc., « Arc fault detection and confirmation using voltage and current analysis » , *Organisation Mondiale de la Propriètè Intellectuelle*,PCT/US06/36043, 2005.

[HKZ05] Hassan Khorashadi Zadeh, G. N. Pillai. « An ANN-Based High Impedance Fault Detection Scheme : Design and Implementation » , *The Berkeley Electronic Press*, 2005.

[HM004] Z. A. Haftbaradaran and K. Martin, « An interpolation filter based on spline functions for non-synchronized timming recovery, » *IEEE International Symposium on Circuits and Systems* Vol. IV. pp. 309-312, May. 2004.

[HU07] Hutter S., Uglesic I., « Universal arc resistance model » , *19th International Conference on Electricity Distribution*, Vienna, 21-24 may 2007.

[IBSFZ09] Zquierdo, Barrado, Sanz, Fernandez, Zumel, « Modeling methods for Solid State Power Controllers (SSPC) » , *Compatibility and Power Electronics* , , 2009. CPE 2009.

[IG10] Irène Gannaz, « Cours d'Introduction aux Ondelettes » , *INSA de Lyon*, 2010.

[IP02] Y. Pelenc S. Arunachalam, « Interruption des circuits alimentés en courant continu » , *Techniques de l'ingenieur*, référence D4700, 2002.

[JDYL87] Jean Delumeau et Yves Lequin, *Les Malheurs des temps, Histoire des fléaux et des calamités en France*,Paris, Larousse, 1987.

[JJS06] J. Shea, « Identifying Causes for Certain Types of Electrically Initiated Fires in Residential Circuits » , Presentation Eaton Corporation, 2006.

[JL03] J.Luis, « Detection of electric arcs in 42-volts automotives system » , Thèse MIT, 2003.

[JM05] H. M. Jabr, A.I Megahed, « A Wavelet-FIRANN Technique for High-Impedance Arcing Faults Detection in Distribution Systems » , *International Conference on Power Systems Transients*, (IPST 05) in Montreal, Canada, 19-23 juin 2005.

[JMR05] J.-M. Rax, « Physique des plasmas, cours et applications » , *Dunod, Paris*, 2005 ISBN 2-10-007250-1.

[JW03] John A. Wafer. « The Evolution of Arc Fault Circuit Interruption » , *51st IEEE HOLM Conference on Electrical Contacts*, 2003.

[KEC99] C. Kimblin, J. Engel, B. Clarey. « Arc-Fault Circuit Interrupters » , *International Association of Electrical Inspectors*, 1999.

[KR00] R. El-Kouatly and S.H. El-Ramly, « Improving temperal resolution by using Lagrange interpolation filter, » *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and signal Processing,* pp. 361-364, June. 2000.

[LDIT07] M. Lehtonen, H. A. Darwish, M. A. Izzularab and A.-M. I. Taalab, « DWT-Based Investigation of Phase Currents for Detecting High Impedance Faults Due to Leaning Trees in Unearthed MV Networks » , *IEEE Power Engineering Society* General Meeting, Tampa, Florida, USA, June 24-28, 2007.

[LL] L. Lasne, « Etude des Bobines de Tesla , modélisation, alimentation électronique et pédagogie associée » , *Université de Bordeaux 1,* , Centre de Ressources en EEA.

[LL05] S.J. Li, Y.C. Li, « Arc fault detection based on wavelet packet » , *Proceedings of the Fourth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Guangzhou, 18-21 August 2005.

[LPIS00] D. Luengo, C. J. Pantaleon, J. Ibanez and I. Santamaria, « Design of simultaneous sampling systems based on fractional dealy Lagrange filter » , *IEEE Transactions on circuits and systems,* Vol. 47, NO. 5, May. 2000.

[LR01] D. Luengo, C. J. Pantaleon, J. Ibanez and I. Santamaria, « Détection d'arcs électriques séries par analyse temps-fréquence et traitement morphologique » , *Colloque GRETSI, Groupe d'Etudes du Traitement du Signal et des Images*, 2001.

[LSL03] T. M. Lai, L.A. Snider and E. Lo « Wavelet Transform Based Relay Algorithm for the Detection of. Stochastic High Impedance Faults » , *International Conference on Power Systems Transients*, IPST 2003.

[LSL06] Lai T. M., Snider L. A., Lo E. « Wavelet transform based relay algorithm for the detection of stochastic high impedance faults » , *Electric power system research*, vol 76, pp 6626-633, 2006.

[LSW05] S. Y. Leung, Laurence A. Snider, Cat S. M. Wong, « SF6 Generator Circuit Breaker Model » , *Conference on Power Systems Transients (IPST'05)*, Canada on June 19-23, 2005.

[M43] Mayr O., « Beitrage zur theorie des statischen und des dynamischen Lichtbogens » , *Archiv fr Elektrotechnik, vol Band 37*, Heft 12, pp 588-608, 1943.

[MB03] Momoh, Button, « Design and analysis of aerospace DC arcing faults using fast fourier transformation and artificial neural network, » *Power Engineering Society General Meeting*,2003, IEEE.

[MK98] Medora, N.K. ; Kusko, A. ;, « Impact of tuned harmonic filters and power factor correction capacitors on long-duration arcing fault current » , *Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third IAS Annual Meeting.*, 1998

[MB10] J.M. Martel, F. Berger, « A study of arcing fault in the low-voltage electrical installation » , *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010.

[MRL05] Michalik M., Rebizant W., « Lukowicz M., Wavelet transform approach to high impedance fault detection in MV Networks » , *Power Tech*, 2005 IEEE Russia, June 2005.

[OC02] O. Calvet, « Accoustique appliquée aux techniques du son » , *EL Educalivre*, ISBN 2-7135-2373-7, 2002. 2008.

[OCI08] Ospina G. I., Cubillos D., Ibanez L., « Analysis of arcing fault models » , *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Bogota, 10 octobre 2008.

[OPS75] G. Oetken, T.W. Parks and H.W. Schussler, « New results in the design of digital interpolators, » *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and signal Processing,* Vol. ASSP-23,NO. 3, June. 1975.

[ORRM03] HLionel R. Orama-Exclusa, Bienvenido Rodríguez-Medina, « Numerical Arc Model Parameter Extraction for SF6 Circuit Breaker Simulations » , *International Conference on Power Systems Transients* , IPST 2003 in New Orleans, USA

[P99] Parry, « Apparatus providing response to arc faults in a power distribution cable protected by cable limiters » , *United States Patent*, 5986860, 1999.

[PFW] Peek, F.W., « Dielectric Phenomena in High Voltage Engineering » , *McGraw-Hill.*

[PV56] L. Patouriaux, A. Varoquaux, « Electricité pratique » , *Librairie Delagrave*, 1956.

[S99] Scott, « Zone Arc Fault Dtection » , *United States Patent*, 5986860,1999.

[SCH00] Schavemaker P. H., Van der Sluis L., « An improved mayr type arc model based on current zero measurement » , *IEEE Transactions on Power delivery*, vol 15, n2, april 2000.

[SMUB06] C. Sharmela, M.R Mohan, G. Uma, J.Baskaran, « A Novel Detection and Classification Algorithm for Power Quality Disturbances using Wavelets » , *American Journal of Applied Sciences*, 2006.

[STM03] ST. Microelectronics, « L318 datasheet, overvoltage and overcurrent protection » , *www.st.com*, 2003.

[STRD] M. Sushama, G. Tulasi Ram Das,« Detection and classification of voltage swells using adaptative decomposition and wavelet transforms » , *Journal of Theoretical and Applied Information Technology.*

[SV00] S. Vacquié, « L'arc électrique » , *CNRS Edition*, 2000, ISBN 2-271-05698-5.

[SVDS00] P.H. Schavemaker, L. Van Der Sluis, « An Improved Mayr-Type Arc Model Based on Current-Zero Measurements » , Proceedings of the *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 15, No. 2, April 2000.

[SVDS02] P.H. Schavemaker, L. Van Der Sluis, « The arc model blockset » , Proceedings of the *Second IASTED International Conference*, Greece 2002.

[SZ10] J.J. Shea, X. Zhou, « RF currents Produced from AC Arcs with Asymmetrical Electrodes » , *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010.

[TRU94] Frédéric Truchet, « Ondelettes pour le signal numérique » , *éditions Hermes*, Paris, 1994,pp.1-52

[TVDDG07] P. Tant, B.Vanbrabant, Driesen, J. Deconinck, Geert, « Hot Restrike Characterization of HID Lamps Using a Simple Model » , *Proceedings of LIGHT SOURCES*, pages :147-148, 2007.

[UL08] Underwriters Laboratories Inc. (UL), « UL Standard for Safety for Arc-Fault Circuit-Interrupters, ANSI UL 1699 » , Second Edition, 2008.

[V00] V. Valimaki, « A new filter implementation strategy for Lagrange interpolation, » *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and signal Processing,* pp. 361-364, June. 2000.

[VLKL00] V. Valimaki and T.I. Laakso, « Principles of fractional delay filters, » *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and signal Processing,* pp. 361-364, June. 2000.

[WEI93] A. Weimer, « Electrical Power Technology for the more Electrical Aircraft » , *AIAA/IEEE Digital Avionics System Conference*,1993, pp.445-450.

[WLSS05] Wu H., Li X., Stade D., Schau H., « Arc fault model for low voltage AC systems » , *IEEE Transactions on Power delivery*, vol 20, N°2, april 2005.

[YE03] Z. Ye, « Linear phase Lagrange interpolation filter using odd number of basepoints, » *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and signal Processing,* vol. VI pp. 237-240, April. 2003.

[ZCL06] H. Zhang, T. Chen, W. Li, « Arc Fault Signatures Detection on Aircraft Wiring System » , *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, June 21 - 23, 2006, Dalian, China.

[ZS06] Zamanan N., Sykulski J. K., « Modelling arcing high impedances faults in relation to the physical processes in electric arc » , *6th WSEAS international conference on power system*, Lisbon, 2006.

[ZS10] P. Zeller, J. Schoepf, « Advanced Arc Model for Computation of Low Current Arc Characteristics » , *Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010.

Résumé

Les arcs électriques ont été à l'origine de plusieurs cas d'accidents aériens graves par incendie ou par destruction d'organes électriques fondamentaux (ex : actionneurs, panneau supérieur,...) (TWA 800 en 1996 et Vol 11 Swiss Air en 1998). Les prévenir et les détecter constituent une amélioration notable de la sécurité en aéronautique. Ainsi, bien que le problème soit connu depuis longtemps, les premiers systèmes de détection d'arcs pour l'avionique sont très récents. Dans un avion, ces défauts ont pour causes principales le vieillissement et la détérioration des câbles. Afin d'étudier et de proposer un système de détection d'arc, les trois phases d'étude suivantes ont été suivies chronologiquement dans ce travail de thèse : premièrement, la réalisation d'un banc de production et de caractérisation des grands types d'arcs électriques (AC et DC). Ce système permet de produire des arcs contrôlés en intensité et en durée selon les modes série, parallèle, DC et AC. L'amorçage des arcs est obtenu par surtension. Cette surtension est produite par commutation inductive. Deuxièmement, la recherche de modèles électriques fiables expliquant les phénomènes d'arcs. Nous proposons donc un meta modèle associant les caractéristiques de différents modèles comportementaux et impédencemétriques. Cette association permet d'améliorer significativement les performances globales de la modélisation dans les circuits. Troisièmement, l'étude et la proposition d'algorithmes de détection en vue de l'implantation sur circuit électronique suffisamment réduit pour être implanté dans un disjoncteur. La détection de la signature d'arc se rapproche d'un problème de détection d'informations fortement bruitées pour lequel peu de solutions ont été jusqu'à présent proposées car cette recherche est relativement nouvelle. Nous proposons et testons différentes méthodes de détection.
Mots-clés arc, défaut d'arc, conductance d'arc, détection de défaut d'arc, génération de défaut d'arc.

Abstract

The arcs have been the source of several aircraft accidents by fire or serious destruction of the electrical fundamentals (eg actuators, top panel ,...) (TWA 800 in 1996 and Swiss Air Flight 11 1998). Prevent and detect constitute a significant improvement in aviation safety. Thus, although the problem has been known for a while, detection systems for avionics are very recent. In an aircraft, these defects are caused by the aging and the deterioration of the cables. To study and propose a system for arc detection, the following three phases were followed chronologically in this thesis : first, the developement of a test bench to characterize the main types of arcs (AC and DC). This system can produce arcs controlled intensity and duration depending on the mode serial, parallel, DC and AC. The initiation of arcs is obtained by overvoltage. This surge is produced by inductive switching. Second, the search for reliable electric models explaining the phenomena of arcs. We therefore propose a meta model combining the characteristics of different behavioral models and impedancemetry. This combination significantly improves the overall performance of the modeling in the circuits. Thirdly, the study of detection algorithms for implementation on an electronic circuit, small enough to be implanted in a circuit breaker. We propose and test different methods of detection.
Keywords : arc, arc fault, arc conductance, arc fault detection, arc fault generation.