



HAL
open science

Étude et détection des défauts d'arcs électriques dans un réseau électrique aéronautique 270V HVDC

Jean-Baptiste Humbert

► **To cite this version:**

Jean-Baptiste Humbert. Étude et détection des défauts d'arcs électriques dans un réseau électrique aéronautique 270V HVDC. Energie électrique. Université de Lorraine, 2018. Français. NNT : 2018LORR0187 . tel-01980819

HAL Id: tel-01980819

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01980819v1>

Submitted on 8 Jun 2021

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

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



AVERTISSEMENT

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

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

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

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

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



UNIVERSITÉ
DE LORRAINE

École doctorale Informatique Automatique Électronique Électrotechnique
Mathématiques

Étude et détection des défauts d'arcs électriques dans un réseau électrique aéronautique 270V HVDC

THÈSE

Présentée et soutenue publiquement le 4 juin 2018

Pour l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LORRAINE
(SPÉCIALITÉ SYSTÈMES ÉLECTRONIQUES)

Par Jean-Baptiste HUMBERT

Composition du jury

Président :

M. RAISON Bertrand, Professeur

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER - LABORATOIRE G2ELAB, ENSE3, SAINT MARTIN D'HÈRES

Rapporteurs :

M. BOURENNANE El-Bay, Professeur

UNIVERSITÉ DE BOURGOGNE- LABORATOIRE LE2I, DIJON

Mme. FRESSE Virginie, MCU-HDR,

UNIVERSITÉ JEAN MONNET - LABORATOIRE HUBERT CURIEN, SAINT ETIENNE

Examineurs :

M. CARVOU Erwann, Ingénieur de recherche - HDR

UNIVERSITÉ DE RENNES1 – LABORATOIRE IPR , RENNES

Direction de thèse :

M. Patrick SCHWEITZER, MCU-HDR,

UNIVERSITÉ DE LORRAINE – LABORATOIRE IJL, DIRECTEUR DE THÈSE

M. Serge WEBER, Professeur,

UNIVERSITÉ DE LORRAINE– LABORATOIRE IJL, CO-DIRECTEUR DE THÈSE

Invité :

M. Jonathan ANDREA, Docteur Ingénieur

ESTERLINE POWER SYSTEMS – SARRALBE

Institut Jean Lamour – Mesure et Architecture Électronique MAE 406

Remerciements

Je remercie mes directeurs de thèse Patrick SCHWEITZER et Serge WEBER pour la confiance qu'ils m'ont accordée ainsi que pour leur diligence tout au long de ces années de thèse.

Mes remerciements vont également auprès des membres du jury, pour leurs appréciations et leurs retours concernant le manuscrit et mes travaux en général.

Ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien du projet AEROCOTS et du financement par le Fond Universel Interministériel (FUI) mené par le groupe LEACH International en collaboration avec l'Université de Lorraine et d'autres collaborateurs industriels et universitaires.

Je remercie également Étienne TISSERAND pour sa disponibilité et ses conseils en traitement du signal ainsi que les membres de l'équipe 204 de l'IJL pour leur expertise en plasma de décharge. Je remercie particulièrement M. Robert HUGON et M. Frédéric BROCHARD non seulement pour leurs visions aiguisées et des plus rapides sur les décharges, mais surtout pour leurs sympathies toujours à l'écoute et de bons conseils dans tous les états de la matière. Je me dois également de remercier les membres du laboratoire avec qui j'ai souvent échangé, ingénieur de recherche, professeurs, chercheurs et camarades de thèse d'horizons parfois si lointains.

Au terme de ce travail, je remercie mes proches que j'ai délaissés ces derniers mois voire années pour me consacrer à mes travaux. Je tiens d'ailleurs à remercier vivement ma compagne, Rona, pour sa patience, son soutien, sa bienveillance, sa compréhension durant toutes ces années. Je salue également ma fille, Maeline, qui a grandi en même temps que ce projet scientifique.

Table des matières

REMERCIEMENT

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION GÉNÉRALE

LEXIQUE

1 PROPRIÉTÉS DES ARCS ÉLECTRIQUES	7
1.1 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES	7
1.1.1 CLASSIFICATION DES PLASMAS	7
1.1.2 PROCESSUS DE FORMATION D'UNE DÉCHARGE ÉLECTRIQUE JUSQU'À L'ARC	8
1.2 INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES D'EXPÉRIMENTATIONS SUR L'ARC	14
1.2.1 QUALIFICATION EXPÉRIMENTALE DES INTERACTIONS EXTÉRIEURES À LA DÉCHARGE	14
1.2.2 EFFETS SUR L'IMPÉDANCE DE L'ARC	15
1.2.3 EFFETS SUR LA DYNAMIQUE DU SIGNAL ÉLECTRIQUE D'ARC	20
1.2.4 EFFET SUR LA DISTRIBUTION DES BRUITS ÉLECTRIQUES DE L'ARC	22
1.2.5 CONCLUSION SUR L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT D'ARC SELON L'ENVIRONNEMENT	23
1.3 COMPARAISON DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES AUX ÉLECTRODES	24
1.3.1 DISPOSITIF DE CAPTURE VIDÉO ET MESURES	24
1.3.2 OBSERVATIONS PAR IMAGERIE RAPIDE	26
1.4 CONCLUSION DE L'ÉTUDE PHÉNOMÉNOLOGIQUE	37
2 LE RÉSEAU AÉRONAUTIQUE ET PROTECTIONS	41
2.1 CONTRAINTES LIÉES AU RÉSEAU AÉRONAUTIQUE	41
2.1.1 DÉFAILLANCES ÉLECTRIQUES DANS LES AVIONS	44
2.1.2 RISQUES LIÉS AUX ARCS	45
2.1.3 PRÉSENCE DE DÉFAUT D'ARCS ÉLECTRIQUES DANS LES TOPOLOGIES À COURANT CONTINU	49
2.2 PROTECTIONS ÉLECTRIQUES CONVENTIONNELLES ET AFD	51
2.3 GRANDS PRINCIPES DE DÉTECTION D'ARCS	53
2.3.1 CLASSIFICATION GÉNÉRALISTE	53
2.3.2 CLASSIFICATION DES MÉTHODES D'ANALYSE PAR CONDUCTION ÉLECTRIQUE	54
2.3.3 PRINCIPE DE LA MÉTHODE COMBINÉE MULTICRITÈRES	64
2.3.4 DISPOSITIFS DE DÉTECTION SUR COURANT CONTINU	65
2.4 CONCLUSION	66
3 BANC EXPÉRIMENTAL ET BASE DE DONNÉES	69
3.1 ASPECT NORMATIF	69
3.1.1 DÉFAUTS ÉLECTRIQUES RECONSTITUÉS EN LABORATOIRE	71
3.2 BANC DE MESURE	74
3.2.1 CONSTITUTION ET APPAREILLAGES DU BANC DE MESURE	74
3.2.2 ARCS	75
3.2.3 CONFIGURATION GÉNÉRALE	77
3.3 BASE DE DONNÉES DE SIGNAUX EXPÉRIMENTAUX	78
3.3.1 SÉRIE DE DONNÉES DE TEST	78

3.3.2	SIGNAUX EXPÉRIMENTAUX	80
3.4	MÉTHODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES	84
4	CONTRIBUTION À LA RECHERCHE DE CRITÈRES DISCRIMINANTS POUR LA DÉTECTION	89
4.1	DÉTECTION PRÉLIMINAIRE PAR LA VARIATION BRUTALE DE CHARGE	90
4.1.1	ANALYSE DE LA RÉPARTITION DES VARIATIONS D'IMPÉDANCE	90
4.1.2	CARACTÉRISATION DU DÉFAUT À PARTIR DE LA VARIATION D'IMPÉDANCE	91
4.1.3	EXPLOITATION DE LA CHUTE DE COURANT POUR LA DÉTECTION ET L'IDENTIFICATION DE DÉFAUT	92
4.2	EXTRACTION DES COMPOSANTES STOCHASTIQUES DE L'ARC TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE	96
4.2.1	PRINCIPE DE L'ESTIMATION APRIORI (LATENTE) ET MODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES	97
4.2.2	PERFORMANCE DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION DE BRUIT	102
4.3	CRITÈRES D'ANALYSE PROPOSÉS POUR LA DÉTECTION DE DÉFAUT D'ARC	110
4.3.1	CRITÈRE 1 : PUISSANCE DU BRUIT D'ARC (PR : PUISSANCE DU RÉSIDU)	111
4.3.2	CRITÈRE 2 : DISPERSION DE L'AUTOCORRÉLATION DU RÉSIDU (CENTRALISATION)	117
4.3.3	CRITÈRE 3 : MOYENNE DE LA VARIANCE GLISSANTE DU RÉSIDU (MVG-R)	121
4.3.4	ANALYSE FRÉQUENTIELLE : CRITÈRE 4 ET 5	128
4.3.5	CONCLUSION SUR LES CRITÈRES	150
5	MÉTHODE PROPOSÉE ET DÉMONSTRATEUR	153
5.1	ASSOCIATION DE MULTIPLES CRITÈRES	153
5.1.1	CONSTITUTION D'UN DÉTECTEUR COMBINÉ [DÉTECTION D'ÉVÈNEMENT, ANALYSE, DÉCISION]	153
	RÉSULTATS	154
5.1.2	CONCLUSION	156
5.2	PERSPECTIVES ET ÉVOLUTIONS	158
5.3	INTÉGRATION PARTIELLE DES ALGORITHMES DANS UN DÉMONSTRATEUR	160
	DÉMONSTRATION ET PERFORMANCES	161
6	CONCLUSION GÉNÉRALE	169
7	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	175
8	ANNEXES	189

Lexique

ACCURENCY : Justesse des diagnostics, sans erreur

AFCI : Arc-Fault Circuit Interrupteur : idem AFDD

AFDD : Arc-Fault Detector Device : Dispositif de détection d'arc électrique (et protection)

ARC TRACKING : Arc propagé entre 2 conducteurs parallèles

DDP : Différence de potentiel entre deux conducteurs

DSP/PSD : Power Spectral Density / Densité spectrale de Puissance

DWT : Discret Wavelette Transform : transformé en ondelettes

ESTIMATEUR PAR PRÉDICTION : Estimateur à priori à partir des informations antérieures.

FFT/DFT : Fast Fourier Transform / Discret Fourier Transform : transformé de Fourier rapide ou discrète

GAP : Espace, vide entre les électrodes

GIU : Convertisseur électronique d'énergie

GLITCH : Perturbation non désirée, ponctuelle provoquée lors de transition ou de commande (interrupteur, relais, etc.).

HVDC : high-voltage, direct current : électronique de puissance utilisée pour le transport de l'électricité en courant continu

LIU : Load Interface Unit : Interface de charge

IDS : Indice de Densité Spectrale (SDI : Spectral Density Index) : Correspond à la dispersion du spectre fréquentiel au-delà d'un seuil d'amplitude.

NOARC : Évènement transitoire sans défaut

SCORE : Valeur de sortie d'une méthode exprimant le résultat sans discrimination

SENSITIVITY : Sensibilité : Capacité à détecter les défauts

SID : Storage Interface Unit : Unité d'interface de stockage d'énergie

SPECIFICITY : Spécificité : Capacité à ne pas faire de fausses détections à tort.

SSPC : Solid State Power Controller : Dispositif de répartition intelligente d'énergie pour les aéronefs.

STFT : Short Time Fourier Transform : transformé de Fourier Fenêtrée

TENDANCE D'UN SIGNAL : valeur approximative d'un signal qui reconstruit l'évolution de celui-ci sans précision.

TOR : Tout ou rien

TRIP : Action ou commande d'ouverture un circuit électrique pour mise en protection

WFT : Windowed Fourier Transform : Idem STFT

Introduction générale

Les travaux présentés dans ce rapport ont été menés dans le cadre d'une thèse financée par le Fonds Unique Interministériel dans le contexte d'un consortium université-entreprise AEROCOTS piloté par la société Leach International (Groupe Esterline). L'objectif du projet Aerocots est de créer un cœur modulable de distribution d'énergie dédié à l'aéronautique, intégrant la protection et la coupure de l'alimentation d'un réseau HVDC 270V_{DC}. Aerocots avait à relever plusieurs défis tels que la réalisation d'une plateforme adaptative à faible coût, la conception de système de coupure DC haute tension et fort courant, et enfin la détection de défauts d'arcs électriques.

1. Contexte et objectifs

Les normes UL1699 et IEC62606, relatives à la protection contre les défauts d'arc, définissent l'arc électrique comme "une décharge lumineuse d'électricité dans un milieu isolé produisant une dégradation des électrodes par vaporisation " et le défaut d'arc est défini par "l'apparition d'un arc non intentionnel dans un circuit".

Dans le domaine de l'aéronautique, l'apparition d'un défaut d'arc électrique accidentel peut se produire à tout moment et peut entraîner des conséquences dommageables dans un système électrique. Ainsi, les défauts d'arcs peuvent être à l'origine de crashes tels que celui du vol 800 de la TWA (230 morts suite à un arc tracking à proximité des réservoirs fin 1996) ou le vol SR111 de la Swissair qui a fait 229 morts après un incendie dans le plafond de la cabine de pilotage en 1998). Plus récemment, en 2013 dans un Boeing 787 Dreamliner, des défauts dans le tableau électrique sont apparus sous la forme d'une élévation de température suite à un mauvais serrage des plots d'alimentation provoquant l'apparition de faux contacts.

Historiquement le réseau électrique aéronautique est constitué par une alimentation alternative (115V – 400 à 800 Hz et 230 volts pour les derniers appareils) et un bus continu 28 volts DC. L'évolution actuelle de la technologie se dirige vers un réseau aéronautique du futur tout électrique afin de gagner notamment en poids et puissance disponible. Ainsi petit à petit les actionneurs hydrauliques ou pneumatiques sont abandonnés. La production d'énergie migre d'un courant AC 400Hz vers un réseau HVDC 270VDC voire 540VDC. Cela engendre plus de 500km de câbles pour l'A380, et un nombre croissant d'interconnexions. L'augmentation des niveaux de la puissance et tension augmentent également le nombre de risques électriques pouvant survenir. De façon plus générale, les défauts d'isolement représentaient en 2007 plus de 55% des défaillances électriques [WTTG07] sur la flotte de Boeings pour l'armée américaine. C'est pourquoi la détection de tels phénomènes devient un enjeu majeur pour l'aéronautique.

Les défauts d'arcs électriques dans l'aéronautique ont de multiples origines : Usure des câbles, de leurs isolants, pincements, mauvais contacts, connectiques, corrosions, corps étrangers, humidité/condensation. L'augmentation de la température d'un conducteur défectueux peut entraîner la combustion des isolants à base de produits pétroliers ou la vaporisation du conducteur lui-même. Lors de la production d'un arc électrique maintenu, la température peut atteindre plus de 5000°C localement et celui-ci peut se propager sur plusieurs dizaines de centimètres dans un faisceau de câbles (arcTracking).

Les arcs peuvent se produire en parallèle sur l'alimentation (phase-masse/phase-phase) du circuit en créant une surintensité dans le circuit. Ils peuvent également se créer en série avec les charges. Dans ce cas, l'arc représente une impédance en série avec la charge et n'engendre pas d'augmentation d'intensité sur le circuit. Au contraire, sous l'effet d'un arc, la charge diminue et reste en dessous des seuils de protection pour surintensité. Les protections actuelles (fusibles, disjoncteurs

magnétothermiques, etc.) ne permettent pas de déceler spécifiquement un arc électrique série et d'en protéger les conséquences.

En l'état actuel des protections existantes, les arcs parallèles sont plus faciles à déceler, car ils produisent une surintensité. En revanche les arcs séries sont les phénomènes les plus dangereux pour les installations électriques, car il y a peu de moyens de détection mis en place et nous nous focaliserons dans ce travail uniquement sur leur détection.

La tendance visant à développer les circuits électriques continus s'est d'ailleurs généralisée à de nombreux secteurs industriels (automobile avec la voiture électrique, domestique avec les panneaux solaires photovoltaïques, alimentation des data centers, réseaux smart grid ...). C'est d'ailleurs dans le domaine du photovoltaïque que l'on trouve de nombreuses publications et brevets dédiés à l'analyse et la détection de défauts d'arc. Ces méthodes sont basées sur l'analyse fréquentielle, temporelle ou temps fréquence de la puissance, du courant ou de la tension de ligne.

2. Problématiques scientifiques et techniques

La finalité de ces travaux de thèse est de concevoir un dispositif dédié aux installations aéronautiques HVDC implanté sur chaque voie d'un cœur de distribution d'énergie (SSPC Solid State Power Controller) pour protéger le réseau contre les défauts d'arc électrique et notamment les arcs séries. Les charges aéronautiques sont principalement des résistances de chauffage et antigivrage des ailes, des actionneurs (vérins) et des convertisseurs d'énergie (onduleur, convertisseur, commande moteur, etc.).

Les paramètres et contraintes liées à cette problématique dans l'aéronautique sont les suivantes :

- La détection est basée sur le courant et la tension de l'installation au niveau du SSPC.
- Le dispositif ne peut pas être intrusif (sans injection de signaux ni perturbation du service).
- Les contraintes environnementales sont fortes (température, pression, humidité, bruit, vibrations)
- Les décisions doivent être robustes (pas de déclenchement à tort pouvant perturber le vol)
- Les algorithmes de détection doivent être implantés dans un circuit électronique embarqué.

3. Démarche suivie

Notre démarche vise d'une part la compréhension de l'environnement des arcs et d'autre part à la mise au point d'algorithmes de détection de défauts dans un réseau électrique.

À la recherche de caractéristiques critiques spécifiques aux conditions aéronautiques, notre démarche débute par la compréhension de l'influence des conditions environnementales sur le comportement des arcs et notamment la diminution de la pression sur l'amorçage d'une décharge électrique.

Pour le développement des algorithmes de détection, nous avons constitué une base de données de signaux avec et sans arcs avec divers types de charges (R, RL, à découpage, etc.). Les variations de charges sans arc sont notamment composées de signaux analogues à la variation produite par un défaut d'arc. Ces signaux seront utilisés pour la caractérisation des défauts d'arc et l'analyse multicritères.

L'analyse bibliographique qui suit nous permet d'identifier les principales méthodes de détection de la littérature et d'identifier les éléments caractéristiques propres aux défauts d'arcs pour la sélection optimale des critères de détection discriminants.

La principale difficulté est que contrairement aux arcs sur courant alternatif où l'arc s'interrompt à chaque passage à zéro et reprend lors de la demi-alternance suivante, le défaut d'arc série sur courant continu apparaît qu'une seule fois et ajoute son impédance au réseau. À partir de cet événement détecté lors de l'ajout de l'impédance d'arc, nos algorithmes sont basés d'une part sur

l'étude du bruit produit par le défaut (Analyse statistique et temporelle) et sur les variations engendrées sur le courant de ligne (Analyse fréquentielle et temps-Fréquence).

L'objectif des méthodes proposées est d'être efficace en minimisant le nombre de fausses détections pour ne pas provoquer de fausses alertes en cours de vol de l'avion tout en protégeant les systèmes contre les défauts électriques.

Les méthodes analysées sont évaluées selon une population de signaux significatifs comprenant aussi bien des cas de défauts d'arc que des cas de signaux sans anomalie. Afin de faire apparaître les performances du système le plus clairement possible, les résultats sont présentés sous la forme de matrices de confusions et de courbes de ROC.

4. Organisation de la thèse

Le mémoire de cette thèse est organisé en 5 parties.

Un premier chapitre introductif présente le comportement d'un défaut d'arc électrique série dans des conditions proches de l'aéronautique selon des conditions environnementales variables, l'observation du comportement aux électrodes par caméra rapide ainsi que la mise en relation des signaux courants/tension d'arc.

Le second chapitre est dédié au contexte et à l'état de l'art des méthodes de protections conventionnelles et expérimentales.

Le troisième chapitre est consacré à la description du banc expérimental développé afin de créer une base de données expérimentale de signatures de courant de ligne dans le milieu aéronautique. L'ensemble de ces signaux est utilisé pour tester la performance des algorithmes de détection avec l'ensemble des charges testées selon une méthode basée sur les matrices de confusion associées aux courbes de ROC. Les essais se font aux recommandations normatives des configurations mises en œuvre et rappelées dans cette partie.

Le chapitre quatre est dédié au développement de 5 discriminateurs pour la détection reposant sur l'analyse de la signature du courant de ligne. Trois d'entre eux analysent le bruit produit par l'arc et le dernier analyse le spectre fréquentiel du courant de ligne complet. Les méthodes sont validées sur plus de 1000 signaux uniques de signature courant/tension d'arc pour des charges résistives et inductives allant de 2A à 22A et de 32 μ H à 1mH. La problématique d'une discrimination par seuil est aussi abordée dans cette partie afin de choisir une valeur seuil optimal de détection selon les données expérimentales.

Un cinquième et dernier chapitre concerne l'intégration des algorithmes développés en multicritère et le développement d'un démonstrateur pour en faire la validation expérimentale.

Chapitre 1 :

PROPRIÉTÉS DES ARCS ÉLECTRIQUES

- 1.1 PROPRIÉTÉS GÉNÉRALES DES DÉCHARGES ÉLECTRIQUES
 - 1.1.1 CLASSIFICATION DES PLASMAS
 - 1.1.2 PROCESSUS DE FORMATION D'UNE DÉCHARGE ÉLECTRIQUE JUSQU'À L'ARC
- 1.2 INFLUENCE DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES D'EXPÉRIMENTATIONS SUR L'ARC
 - 1.2.1 QUALIFICATION EXPÉRIMENTALE DES INTERACTIONS EXTÉRIEURES À LA DÉCHARGE
 - 1.2.2 EFFETS SUR L'IMPÉDANCE DE L'ARC
 - 1.2.3 EFFETS SUR LA DYNAMIQUE DU SIGNAL ÉLECTRIQUE D'ARC
 - 1.2.4 EFFET SUR LA DISPERSION DES BRUITS ÉLECTRIQUES DE L'ARC
 - 1.2.5 CONCLUSION SUR L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT D'ARC SELON L'ENVIRONNEMENT
- 1.3 COMPARAISON DES PHÉNOMÈNES PHYSIQUES AUX ÉLECTRODES
 - 1.3.1 DISPOSITIF DE CAPTURE VIDÉO ET MESURES

A series of horizontal dashed lines for writing.

1 Propriétés des arcs électriques

Le domaine des arcs et des décharges électriques, ou encore des plasmas n'est pas nouveau dans la littérature scientifique. Depuis le début des années 1800 et les premières études sur les arcs électriques par Humphry Davy, de nombreux modèles ont vu le jour. La compréhension et la maîtrise de ce phénomène ont évolué dans le temps. Notre étude phénoménologique a pour objectif d'améliorer notre compréhension sur le comportement d'un arc. Pour cela, l'observation de l'arc et l'observation des signaux électriques (courant-tension-luminosité) par imagerie rapide peuvent apporter une vision nouvelle et différente sur les phénomènes d'arc électrique. L'idée directrice de ces observations expérimentales est de comprendre ou de déceler des caractéristiques propres à l'arc et de simplifier la détection de présence des arcs électriques dans les circuits continus.

Le chapitre est découpé en 3 parties :

- La première partie rappelle les propriétés générales d'une décharge électrique.
- La seconde partie porte sur l'observation de l'influence des conditions environnementales sur les résultats expérimentaux.
- Et la troisième partie met en relation les phénomènes physiques observés à l'aide d'imageries rapides et les mesures des propriétés électriques courant/tension d'arc.

1.1 Propriétés générales des décharges électriques

Le plasma d'une décharge d'arc fait partie du 4^{ème} état de la matière.

Elle est constituée d'agglomérat d'atomes ou de molécules de propriété électrique neutre. Cette neutralité est due à sa composition de charge positive (proton) équivalente aux charges négatives (électrons).

Sous certaines conditions, on distingue la présence d'un quatrième état de la matière : le "plasma". Il est semblable à un gaz, mais il a la particularité d'être constitué de particules chargées (ions, électrons) qui restent toutefois neutres dans leur ensemble.

1.1.1 Classification des plasmas

Les plasmas sont présents dans une grande partie de l'univers. De façon naturelle, ils sont présents au-delà des limites de l'ionosphère à travers les aurores boréales, les vents solaires, etc., mais aussi sur terre lors de décharges de foudre. D'autre part, un plasma peut apparaître de manière artificielle lors de décharges électriques, de stimulation laser ou encore par la combustion d'une flamme.

Ils sont classifiés [HoBe74] selon la répartition Figure 1-1 en fonction de leur température électronique kTe et de leur taux d'ionisation τ_i . La grandeur $\tau_i = \frac{n_e}{N+n_e}$ exprime le rapport de la densité électronique n_e sur le nombre total de particules $N + n_e$ dans l'espace estimé.

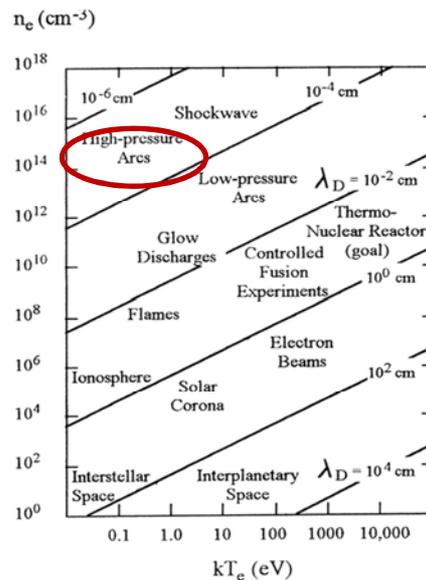


Figure 1-1 : Répartition des plasmas (naturels et de laboratoire) en fonction de leurs propriétés

Hormis la température kTe et la densité électronique n_e , la dynamique d'une décharge électrique est par ailleurs caractérisée par :

- La densité électronique : Nombre d'électrons libres n_e par unités de volume
- La densité ionique : Nombre d'ions positifs ayant perdu un électron n_i par unités de volume
- La Température électronique : Te traduit la température électronique des électrons en Kelvin. On retrouve également cette notion physique via les équations de Maxwell en kTe où k est la constante de Boltzman. Ainsi $1kTe$ (en eV) $\cong 1.4 \times 10^4 K$.
- *Le libre parcours moyen* : λ définit la distance moyenne qu'une particule chargée peut parcourir avant d'entrer en collision avec une autre. Cette probabilité s'appuie sur la vitesse de la particule et la densité de population du gaz à traverser (pression).
- *La Longueur de Debye* : λ_D correspond à la distance au-delà de laquelle le champ électrique Coulombien provoqué par les particules chargées est neutralisé par le reste des particules environnantes. Il dépend de la densité électronique, de sa température et de la permittivité du vide selon la relation :

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 kTe}{n_e e^2}} \quad (1.1.)$$

1.1.2 Processus de formation d'une décharge électrique jusqu'à l'arc

La formation d'arc électrique est un processus complexe d'interaction de la matière où différentes phases d'une décharge électrique se succèdent. Ces interactions conditionnent le déroulement de la décharge aussi bien par les échanges avec le gaz porteur de la décharge qu'avec les électrodes ayant donné naissance à la décharge.

Cette section retrace la relation entre le flux d'une décharge et son environnement ainsi que les caractéristiques courant/tension connues en littérature.

1.1.2.1 Interaction des particules

Les particules chargées soumises à un champ électrique subissent l'accélération d'une force de Coulomb. Elles accumulent une énergie cinétique qui est libérée par la collision avec d'autres particules selon la longueur de leur libre parcours. Alors, deux formes de chocs se distinguent : Élastiques et Inélastiques. Lors de collisions élastiques, les atomes conservent leur état physico-chimique. Seule leur vitesse (rotation/translation) est accrue.

En revanche, au moment des chocs inélastiques, l'impact incident transmet une énergie suffisante pour changer les propriétés des particules heurtées.

De ce choc inélastique, 2 phénomènes d'interaction peuvent se créer :

- Excitation : Lorsque l'atome acquiert une certaine quantité d'énergie pour qu'un ou plusieurs électrons passent d'un niveau d'énergie *fondamental* à un niveau d'énergie supérieur dit *excité*.
- Ionisation : Lorsque l'atome subit une collision suffisamment forte pour qu'un électron s'arrache de l'attraction du noyau et crée ainsi une charge positive (cation).
S'il ne s'éloigne pas à l'infini sans rencontrer d'autres atomes (longueur de Debye), l'électron libre peut à son tour interagir avec d'autres atomes.

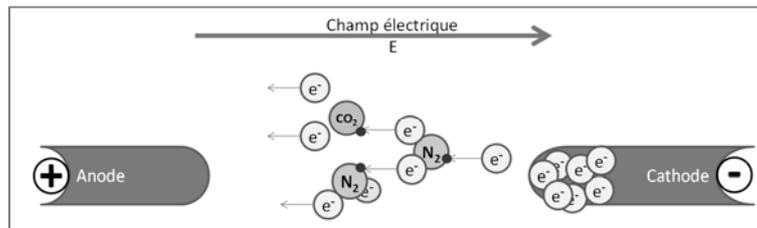


Figure 1-2 : Illustration d'une avalanche dans l'air

Remarque : Figure 1-2 présente l'effet d'un électron stimulé sous l'effet du champ électrique, au départ de la cathode polarisée électriquement à (-). L'électron rencontre alors une molécule de gaz composée d'atomes qui libère 1 électron. Le rang 2 de l'avalanche décrit l'ionisation d'un atome composant le CO₂ et la capture d'1 électron sur N₂ malgré le travail de sortie d'1 e⁻.

À l'issu de son parcours, un électron libre est susceptible de subir 3 types d'interactions (illustrées Figure 1-2).

Il peut :

- Être capturé par un atome (attachement)
 - soit par un atome déficitaire en électron (cation)

$$A^+ + e^- \rightarrow A \quad (1.2.)$$

On parle de *Recombinaison*.
L'électron retrouve un niveau d'énergie excité, voire normal.
 - soit par un atome neutre à défaut d'avoir suffisamment d'énergie pour compenser l'attraction du noyau.

$$A + e^- \rightarrow A^- \quad (1.3.)$$

L'atome se charge négativement (anion) avec la possibilité ensuite de perdre son électron excédentaire par *Détachement*.
- Être échangé avec un électron

$$A + e^- \rightarrow A^+ + e^- \quad (1.4.)$$

Si son énergie est satisfaisante pour effectuer le travail de sortie d'un électron, mais insuffisante pour s'extraire de l'attraction du noyau.
- Arracher un nouvel électron et rester libre

$$A + e^- \rightarrow A^+ + 2 \cdot e^- \quad (1.5.)$$

Le comportement de ces échanges électroniques varie suivant la densité électronique (lié à l'intensité du courant) et la vitesse de ces particules chargées (lié au champ électrique). C'est pourquoi un plasma est représenté par une caractéristique non linéaire courant-tension.

1.1.2.2 Caractéristique courant tension d'une décharge

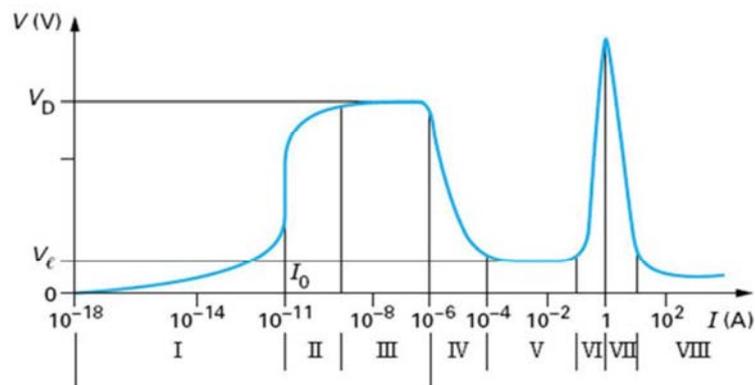


Figure 1-3 : Caractéristique UI d'un plasma et arc

Les travaux effectués sur les décharges électriques décrivent le comportement d'un plasma conformément à une caractéristique courant-tension. La courbe représentée Figure 1-3 se divise en 2 groupes : les décharges non autonomes qui s'amortissent sans créer d'avalanche électronique et les décharges autonomes qui comprennent assez d'interactions pour maintenir l'activité électronique d'une électrode à l'autre. [DeBe94, VaAu00].

On distingue 8 phases différentes dans la caractéristique d'arc de la figure 4. Ces 8 zones sont regroupées en 2 parties principales que sont les décharges non-autonomes et les autonomes.

1) Décharge non autonome

Les décharges non-autonomes se subdivisent en 3 parties :

- I. Décharge Partielle. Nécessite une stimulation extérieure.
Le transfert d'énergie est de très faible intensité ($\leq 10^{-(11)} A/cm^2$). L'apparition de décharge est attribuée au rayonnement cosmique et à la radioactivité naturelle.
- II. Multiplication/Saturation. Une stimulation externe (thermique, photonique, etc) permet aux électrons d'atteindre l'anode. Le transfert d'énergie croît jusqu'à saturation de l'électrode.
- III. Le Régime de Townsend marque le début d'une avalanche. Elle s'obtient par l'augmentation de la différence de potentiel (ddp) jusqu'à V_D qui laisse les électrons accélérer afin d'obtenir une énergie cinétique suffisante pour entretenir l'avalanche de façon autonome (Figure 1-4).

La circulation d'électrons dans un sens et d'ions positifs dans l'autre donne lieu à l'installation d'un courant électrique au sein du gaz. Le gaz devient alors un plasma conducteur.

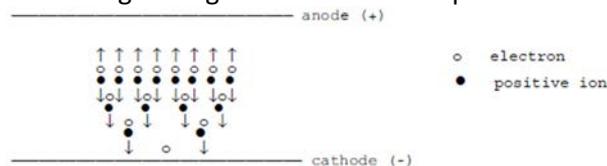


Figure 1-4 : Schématisation d'une décharge "avalanche" [Luca01]

2) Décharge autonome

Les décharges autonomes se composent de 5 phases dont le passage à l'arc.

- IV. Zone Subnormale. Transition et croissance de la surface active de la cathode contribuant à l'entretien de l'avalanche. La phase luminescente débute par la décharge couronne ($V_D = V_S$).
- V. Zone Normale. Durant la décharge dite "normale", l'intensité du courant traversant la cathode crée une augmentation de la surface active sur cette électrode. La colonne luminescente du plasma est visible.

En fin de décharge normale, la totalité de la surface cathodique émet des électrons.

- VI. Zone Anormale. Lorsque la cathode n'est plus capable de diffuser ses charges (saturation), l'augmentation de la tension permet l'accélération du flux électronique. Le claquage disruptif du gaz est décrit par la courbe de Paschen Figure 1-5 [Raiz01]. Il varie selon la nature des électrodes, du gaz, de la densité et de la distance à parcourir entre les électrodes.

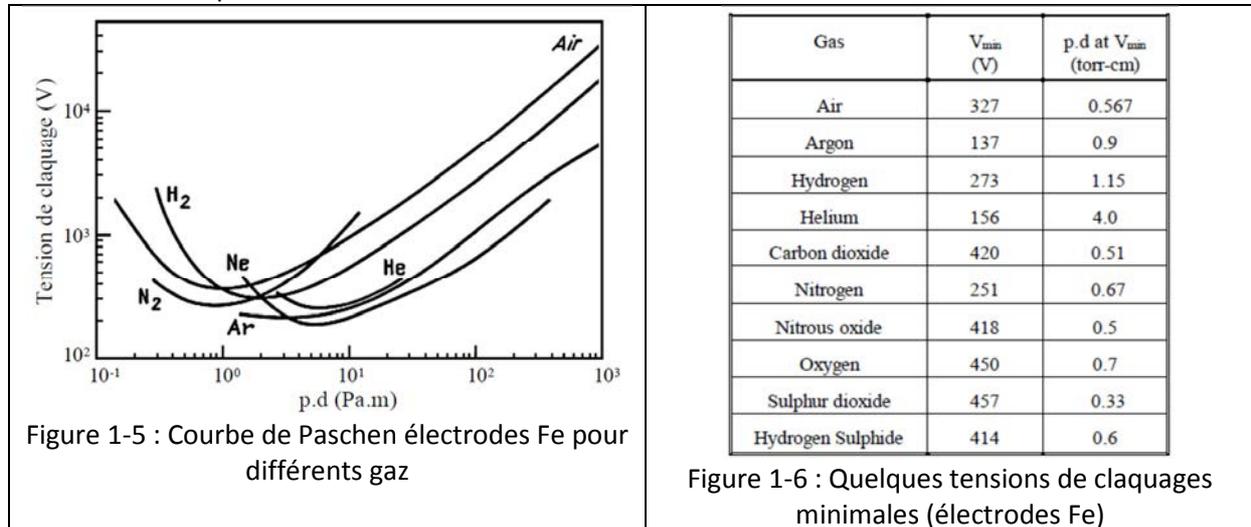


Figure 1-5 : Courbe de Paschen électrodes Fe pour différents gaz

Figure 1-6 : Quelques tensions de claquages minimales (électrodes Fe)

Dans l'air, la tension de claquage est minimale quand le produit p.d est à 0.567 torr-cm. Soit une distance de 76µm à pression ambiante et 0.76mm à 0,1 atmosphère. Le tableau Figure 1-6 rappelle que chaque gaz possède ses propriétés de claquage. Cependant ces propriétés dépendent également du travail de sortie à accomplir selon le matériau des électrodes.

- VII. Passage à l'arc
L'arc est une décharge auto-entretenu. Il résulte d'une accumulation d'énergie dans les électrodes lors des interactions thermo-ioniques. La concentration d'un puissant flux énergétique sur une surface réduite produit un échauffement atomique intense.
- VIII. Décharge d'arc
Le recouvrement de l'espace inter-électrode par une forte densité de particules chargées (+/-) provoque le déplacement d'un flux de matière accélérée par le champ électrique. L'interaction de ces particules avec les électrodes induit d'importants échauffements à leurs surfaces et génère un phénomène d'émission secondaire (thermique).

Bien que globalement neutre, une décharge plasma n'est pas homogène dans son ensemble.

1.1.2.3 Structure spatiale d'une décharge électrique

Dans le cas de décharge luminescente, les électrons qui parcourent la décharge proviennent principalement de la cathode bombardée par le flux d'ions positifs. Dans un espace macroscopique, la décharge est considérée comme neutre. Cependant la répartition des charges n'est pas homogène au voisinage des électrodes.

Les travaux menés au cours du XX^{ème} siècle ont apporté des connaissances sur la répartition spatiale des charges dans une décharge électrique. Ces études démontrent l'existence de zones sombres et lumineuses dont certaines ont un potentiel équivalent et que la densité d'ions/électrons peut varier dans l'espace tel que présenté par la Figure 1-7. [Hoya68, Mora27, Some59, VaAu00]

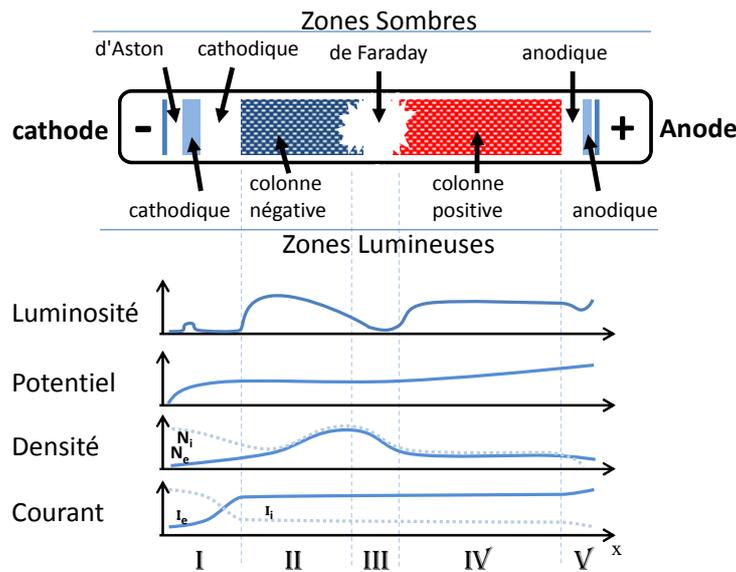


Figure 1-7 : Structure spatiale d'une décharge [BaPo68]
 Distance x du gap illustrative
 I Espace cathodique
 II Lueur négative
 III Zone sombre de Faraday
 IV Colonne positive
 V Zone anodique

La présence de luminescences témoigne de la recombinaison d'électrons dans certaines zones de la décharge. Pour autant, la présence d'un champ électrique maintient l'accélération des particules en suspension et mène à nouveau à l'ionisation.

Dans les décharges à basse pression, un phénomène de striations stationnaire peut également apparaître, illustrant le phénomène d'accélération/décélération des électrons dans l'espace d'une décharge. (ATIPO 1998 chapitre 1)

Cette répartition de la décharge s'observe dans le cas d'un régime établi. Il diffère selon le mode d'amorçage d'un arc en raison des propriétés thermiques locales aux électrodes (favorisant la thermo-émission).

1.1.2.4 Mode de création et d'amorçage d'un arc électrique

Amorçage par surtension

L'amorçage d'une décharge autonome a lieu lorsque la ddp inter-électrode est supérieure à V_D et qu'elle reste supérieure à V_S (tension d'amorçage statique Figure 1-3).

La durée de la décharge normale avant de passer à l'arc dépend du taux de croissance de l'occupation de charges d'espace et de l'aptitude de la source électrique à fournir une énergie suffisante pour passer en phase de thermo-ionisation.

Amorçage par contact et pont fondu

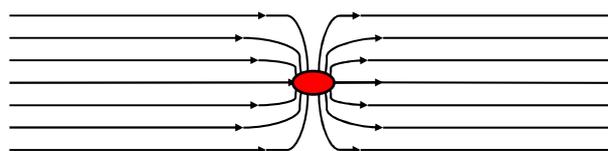


Figure 1-8 : Concentration du courant par une surface réduite

À la séparation de deux contacts en cours de conduction, une décharge peut s'amorcer par thermo-émission ou vaporisation. La concentration des lignes de conduction en un point de section minimale

(crête, aspérité, filament, etc. de l'ordre de $10^{-6}mm^2$) produit un échauffement pouvant aller jusqu'à la fusion du matériau. Il s'agit de pont fondu (Figure 1-9).

La forte température locale du pont fondu se propage aux points de liaisons de chaque contact créant ainsi une série d'émission thermo-ionique. La diminution de la section accentue l'instabilité du métal en fusion jusqu'à atteindre un seuil critique de vaporisation. Un arc peut alors s'initier à travers la phase gazeuse du métal et/ou claquage. Une partie du pont est vaporisé. L'explosion en vapeur métallique projette des particules. D'après les observations, cette phase vapeur à pression ambiante est de l'ordre de la microseconde.

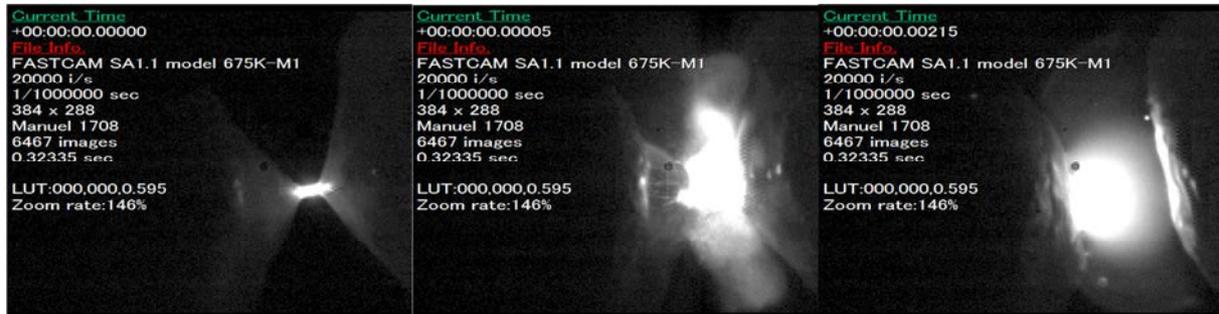


Figure 1-9 : Explosion de pont fondu étiré (électrodes fer 10A)

Les arcs par ouverture ne produisent pas nécessairement des ponts fondus en phase vapeur. Dans certaines conditions vitesse d'ouverture, intensité, l'inductance du circuit induisant une surtension à l'ouverture du contact. Cela provoque une avalanche électronique couvrant les charges d'espace jusqu'au passage à l'arc. De plus, l'augmentation locale de la température et la physionomie du dernier point de contact favorisent l'ancrage du pied d'arc sur celui-ci.

1.2 Influence des conditions environnementales d'expérimentations sur l'arc

Sur le plan macroscopique, le comportement d'un arc en régime dynamique de déplacement répond aux mêmes règles qu'une décharge statique. Mais les variations rapides de propriétés physiques entre les électrodes peuvent complexifier l'obtention de prédictions comportementales à plus petite échelle.

Parce qu'un arc est difficile à reproduire de façon identique, l'étude phénoménologique des arcs est laborieuse. À ce point, il est préférable de privilégier l'étude statistique d'une population suffisamment vaste afin d'en déduire une tendance de comportement d'après les paramètres physiques maîtrisables tels que la pression, la longueur de l'espace inter-électrodes (*gap*), l'intensité du courant, le type d'électrodes.

Les travaux présentés dans cette sous-partie proposent de qualifier le comportement d'un arc à partir des variations environnementales en observant les grandeurs d'impédance, de dynamique et de dispersion du signal.

1.2.1 Qualification expérimentale des interactions extérieures à la décharge

Généralement, le comportement d'un arc électrique est observé en laboratoire par la mesure de sa tension et du courant électrique qui le traverse conformément à la procédure décrite section 1.3.1. Sur cette base, un dispositif d'évaluation des caractéristiques comportementales d'une décharge d'arc est mis en place. Il se fonde sur l'observation de l'impédance d'arc, des variations d'amplitudes du courant et de son écart type.

Ces 3 estimations donnent un ordre de grandeur semblable à un découpage temporel tel qu'illustré Figure 1-10 :

- Observation "macroscopique" de la variation de résistance engendrée par l'ajout d'un arc série dans un système

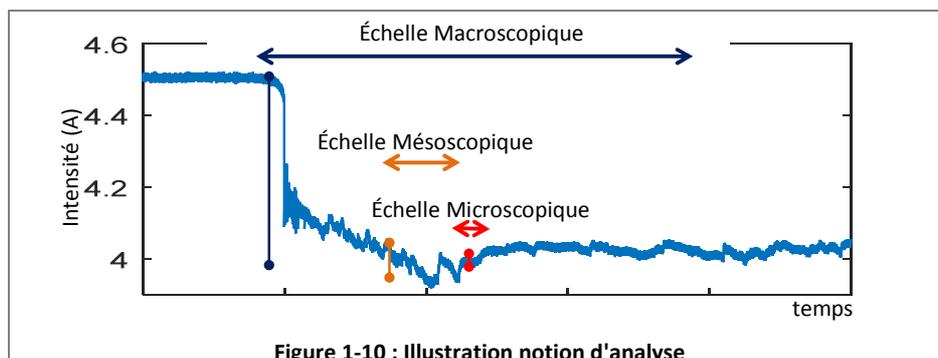
$$\overline{R_{plasma}} = \frac{\overline{V_{arc}}}{I_{arc}} \quad (1.6.)$$

- Évaluation "mésoscopique" de la dynamique de l'arc par le calcul de l'étendue (*Range* ou '*Rang*' en terme anglophone) défini par.

$$Etendue = Max(I_{arc}) - Min(I_{arc}) \quad (1.7.)$$

- Dimension "microscopique" des variations induites par l'arc sur le signal à travers la dispersion du bruit (variance).

$$Var = \frac{1}{N} \sum (I_{arc} - \overline{I_{arc}})^2 \quad (1.8.)$$



En s'inspirant de la méthode des plans d'expériences, 5 paramètres sont contrôlés pour étudier les changements de comportement de l'arc :

- intensité du courant,
- nature des électrodes,
- géométrie des électrodes,
- espacement des électrodes,
- pression du gaz,

Toutes les données sont acquises par écartement d'électrodes d'après les changements de paramètres expérimentaux.

Il est à noter que ces estimations excluent la phase d'écartement des électrodes.
 Pour représenter un résultat statistique cohérent, pour chaque signal de 600ms d'arc établi, l'analyse est subdivisée en segment de 100ms moyennés.
 Les statistiques sont dressées par la répétition au minimum de 3 signaux d'arcs de 600ms chacun.

1.2.2 Effets sur l'impédance de l'arc

La résistance des décharges d'arcs électriques se retrouve largement commenté dans la littérature à travers la modélisation généralistes de la tension d'arc :

- Équation d'Ayrton [Ayr02]

Précurseur dans la modélisation d'arcs, Ayrton fournit une équation pour des arcs sur des électrodes carbone séparées de quelques millimètres de la forme :

$$V_{arc} = A + BL + \frac{C + DL}{I_{arc}} \quad (1.9.)$$

A représente la chute de tension due aux électrodes,
 B le gradient de tension en V/m,
 L l'écartement en m,
 C & D des constantes de l'arc

- Équation de Steinmetz [Ste06]

Steinmetz présente une version simplifiée de l'équation d'Ayrton négligeant l'effet de B comme élément additionnel incident de la longueur. Cette version est destinée aux arcs sur électrodes carbone et magnétites.

$$V_{arc} = A + \frac{C(L + D)}{I_{arc}^{0.5}} \quad (1.10.)$$

A,C,D sont des constantes
 L est l'écartement initialment décrit en in.
 I le courant de ligne en A

- Équation de Nottingham [Nott23]

Nottingham donne une équation caractéristique V-I inverse simplifiée de ces prédécesseurs en se basant sur la similitude des résultats de 1 à 10mm soit l'équation :

$$V_{arc} = A + \frac{B}{I_{arc}^n} \quad (1.11.)$$

Avec A & B dépendant de la longueur de "gap" d et du matériau d'électrodes (tabulation)
 n varie en fonction des électrodes
 Pour d de 1mm à 10mm : les électrodes de cuivre ont pour constante A=27.5, B=44.

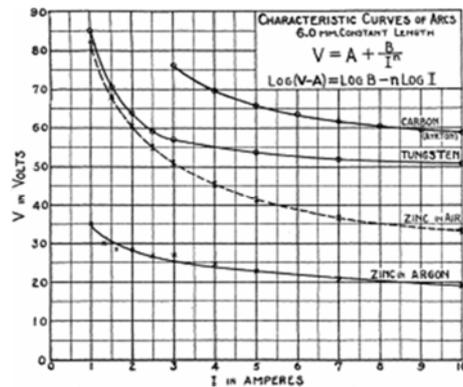


Figure 1-11 : Caractéristique V-I d'arc selon les équations de Nottingham

- Équation de Van et Warrington [VaWa31]
Sur l'étude de courants alternatifs haute tension de 100A à 1kA pour un écartement d'électrodes de plusieurs pieds. Ils donnent une caractéristique V-I d'un arc stable tel que :

$$V_{arc} = \frac{8750 \cdot L}{I_{arc}^{0.4}} \quad \text{L la longueur du gap (en pied).}$$

(1.12.)

Van et Warrington confirment les premières recherches effectuées par Ayrton et Steinmetz, en montrant que les tensions d'arc sont proportionnelles à la longueur de l'arc. La tension d'arc est aussi inversement proportionnelle avec l'augmentation du courant d'arc. En revanche, leurs paramètres d'études sont fixés et spécifiques au cas.

- Miller et Hildenbrand [MiHi73]
Leurs travaux soulignent que les variables A, B et n de l'équation de Nottingham ne sont pas des constantes absolues, mais qu'elles dépendent des conditions d'arc, notamment : le matériau des électrodes, la longueur de l'arc, le type de gaz isolant et la pression. Par conséquent il est difficile de reproduire et vérifier les constantes proposées dans les publications antérieures telles que celles de Cobine [Cobi41].

À ce sujet, Ammerman et al (Ammerman2010) mettent en avant les travaux de Ignatko [Igna77] qui fournit dans ses travaux une mesure de la chute de tension d'arc pour des électrodes de cuivre (23,5V), des électrodes d'acier (26,5V) et des électrodes de tungstène (36V). Ces résultats concordent avec d'anciens travaux de Browne [Brow55] sur les sauts de tensions comprises entre 20V et 40V.

Hetzmanseder (Hetzmanseder 1984), quant à lui, se base sur la publication Keil, [Keil60] propose la classification avec des décharges à basse tension pour l'automobile (48V). Les données synthétisées dans Tableau 1 donnent les niveaux d'intensités et tensions minimum obtenues pour la création d'arcs selon le matériau des électrodes.

Tableau 1 : Tension/Courant minimum d'arc libre dans l'air [Keil60]

Contact material	$U_{arc \min}$ [V]	$I_{arc \min}$ [A]
Cu	13	0.43
Fe	13-15	0.35...0.55
C	20	0.01...0.03
Ag	12	0.4
Au	15	0.3
Ni	14	0.4...0.5

- Hall, Myers, et Vilicheck (Hall 1978)
Dans le cadre d'une étude sur la génération d'arc sur les convoyeurs de tramway, la cohérence de l'équation de Nottingham est confirmée sous la forme $V_{arc} = A + \frac{B}{I_{arc}^n}$ pour une tension continue 300Vdc allant de 300A à 2.4kA avec un écartement de 5 à 15mm. Le matériau des électrodes n'y est pas spécifié.

- Modèle de Stokes et Oppenlander [StOp91]
Stokes et Oppenlander ont estimé la caractéristique V-I de la partie de décharge d'arc et ont déterminé la frontière avec l'avalanche électronique précédant l'arc (voir partie VII et VIII de la description des phases d'une décharge électrique)

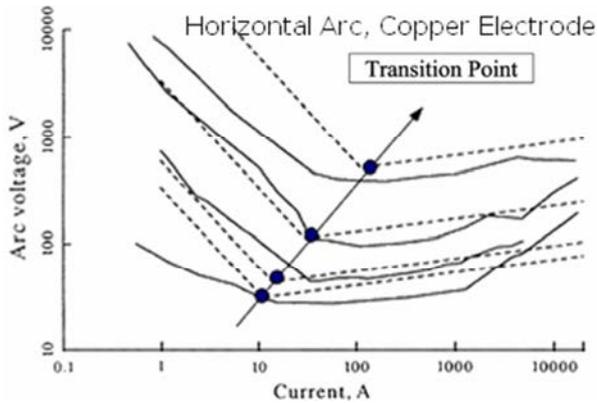


Figure 1-12 : Caractéristique V-I d'arc sur électrodes Cu/Cu à l'horizontale

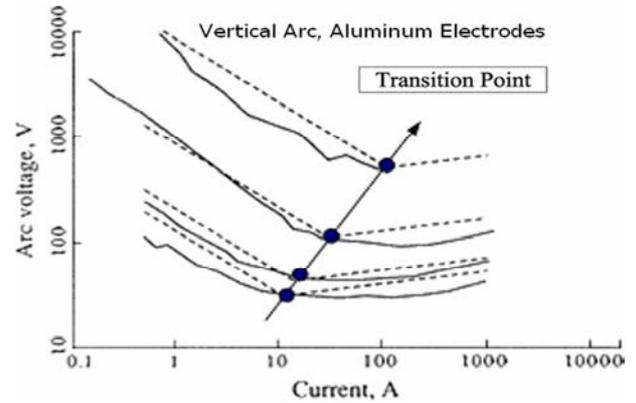


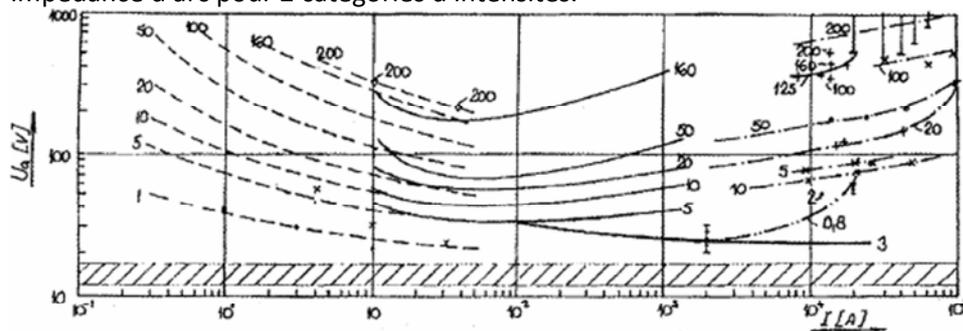
Figure 1-13 : Caractéristique V-I d'arc sur électrodes Al/Al à la verticale

Leurs travaux présentés Figure 1-12 et Figure 1-13 permettent de définir :

- le point de transition comme répondant à l'équation :
$$I_t = 10 + 0.2 * d \quad (1.13.)$$
où d=écartement des électrodes en mm

- L'équation :
$$V_{arc} = (20 + 0.534 * d) * I_{arc}^{0.12} \quad (1.14.)$$

- Compilation de données et équation de Paukert [Pauk93]
Une partie des travaux précédemment cités, antérieurs à la publication de Paukerts font l'objet d'une compilation et d'analyses comparatives par celui-ci. L'auteur a différencié les arcs DC/AC et dont la colonne d'arc est orientée verticalement ou horizontalement. Les données sont reportées de façon manuscrite sur Figure 1-14. Cette compilation offre une synthèse d'équation estimative des tensions d'arcs et impédance d'arc pour 2 catégories d'intensités.



Marking	Author	Electrodes	Current	Arc
---	Rieder (2)	Cu ϕ 6	DC	vertical
—∇—	Amft (3)	Mo	DC	vertical
- - - - -	Rybář (4)	Cu horns 10x30...500	50 Hz	horizontal
- . - . -	Paukert (5)	Cu horns 10x30...500	50 Hz	horizontal
- - - +	Harča (6)	Cu 30x5	50 Hz	not stated
—→—	Burkhard (7)	Fe, Cu plated, 2 mm	50 Hz	horizontal
-	Grenzel (8)	ϕ 8, Ag, Cu, CuCr	impulse	vertical

Figure 1-14 : Synthèse de résultat par Paukert (Paukert 1993)

Paukert établit une concordance entre les mesures de [StOp91] avec ses propres résultats et l'approximation d'autres travaux. Il en propose une équation du type

$$V_{arc} = A * I_{arc}^B \quad \text{pour une intensité } < 100A \quad (1.15.)$$

Il dresse une tabulation de valeur pour ses coefficients A & B selon Tableau 2 :

Tableau 2 : Tabulation de coefficient par Paukert [Pauk93]

Intensité <100A					Intensité >100A				
Electrode gap (mm)	Arc voltage (V) $A * I_{arc}^B$		Arc resistance (Ω) $A * I_{arc}^B$		Electrode gap (mm)	Arc voltage (V) $A * I_{arc}^B$		Arc resistance (Ω) $A * I_{arc}^B$	
	A	B	A	B		A	B	A	B
1	36.32	-0.124	36.32	-1.124	1	13.04	0.098	13.04	-0.902
5	71.39	-0.186	71.39	-1.186	5	14.13	0.211	14.13	-0.789
10	105.25	-0.239	105.25	-1.239	10	16.68	0.163	16.68	-0.837
20	153.63	-0.278	153.63	-1.278	20	20.11	0.190	20.11	-0.810
50	262.02	-0.310	262.02	-1.310	50	28.35	0.194	28.35	-0.806
100	481.20	-0.350	481.20	-1.350	100	34.18	0.241	34.18	-0.759
200	662.34	-0.283	662.34	-1.283	200	52.63	0.264	52.63	-0.736

Avec une intensité inférieure à 100A une tendance équivalente de A & B (résistance) de $A = 31.204 \cdot gap^{0.565}$ & $B = -1.1225 \cdot gap^{0.0404}$

Les modèles de circuits équivalents qui sont précédemment présentés se limitent à l'approximation d'observations empiriques lissées et négligent les comportements microscopiques voire mésoscopiques de l'arc électrique bien que ceux-ci soient erratiques.

Comparatif modèle Paukert vs Observations

Air ambient, 270V, charge R

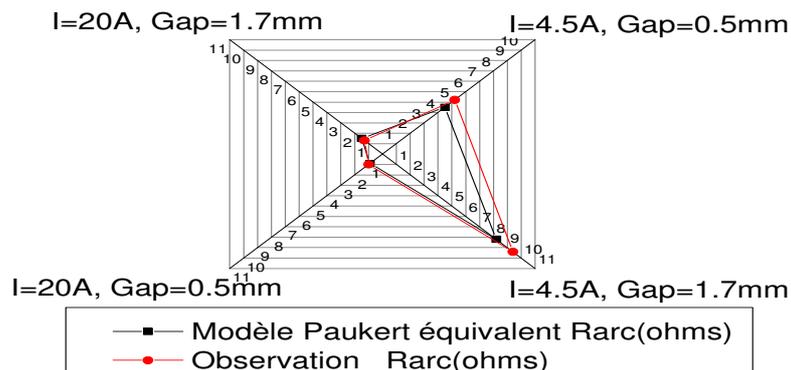


Figure 1-15 : Comparatifs modélisation Paukert et Observations

Les observations sur l'impédance de l'arc en fonction de l'intensité (270V_{DC} de 4,5A & 20A) pour différents écartements (0,5mm & 1,7mm) traduisent des résultats proches (Figure 1-15) des observations modélisées par Paukert. Cependant, l'intensité et l'écartement ne sont pas les seuls facteurs d'influences sur la résistance du plasma d'arc. Les Figure 1-16 & Figure 1-17 mettent en évidence les effets de la pression et de la forme des électrodes à différentes intensités et écartements.

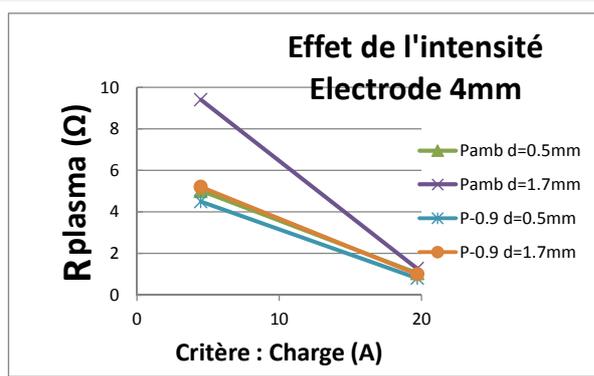


Figure 1-16 : Résistance du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

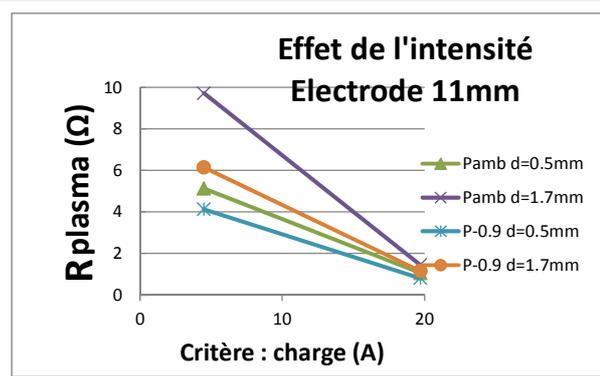


Figure 1-17 : Résistance du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

Figure 1-16 :

À pression ambiante (courbes **vert** & **violet**), la résistance du plasma d'arc est fortement influencée par l'intensité du courant (pente de toutes les courbes), notamment lorsque l'écartement est croissant (courbe **violette**). Malgré cela, sa résistance est convergente à forte intensité ($\geq 20A$) quel que soit l'écartement (0.5mm ou 1.7mm).

Une dépression atmosphérique ($P_{amb} = 0.9bar$) atténue l'étendue de valeurs lors de faibles intensités (courbes **orange** et **bleu** proches comparativement aux courbes **vert** et **violet** à 4.5A), mais son effet est négligeable à forte intensité ($\geq 20A$).

Figure 1-17 :

À faible pression, l'espace de confinement du plasma (entre les électrodes cylindriques) semble influencer la résistance.

À la pression $P_{atm} = 0.9b$, la résistance est comprise entre 4Ω et 6Ω avec un écartement de 0.5mm à 1,7mm pour une électrode Ø11mm alors qu'elle avoisine $\cong 5\Omega$ (quel que soit le gap : courbes **orange** et **bleu**) avec une électrode Ø4mm.

L'influence de chaque grandeur sur le comportement de l'impédance de plasma d'arc est détaillée en ANNEXE (Figure 8-1 à Figure 8-8)

Cette première analyse comportementale de l'impédance d'arc selon 4 grandeurs physiques (intensité, pression, géométrie des électrodes, écartement) fait remarquer que :

- L'intensité et l'écartement des électrodes représentent les 2 influences majeures de la résistance de l'arc.
- À forte intensité sa résistance devient moins dépendante des autres facteurs et en particulier de l'écartement des électrodes.
- La pression influence la résistance d'arc surtout à faibles intensités (de l'ordre de quelques ampères).
- La résistance du plasma augmente avec la pression
- Le volume de gaz contenu dans le gap influence la résistance de l'arc à faible intensité (diamètre, pression, écartement).

L'interprétation du tracé macroscopique des variations de résistance d'arc propres aux conditions environnementales révèle la complexité d'une modélisation dépendant de l'écartement et de l'intensité seule. De fait, l'expression de l'impédance d'arc est également régie par les paramètres de pression et surtout par la définition du volume d'une décharge par la géométrie des électrodes (diamètre).

L'effet de l'espace inter-électrodes sur la dynamique de la décharge se retrouve surtout dans l'analyse estimant de l'étendue sur un plan temporel mésoscopique suivant.

1.2.3 Effets sur la dynamique du signal électrique d'arc

En acoustique, la dynamique sonore se rapporte à l'amplitude du signal, déduisant le bruit de fond (d'acquisition). Dans notre cas, la dynamique prend en compte les extremums du signal afin d'exprimer l'évolution temporelle des variations dans le signal.

À l'aide d'une caméra rapide (Voir section 1.3.1 Dispositif de capture vidéo et mesures), les observations réalisées en laboratoire montrent que la dynamique des signaux mesurés est liée à la dynamique de l'arc sur les électrodes.

C'est dans cet intérêt que le calcul de l'étendue (étendue d'amplitude différentielle $_{MAX-MIN}$ ou "range" en anglais) exprime les variations d'amplitudes sur le plan temporel mésoscopique de la décharge (quelques dizaines de millisecondes).

L'analyse macroscopique de la variation d'impédance fait ressortir que le volume inter-électrode influence la variabilité de l'arc. Ce constat peut être confirmé à travers les différentes géométries d'électrodes, $\varnothing 4\text{mm}$ Figure 1-18 et $\varnothing 11\text{mm}$ Figure 1-19 décrites ci-après selon leurs grandeurs d'influences :

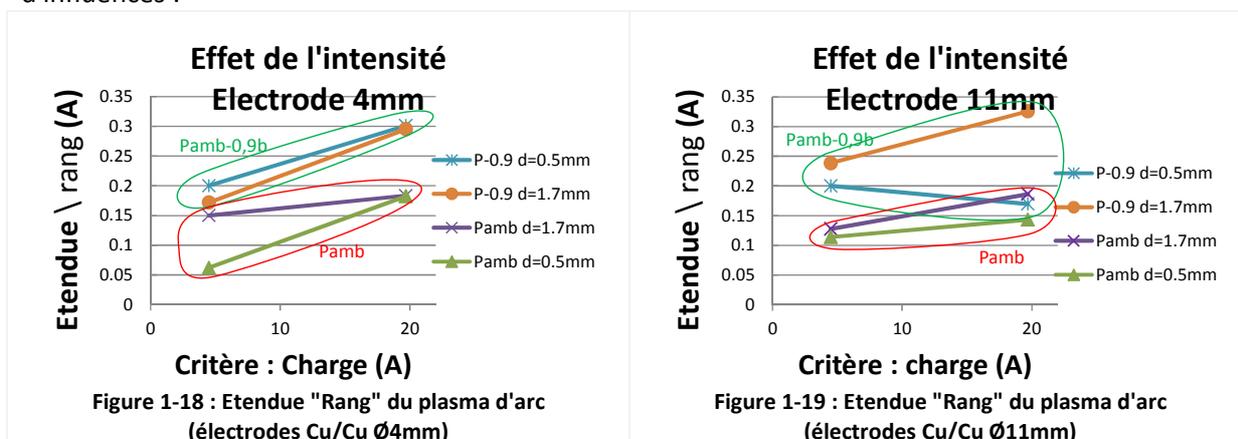


Figure 1-18 : Électrodes $\varnothing 4\text{mm}$

La différence de pression entre les échantillons se manifeste par l'augmentation globale des turbulences du plasma transcrit au signal électrique et visibles via l'étendue (différentiel max-min). Ainsi, à pression ambiante (courbes verte/violette) les variations sont comprises entre 60mA et 200mA en moyenne de 4,5 à 20A. Alors qu'en dépression (courbes orange/bleue), les perturbations varient d'environ 200mA à 300mA.

À forte intensité ($\geq 20\text{A}$), les perturbations sont similaires pour une pression équivalente (180mA à Pamb / 300mA à P-0.9b) pour tous les écartements. À contrario, la divergence des turbulences à faible intensité est influencée par la pression. Ainsi, à 4,5A et pression ambiante, la variabilité du signal oscille de $\Delta_{Pamb}=90\text{mA}$. Tandis qu'en dépression, la variabilité est de $\Delta_{Pamb-0.9b}=30\text{mA}$ pour un espacement de 0.5mm et 1.7mm.

Figure 1-19 : Électrodes $\varnothing 11\text{mm}$

Vis-à-vis des précédents résultats, dans le cas d'une électrode à grand diamètre, la combinaison liée à la pression se retrouve inversée : une dépression influence toujours une augmentation des amplitudes de variation. En revanche, dans ce cas, l'arc est de stabilité similaire, quel que soit l'écartement pour un faible courant. Alors qu'à forte intensité ($\geq 20\text{A}$) les turbulences sont accentuées par l'éloignement des électrodes. Ainsi, à 4,5A, $\Delta_{Pamb}=20\text{mA}$ et $\Delta_{Pamb-0.9b}=40\text{mA}$. Tandis qu'à 20A, $\Delta_{Pamb}=50\text{mA}$ et $\Delta_{Pamb-0.9b}=140\text{mA}$.

Le détail de chaque grandeur influence sur le comportement de la stabilité du plasma d'arc est visible en ANNEXE (Figure 8-9 à Figure 8-16)

Les grandeurs testées ont toutes un impact sur la stabilité de l'arc électrique :

- La pression et le courant influencent la dynamique et l'amplitude des variations.
- Le diamètre des électrodes et leur écartement contribuent à définir le mouvement de la décharge et donc des turbulences du plasma transmises au signal électrique au cours du temps.

Le changement de comportement (convergence/divergence) lié au diamètre trouve son explication par l'observation des arcs en imagerie rapide. En effet, la mobilité de l'arc est proportionnelle à la surface libre de l'électrode. Ces effets de surface et d'intensité sont synthétisés par le tableau ci-dessous :

	Faible intensité	Forte intensité
Petit diamètre	Oscillation du pied d'arc sur la surface de l'électrode provoquant des perturbations.	La décharge recouvre (chauffe) l'ensemble de l'électrode et produit un écoulement constant (quel que soit l'écartement).
Grand diamètre	L'arc ne peut occuper l'espace total de l'électrode. Il s'installe sur une zone "chaude" ou de fortes conductances (cratère). Cet établissement sur une zone limitée permet de réduire le déplacement de la décharge avec le concours d'un champ électrique relativement homogène.	La décharge couvre partiellement l'électrode. La forte intensité du courant permet de chauffer le point d'ancrage de la décharge. Cela contribue au déplacement de l'arc sur la surface et provoque des turbulences.

L'étude de la dynamique de l'arc en fonction de conditions physiques extérieures au plasma indique une grande diversité de réactions à ces grandeurs. Le diamètre des électrodes (cuivres) représente l'impact majeur sur la variabilité du signal aux autres stimuli.

Au-delà des effets connus sur l'homogénéité de champs par effet de pointe, l'utilisation d'électrodes de diamètre important (de 4 à 11mm) met en évidence l'implication de la surface sur le comportement de l'arc.

Dans ces conditions, sans maîtriser l'environnement, il est difficile d'établir une loi pour définir le comportement d'un arc électrique.

L'observation mésoscopique reflète surtout le comportement de l'arc et plus particulièrement du déplacement de l'arc sur l'électrode induisant ainsi des sauts d'amplitudes par le changement du parcours des électrons. Cependant, il diffère du comportement de l'arc sur l'échelle microscopique.

1.2.4 Effet sur la distribution des bruits électriques de l'arc

Le matériel en laboratoire n'est pas adapté pour mesurer électriquement les variations propres à chaque collision d'électrons entre eux. En revanche, il est possible d'observer le déplacement d'un pied d'arc à travers la modification de la longueur du gap. En effet, le changement de parcours du flux d'électrons/ions implique une modification de la tension d'arc et de ce fait de sa résistance.

L'observation de ces perturbations à travers l'étude du bruit d'arc sur le plan temporel microscopique permet de quantifier la dispersion du signal électrique introduit par la mobilité du pied d'arc.

Cette dispersion est obtenue par le calcul de la variance :

$$Var = \frac{1}{N} \sum (I_{arc} - \overline{I_{arc}})^2. \quad (1.16.)$$

Cette notion de variance se limite à l'hypothèse d'une répartition des valeurs monomodales. C'est-à-dire que la dispersion opère autour d'une valeur moyenne telle un bruit Gaussien.

L'activité du pied d'arc est transcrite à travers la variance selon les grandeurs déterminées : écartement, diamètre des électrodes, intensité et pression selon les résultats suivants :

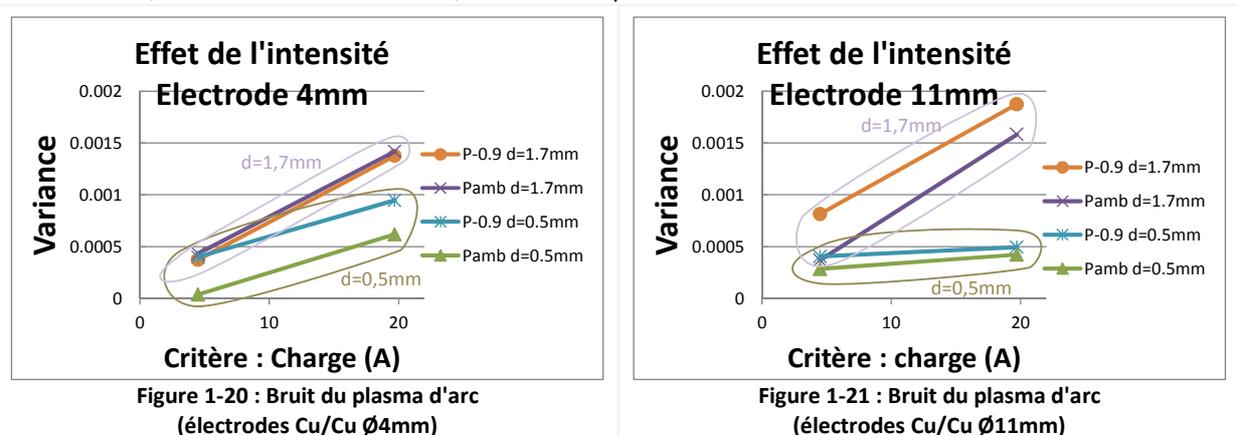


Figure 1-20 : Électrodes Ø4mm

Le parallélisme comportemental du bruit selon l'écartement indique que la dispersion du bruit est liée à l'écartement. Ainsi les courbes violette/orange et verte/bleu sont liées.

Dans le cas d'électrode de faible diamètre (Ø4mm), la pression influence la distribution du bruit lors de faibles écartements (0.5mm) de la sorte qu'en dépression cette distribution est plus élevée qu'en condition atmosphérique ambiante normale.

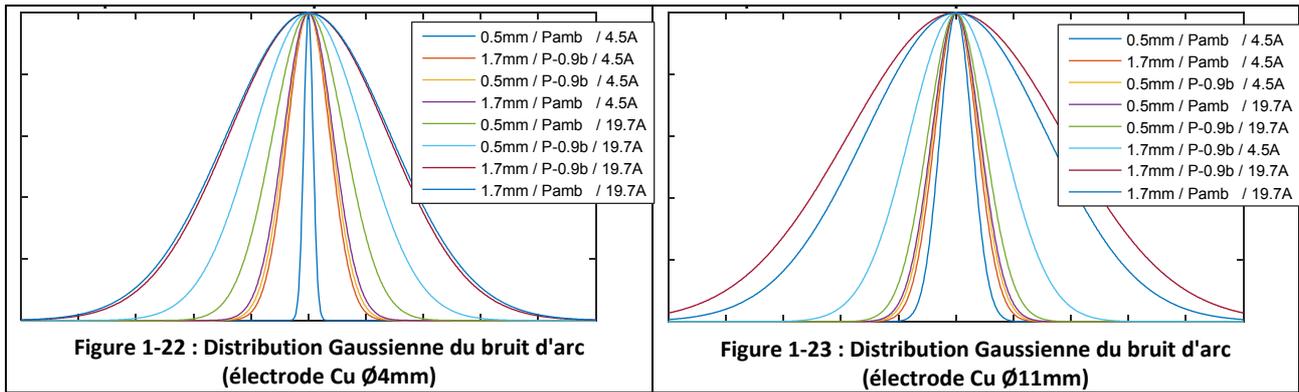
La distribution du bruit est fortement dépendante de l'intensité du courant traversant la décharge. Pour une intensité variant entre 4,5A et 20A, la différence de variance est de $\Delta var = 5 \cdot 10^{-4}$ à 0.5mm et $\Delta var = 10 \cdot 10^{-4}$ à 1.7mm pour toutes pressions.

Figure 1-21 : Électrodes Ø11mm

Dans le contexte d'électrode de grand diamètre, les 2 couples de traces (violette/orange et verte/bleu) présentent encore le même comportement. La distribution est plus instable (large\diffuse) en condition de dépression. Le degré de dispersion lié à l'intensité est désormais de $\Delta var > 10 \cdot 10^{-4}$ à 1.7mm alors qu'il est $\Delta var < 2 \cdot 10^{-4}$ à 0.5mm d'écartement.

En revanche, à faible écartement (courbe verte/bleu), le mouvement semble inférieur à la distribution présente avec les électrodes Ø 4mm.

La correspondance de chaque mesure de distribution est représentée par un gabarit de loi normale ci-dessous.



Sauf pour la condition spécifique : Ø11mm, $P_{amb-0.9b}$, 4.5A, 1.7mm, l'intensité du courant traversant la décharge est majoritairement à l'origine de la distribution du bruit sur le signal électrique.

Les études antérieures et nos observations par caméra rapide révèlent que les variations rapides du signal sont liées au déplacement du pied d'arc (rotation). De ce fait, pour une distance inter-électrode d , l'arc a une variation maximum de $\sqrt{d^2 + \phi_{\text{électrode}}^2}$.

1.2.5 Conclusion sur l'étude du comportement d'arc selon l'environnement

Cette sous-partie a eu pour objectif de prendre en compte les paramètres environnementaux d'une décharge d'arc afin de déterminer les critères spécifiques aux arcs en vue d'en faire la détection de défauts.

Les constats faits à travers les 3 indicateurs (résistance, dynamique par l'étendue "rang", dispersion par variance) montrent que le plasma d'arc est fortement influencé par tous les paramètres testés:

- La résistance globale de la décharge diminue avec l'augmentation de l'intensité du courant et elle augmente avec la distance d'écartement.
- La surface active des électrodes permet à l'arc de se déplacer par grands sauts faisant fortement varier les signaux.
- La pression modifie la dynamique de l'arc si celui-ci peut être mobile sur les électrodes. Car l'intensité du courant chauffe la surface active et conditionne le mouvement de l'arc sur les électrodes.

L'étude est limitée à l'évolution de 5 grandeurs physiques. Pour être complète elle doit être étendue à d'autres paramètres tels que la nature du gaz, l'hygrométrie, la forme des électrodes, la vitesse d'ouverture, la conduction thermique des électrodes, etc. L'influence des électrodes et notamment du matériau qui la compose est très important, tant sur le travail de sortie nécessaire pour les électrons que sur la mobilité du pied d'arc en leur surface. Le matériau va également conditionner certains phénomènes tels que l'oxydation ou la fonte de la matière qui la compose.

Dans le but d'approfondir l'observation du phénomène, la sous-partie suivante présente l'étude par imagerie rapide donnant la concordance entre les phénomènes physiques aux électrodes et les signaux mesurés par un dispositif de protection.

1.3 Comparaison des phénomènes physiques aux électrodes

L'emploi d'un équipement de caméra rapide allant jusqu'à 1Mfps est précieux pour comparer le comportement d'un arc avec sa signature électrique (courant/tension mesurés).

Cette cadence d'observation permet d'aller 40'000 fois plus vite que la perception humaine. À cette vitesse, les flashes lumineux vus à l'œil nu dessinent un faisceau de conduction électronique. Il est alors possible de suivre le déplacement du pied d'arc, les projections de particules et la composition de zones lumineuses.

La première partie décrit l'interface de numérisation, la deuxième partie traite les observations de différents phénomènes aux électrodes.

L'objectif de ces expérimentations est d'analyser et comparer les images obtenues avec les signaux électriques courant/tension pour en faire une interprétation des phénomènes se passant aux électrodes à l'aide des mesures électriques seules. Ces données servent ensuite à la logique de détection mise au point.

1.3.1 Dispositif de capture vidéo et mesures

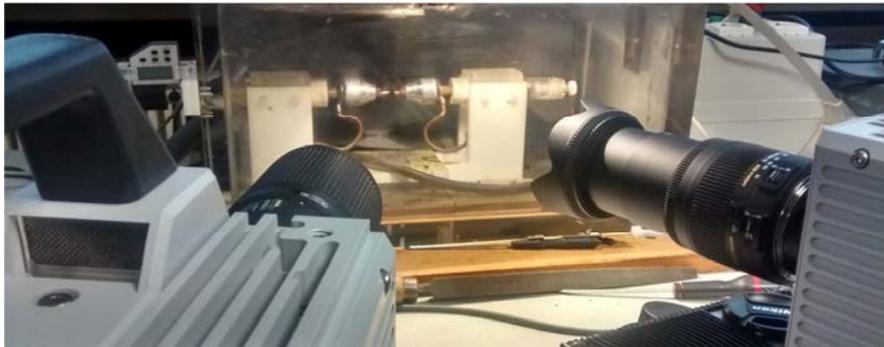


Figure 1-24 : Photo disposition caméra rapide PHOTRON FastCAM

Acquisition vidéo

Le schéma Figure 1-25 représente le dispositif expérimental pour l'acquisition des images par caméra rapide (PHOTRON FASTCAM SA5 model 775K-M3, optique Canon 200mm,f/2.8). Les arcs sont créés dans une enceinte en plexiglas de dimension 40x20x25cm et 15mm d'épaisseur.

Dans la configuration d'une charge (R/RL) victime d'un défaut d'arc électrique série, l'ensemble s'alimente par une source continue régulée en tension pour délivrer 270V constant. La charge est configurable selon une valeur de résistance fixe. Le défaut électrique est initié par l'écartement d'électrodes. Leurs natures diffèrent suivant les études. De façon générale, la décharge est filmée par la caméra perpendiculaire. Pour certaines observations, celle-ci se place avec un angle permettant d'observer la surface d'une des électrodes (Figure 1-24).

Les électrodes sont maintenues par un dispositif de mandrin en acier acceptant des électrodes de 1 à 8mm. La distance d'écartement est contrôlée manuellement par une vis équipée d'un micromètre numérique. L'atmosphère à l'intérieur de l'enceinte climatique est mise en dépression par une pompe à palette de 1atm à 1atm-0.9bar. La consigne de pression est confiée à une fuite d'air située en aval de l'enceinte pour limiter les perturbations du plasma en cours.

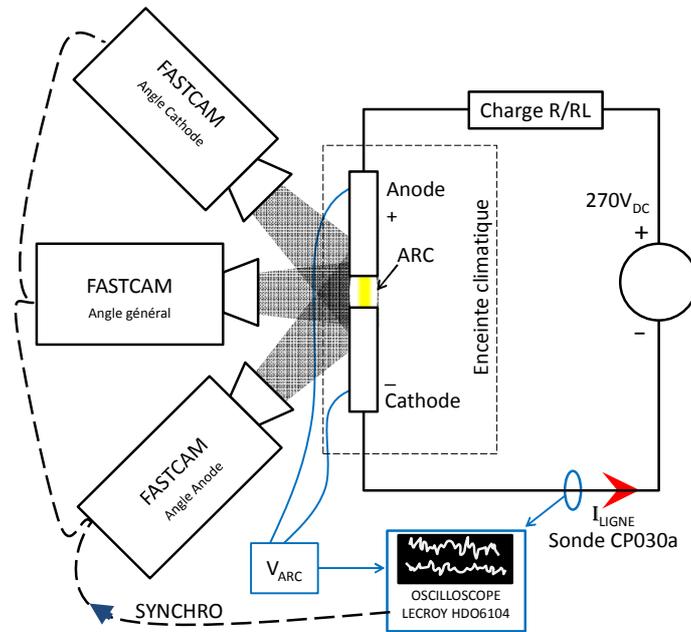


Figure 1-25 : Dispositif caméra rapide

Le système de trigger de l'oscilloscope pilote le déclenchement de la caméra selon un seuil de tension aux bornes du contact (électrodes) pendant le passage à l'arc (supérieur à 10V).

Mesures électriques

Les mesures électriques sont accomplies sur :

- Le courant de ligne par une sonde CP030a Lecroy (Accuracy: $\pm 1\%$, bande passante max : 70MHz à 1mA/div, 100kHz à 1A/div)
- La tension d'arc par une sonde différentielle TESTEC TTSI9010 1:100 de bande passante 70MHZ (Accuracy: $\pm 2\%$, Voltage Rating VAC:7000V)
- La tension d'alimentation (régulée) est reprise à titre informatif, mais n'est pas affectée par le phénomène.

L'ensemble de ces informations électriques sont recueillies par l'oscilloscope HDO6104 à une cadence de $1\text{MS}\cdot\text{s}^{-1}$ (sauf exception précisées).

Traitement des données

Avec Matlab, les images acquises en caméra sont synchronisées avec les signaux de l'oscilloscope. Les images sont coordonnées dans le temps par les événements optiques et électriques : départ d'arc, extinction, perturbation. Le reste du film est synchronisé sur les horloges de chaque moyen d'acquisition.

1.3.2 Observations par imagerie rapide

L'intensité et la rapidité d'une décharge d'arc rendent impossible l'observation à l'œil nu. Seules des perceptions de basse fréquence sont visibles. Tels que le phénomène de "arc-flash" connu principalement par l'apparition/disparition de l'arc en courant alternatif.

Les observations présentées par la suite traitent uniquement de phénomène DC selon 3 catégories :

- Arc de contact, faisant le constat de l'apparition d'arc par l'ouverture de contacts fondus sous l'effet de l'intensité du courant les traversant.
- Phénomène aux électrodes, par l'étude de phénomènes oscillant sur l'anode.
- Vaporisation de matière projetée en cours de vol dans le flux du plasma.

Cette section propose surtout la mise en relation entre les images et les signaux électriques tension/courant pendant ces évènements.

1.3.2.1 Ponts fondus et microcontacts de métal en fusion

Le passage de fortes intensités à travers un conducteur peut engendrer un échauffement sur les contacts. Conformément aux propriétés de chaque conducteur, le matériau réalisant un pont fondu peut être mou ou fluide selon la température de contact.

3 cas de jonctions conductrices inter-électrodes sont traités ici :

- Ouverture de contact par rupture de pont fondu
- Fermeture de contact par fusion d'un pont fondu
- Fermeture de contact brève par fusion de métal liquide

Arc après *rupture* de pont fondu

La force de pression entre 2 conducteurs est couramment considérée comme étant l'élément qui déforme les matériaux pour effectuer un contact homogène (contact de Hertz). Cependant dans les contacts réels, les aspérités déforment la géométrie de contact créant une constriction des lignes de courant [Holm67]. Ces points de passage du courant entraînent un échauffement de la surface conductrice et favorisent le ramollissement voir la fonte des électrodes [Slad17] (ramollissement/fusion/ébullition : Cu=190/1083/2595°C, Sn=100/232/2270°C, Al=150/660/2450°C, Fe=-/1538/2860°C).

Les acquisitions réalisées sur électrodes de fer parcourus par une intensité 20A Figure 1-29 montrent un échauffement du contact à $t=0.004s$. Cet échauffement à la limite de la fusion rend flexible le pont conducteur qui se rétracte (sans autre mouvement des électrodes) jusqu'à devenir fin à $t=0s$. Sous l'effet du passage de courant et de l'échauffement, le filament métallique explose et la vaporisation du pont métallique donne naissance à une décharge d'arc (anode à droite).

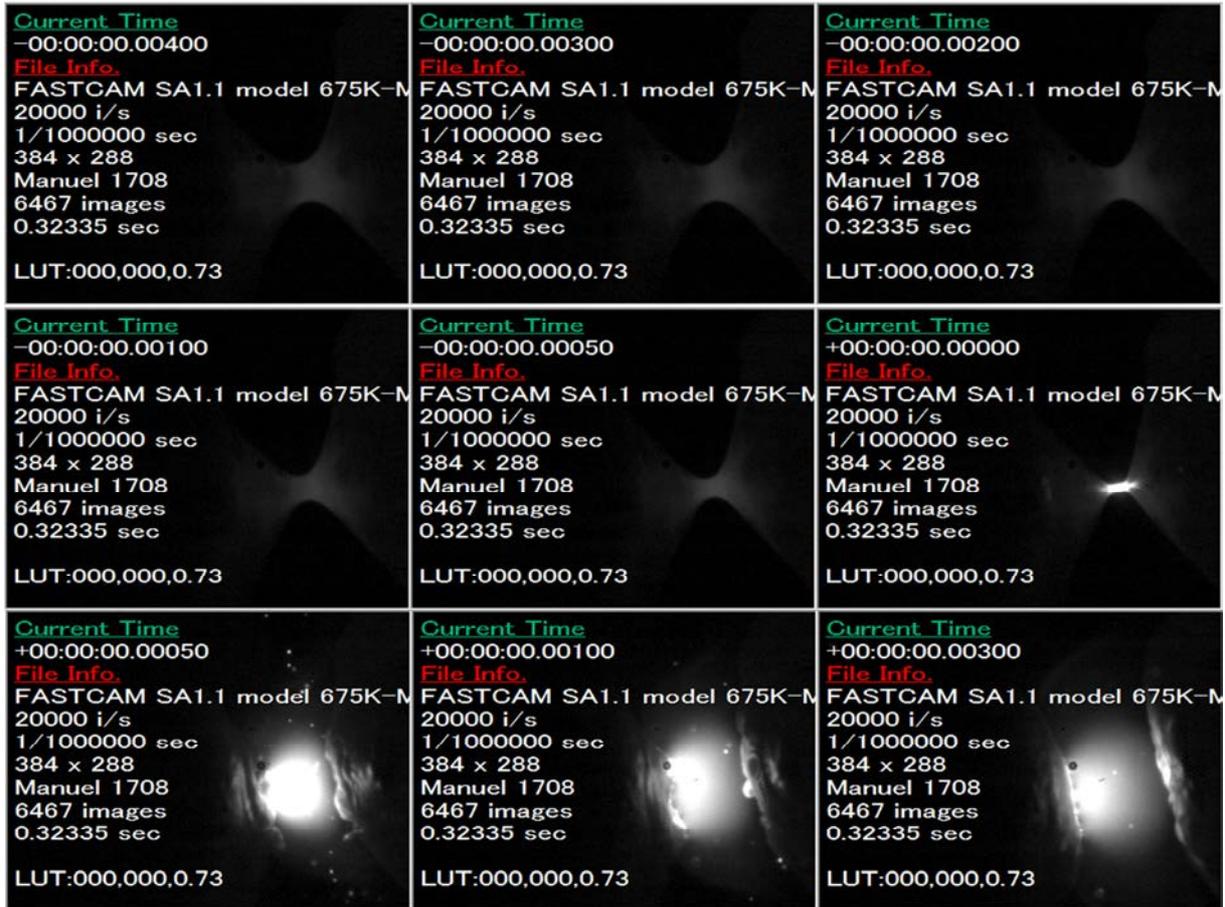


Figure 1-26 : Ouverture de contact par rétraction de pont fondu
 Electrode Fe, I=20A, Pression ambiante, Temps de pause 1 μ s

La lecture de la courbes Varc (Figure 1-27) atteste une augmentation de la tension inter-électrodes (augmentation de la résistance) au moment où le pont fondu s'étire. L'explosion du pont fondu intervient lorsque le filament conducteur devient résistif (envolée de la tension). La vaporisation du métal entraîne un temps de recouvrement électronique d'environ 15 μ s avant l'installation d'une décharge d'arc stable.

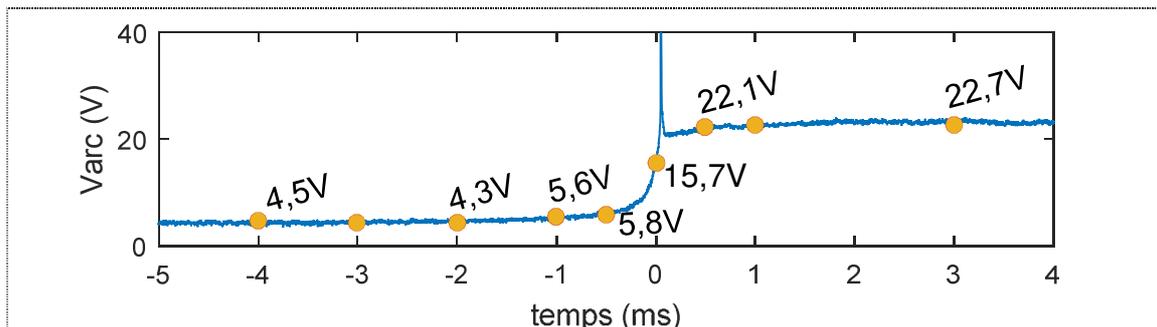


Figure 1-27 : Tension d'arc, électrodes Fe, I=20A, P=ambient

Jonction de pont fondu

En fonction de l'intensité du courant les traversant, les électrodes sont chauffées par la décharge d'arc et peuvent atteindre leur point de fusion. Dans ce cas, le métal ébullition s'anime et provoque des mouvements en surface (gaz, mobilité de la colonne d'arc, pression locale, etc.).

L'instabilité à la surface des électrodes engendre parfois la rencontre entre les 2 métaux de différents potentiels pour former un pont fondu conducteur.

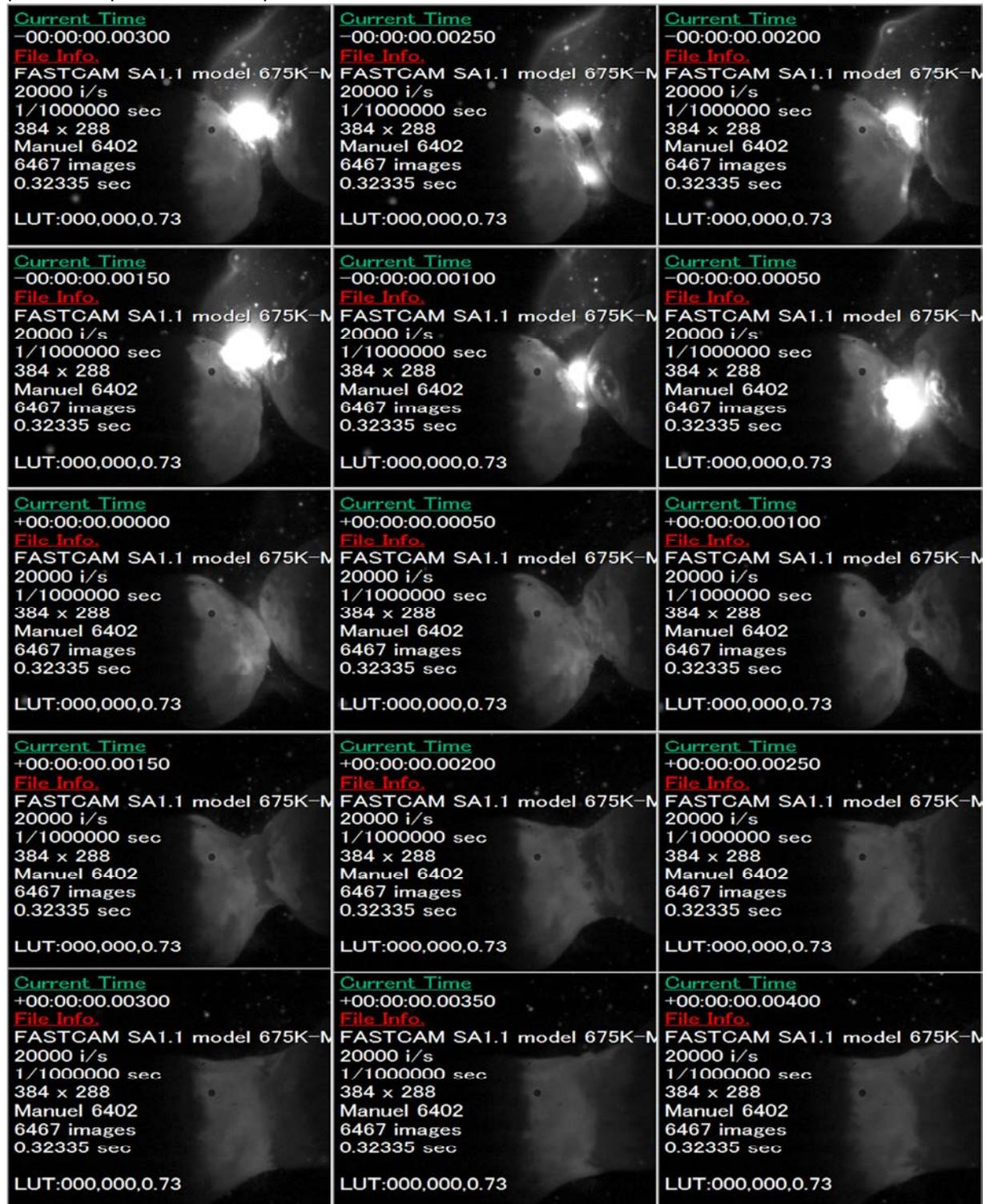


Figure 1-28 : Contact par fusion de pont fondu
Electrode Fe, Iarc=18A, Pression ambiante, Temps de pause 1µs

Le mouvement de la surface des électrodes en fusion est représenté par la Figure 1-39. Sous l'effet du passage d'un courant de 18-20A à 270V_{DC}, les électrodes de fer sont en fusion.

Deux phénomènes se combinent ici : d'une part, sous l'effet de la chaleur le métal des électrodes se dilate et réduisent l'écart du gap par le coefficient de dilatation α :

$$\Delta L = \alpha \cdot L_0 \cdot \Delta T \quad (1.17.)$$

Avec :

ΔL la variation de longueur (m)

α le coefficient de dilatation

L_0 la longueur initial

ΔT l'écart de température

D'autre part, le déplacement du pied d'arc fait pression localement sur le métallique en fusion et provoque un mouvement de vagues sur la surface.

La jonction des électrodes métalliques en fusion marque la fin de l'arc et de l'échauffement créé par la décharge électrique. En refroidissant, le pont se fige et reste conducteur. Le métal ramolli se rétracte selon ses caractéristiques propres. Si le passage du courant maintient le pont dans un état de viscosité suffisante, cette rétractation étire le métal mou et mène à nouveau à la vaporisation du pont fondu.

Ce phénomène de fusion/vaporisation répété provoque des arcs-flash même en courant continu.

Microcontact

L'établissement de contact par le mouvement du métal en fusion à la surface des électrodes mène parfois à de simples micro-contacts brefs et aléatoires. C'est ce que confirment les images prises lors d'un arc sur électrodes fer soumis à 18A.

La séquence d'image (Figure 1-29) est transposée en courant/tension par le chronogramme Figure 1-30. Un arc d'environ 350W est ponctué par un pont fondu d'à peine 50µs qui dissipe 86W d'énergie (soit un arc d'environ 1Ω précédé d'un pont fondu de 0.2Ω à t=0→50µs).

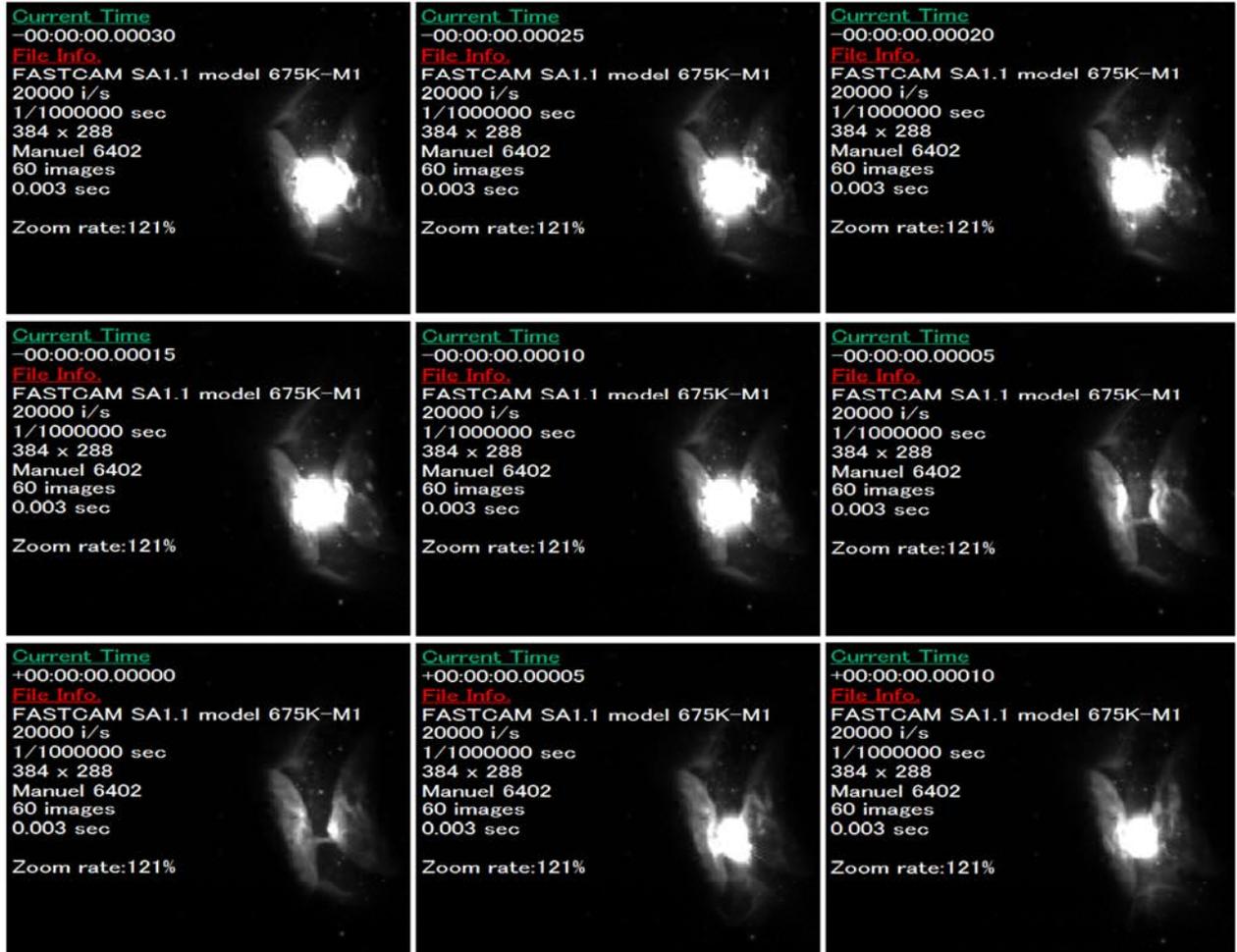


Figure 1-29 : Fusion des électrodes par un bref pont fondu
Cathode (gauche) & Anode (droite) Fe 6.3mm, 18.5A pression ambiante. Écartement non contrôlé <2mm
Temps de pause 1µs

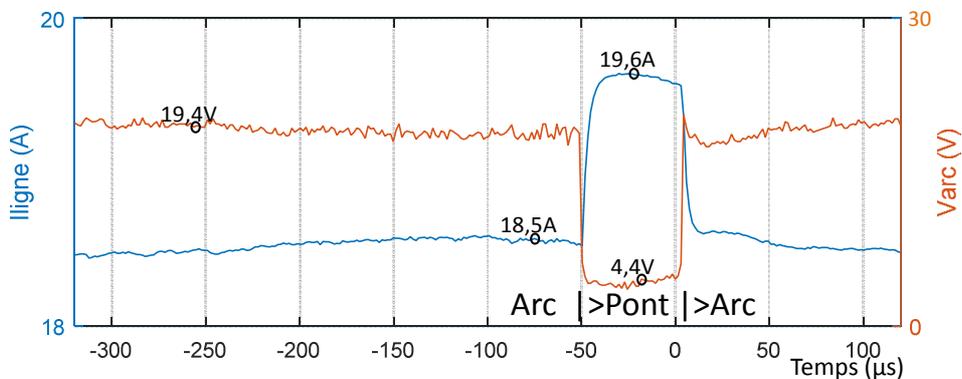


Figure 1-30 : Courant/tension pendant la fusion des électrodes par un bref pont fondu

1.3.2.2 Activité à l'anode

Les micros contacts provocants des "arc-flash" ne sont pas les seules sources visibles de scintillement d'une décharge électrique. Il est courant de mesurer électriquement des phénomènes d'oscillations répétitives de l'arc par la mesure courant/tension en DC [JPLP11, YaHW15]. Ces variations ne sont pas toujours d'origine extérieure à l'arc (alimentation régulée, convertisseur, etc.).

Ces travaux visent à comprendre d'une manière expérimentale les caractéristiques de ces fluctuations propres à l'arc pour en faire usage en protection contre les défauts électriques.

Extension lumineuse d'une zone ionisée oscillante

Le phénomène d'oscillation périodique du niveau de bruit (dispersion) est illustré par la tension d'arc sur la Figure 1-31A. La cinématographie Figure 1-31 représente le gap de cette décharge d'arc mesurée dont la séquence temporelle est dilatée en Figure 1-31B.

Les mesures montrent que pour l'instant de repère temporel '0' (t=292ms), l'amplitude du bruit V_{arc} est d'environ 1.5V crête-à-crête avec une tension moyenne de 18.85V. Au repère '1' le champ moyen du gap s'est augmenté d'environ 0.4V.

À partir de cet instant, une zone de forte luminescence s'étire de l'anode vers la cathode. Cette zone semble ne jamais toucher la cathode. Pourtant à l'image '10', la zone lumineuse de l'anode revient à son état initial en 1 à 2ms. Le gap est alors à nouveau soumis à une tension de 18,9V. Ce cycle de développement de la zone anodique se répète à de multiples reprises.

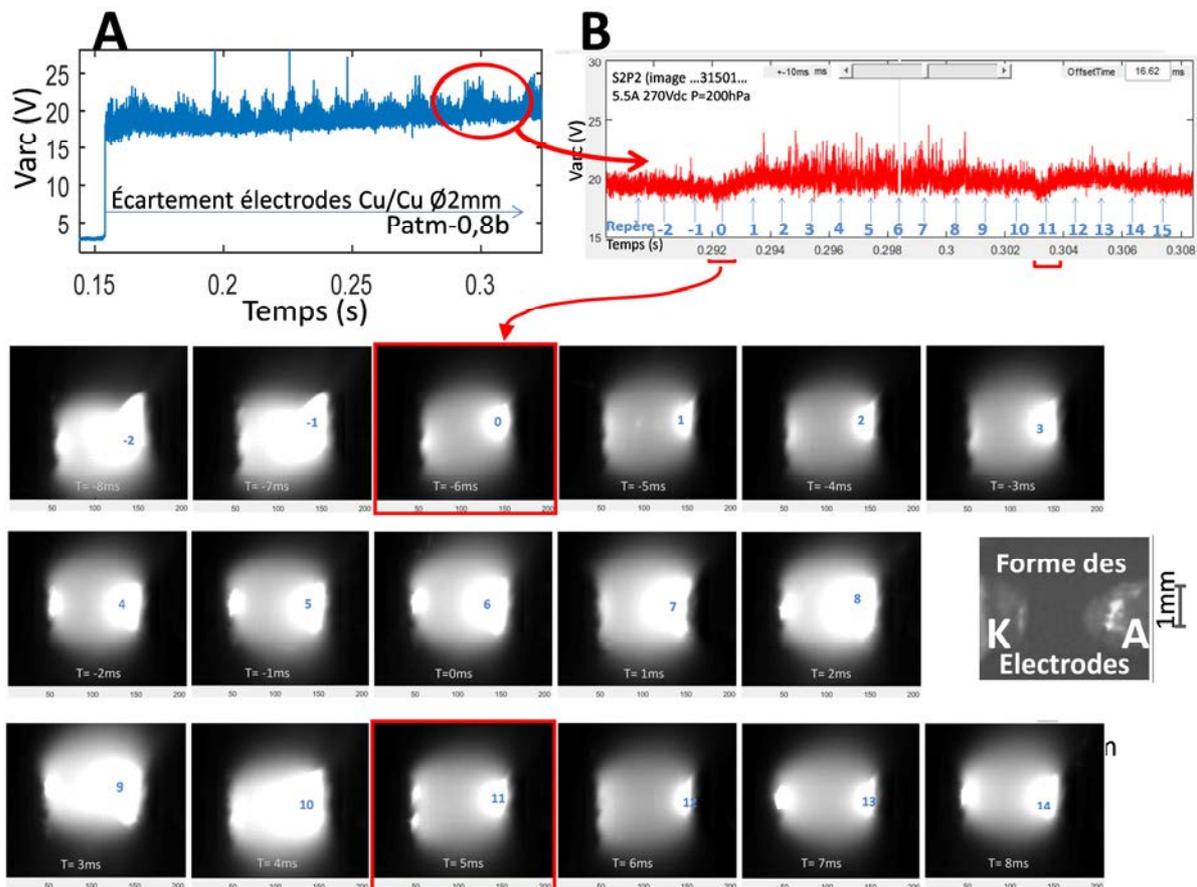


Figure 1-31 : Observations électriques tension d'arc VS fastCam
 (Valim 270V_{DC}, P=Patm-0.5b, charge RL=48Ω 105μH)
 vitesse 100kfps, temps de pause 10μs

Le pied d'arc est très mobile sur la cathode pendant la croissance de la zone lumineuse anodique. Ces mouvements peuvent être à l'origine de l'augmentation du bruit sur le signal électrique. D'autre

part, l'augmentation de la résistance moyenne laisse à penser que la zone anodique allonge et/ou ralentit le flux d'électrons.

Selon les relevés courant/tension et les images, il en ressort l'hypothèse que la zone lumineuse correspond à la colonne positive (qui s'allonge) et réduit la longueur de libre parcours des électrons en accélération dans la gaine en raison de la forte densité dans cette zone.

À défaut de pouvoir effectuer des relevés au cœur de la décharge d'arc, la luminosité du gap est évaluée. Elle détermine la cadence de développement et les paramètres qui définissent ses caractéristiques.

- 1) Méthode de mesure de l'évolution de la luminosité de la décharge
 - Méthode d'analyse de la luminosité de la décharge

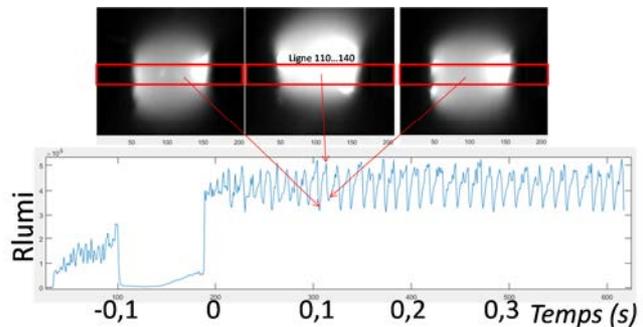
L'évolution de la luminescence ancrée sur l'anode est quantifiée par la somme moyenne des amplitudes de luminosité perçues par la caméra rapide entre les 2 électrodes. Cette mesure prend en compte la décharge dans sa globalité (Pied d'arc sur la cathode, colonne lumineuse de l'arc et zone anodique).

Sa valeur moyenne s'estime par l'opération :

$$R_{lumi} = \frac{1}{N} \sum_{l=y-\frac{N}{2}}^{y+\frac{N}{2}} A(l) \quad (1.18.)$$

Avec :

- À la matrice de pixels
- y la position verticale de la décharge
- Hauteur de la fenêtre (N=30 pixels)
- Largeur de la fenêtre (200 pixels)



L'étude de la luminosité du gap permet d'estimer l'évolution temporelle du phénomène. Cette évolution est transcrite par Rlumi Figure 1-32. Il y a une augmentation de l'intensité lumineuse de façon périodique. Cette rampe croissante s'achève par une brusque décroissance (environ 1ms) avant de renouveler une croissance relativement linéaire.

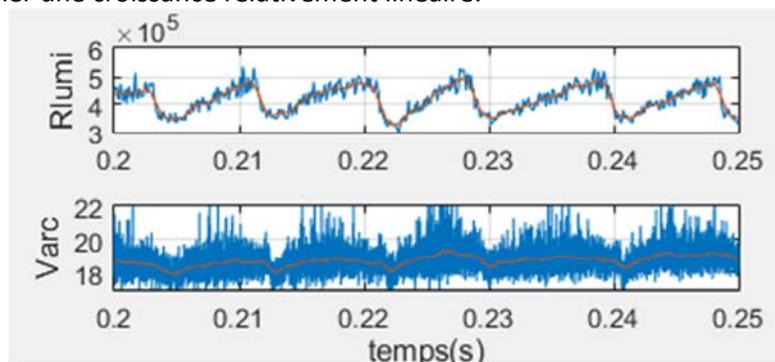


Figure 1-32 : Mesure de la luminosité et niveaux électriques de la décharge

2) ANALYSE COMPORTEMENTALE : Influence de la pression

L'étude de l'influence de la pression à partir d'expérimentations similaires (écartement entre 0,8mm et 1mm, géométrie des électrodes équivalente, 270V_{DC}, charge initiale 48Ω, etc.) est représentée par les spectrogrammes Figure 1-33, Figure 1-34, et Figure 1-35. Les spectrogrammes représentent les composantes spectrales qui composent le signal par FFT glissante. Ces mesures relèvent que dans les premiers instants après l'établissement de l'arc, la cadence de scintillement est d'environ :

- 125Hz à 800hPa,
- 70Hz à 500hPa
- 50Hz à 200hPa

Ces résultats montrent d'une part que le comportement de l'arc est fortement lié à son atmosphère, d'autre part que la cadence de "papillonnement" augmente avec la pression.

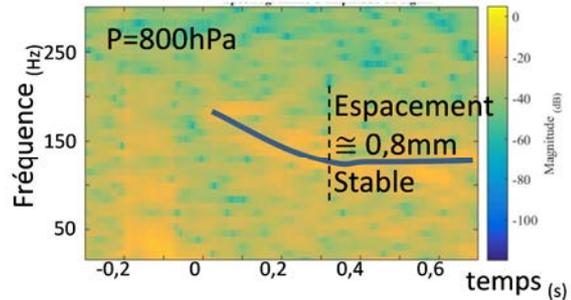


Figure 1-33 : Spectrogramme fluctuation gap 800hPa

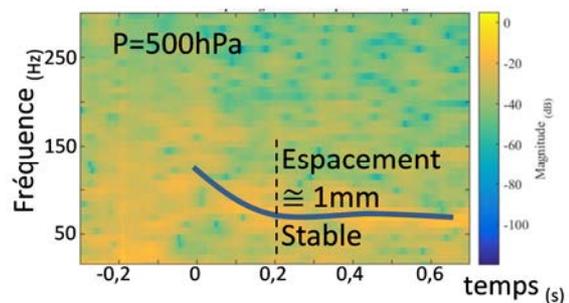


Figure 1-34 : Spectrogramme fluctuation gap 500hPa

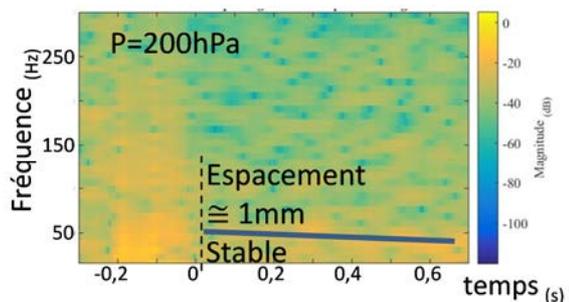


Figure 1-35 : Spectrogramme fluctuation gap 200hPa

3) "Papillonnement" de la luminescence à pression atmosphérique

L'observation de la fluctuation du bruit dans les signaux électriques est aisée en condition de dépression. En revanche, pour les mêmes distances, il est difficilement constatable à pression atmosphérique.

Par extrapolation des fréquences en dépression (de 200 à 800hPa), la cadence de papillonnement à pression atmosphérique s'estime supérieure à 125Hz (800hPa). Or, les observations faites à faible écartement (1mm) montrent que l'amplitude de ces fluctuations est insuffisante pour attester de leur présence (repère A \cong 1mm Figure 1-36). Cette oscillation du bruit est pourtant perceptible (amplitude croissante) lorsque l'écartement augmente (écartement d'environ 7.5mm repère B, C Figure 1-36).

Le spectrogramme (Figure 1-37) révèle alors une cadence d'oscillation avoisinant les 150Hz pour un écartement de 7.5mm soumis à une pression atmosphérique ambiante.

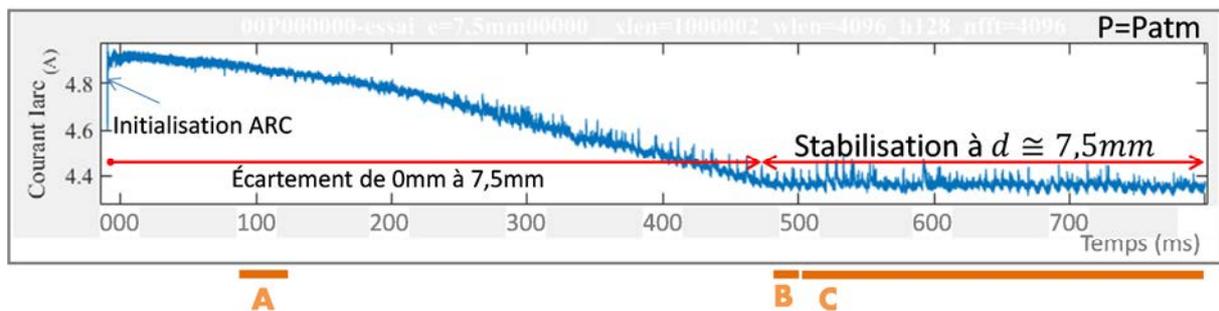


Figure 1-36 : Courant de ligne sur charge 270V_{DC} 48Ω avec arc, Patmo

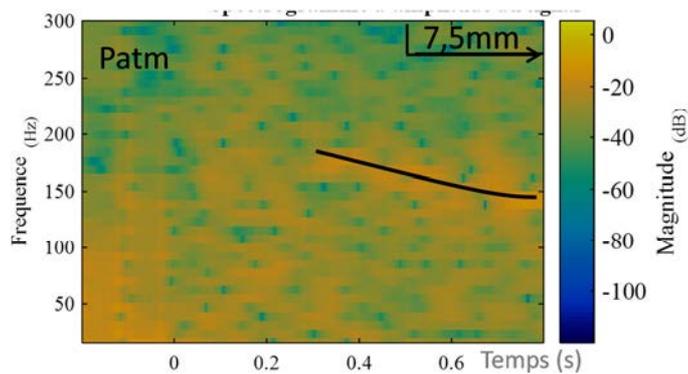


Figure 1-37 : Spectrogramme du bruit d'arc à pression atmosphérique

1.3.2.3 Projections de matières

Mouvement des gaz Ionisés

Dans une décharge, certaines observations laissent à penser que le gaz ionisé est de densité ou de charge suffisante pour exercer une influence physique sur les électrodes. C'est ce que reflète la séquence acquise Figure 1-38 montrant une masse lumineuse (gazeuse) à proximité de la cathode. L'anode, quant à elle, est en fusion. Les perturbations à sa surface donnent naissance à une brîbe de métal liquide se dirigeant vers la cathode. Les images dévoilent que le gaz chargé issu de la cathode repousse violemment le fragment d'anode en fusion.

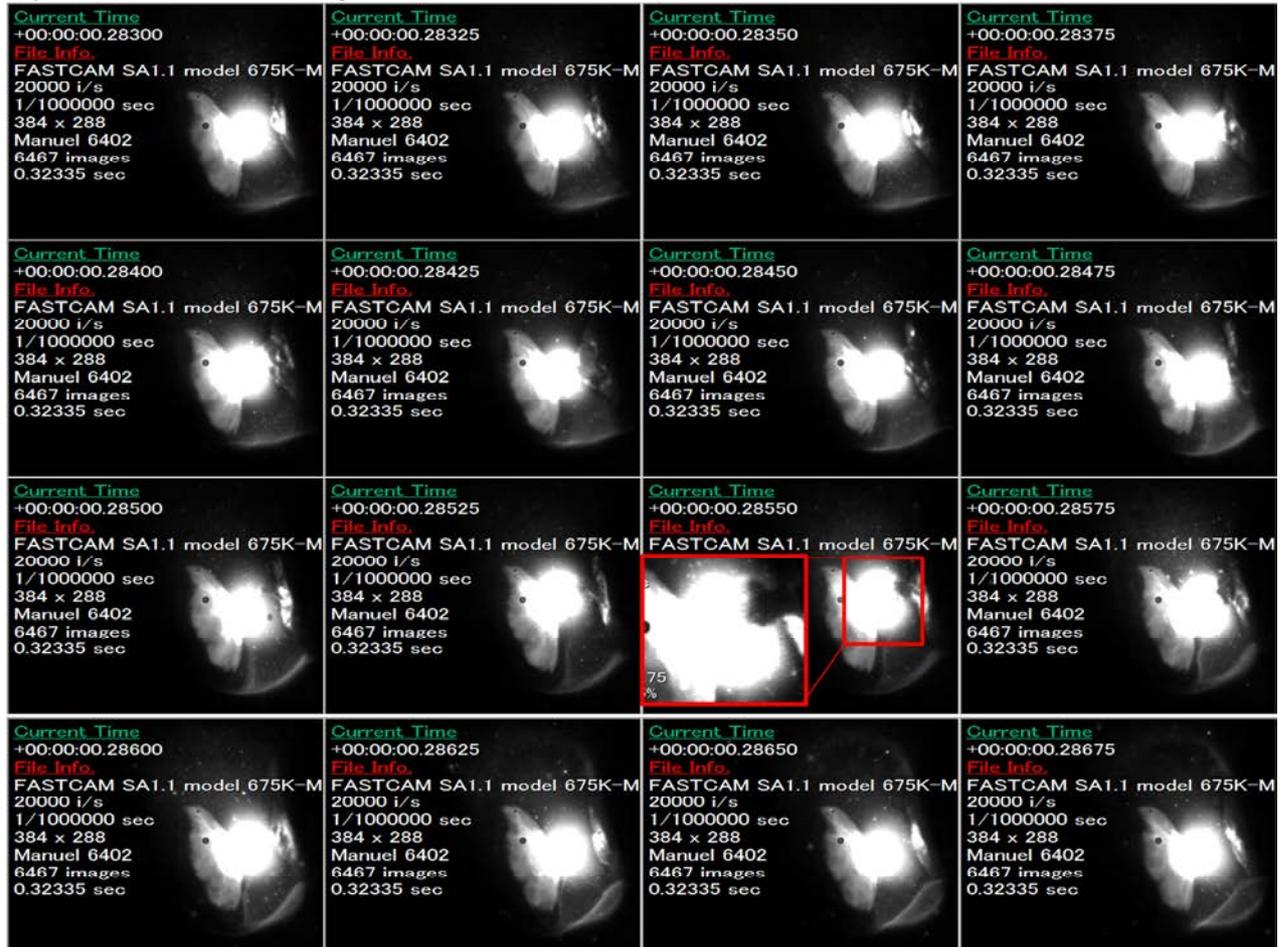


Figure 1-38 : Soufflage du métal en fusion sur l'anode par le gaz ionisé en cathode
 Décharge 18A, électrode fer, écartement <2mm
 Temps de pause 1 μ s

Explosion de particules en vol

Les projections de particules prennent des trajectoires de directions diverses.

Lorsque les particules sont projetées, elles peuvent se perdre au-delà de la décharge, être soufflées par un vent ionique ou encore rejoindre l'électrode opposée sous forme de dépôt.

Dans certains cas, tels que celui exposé Figure 1-39, la particule reste dans le flux de la décharge (cathode vers anode) et engendre une déformation de la colonne d'arc.

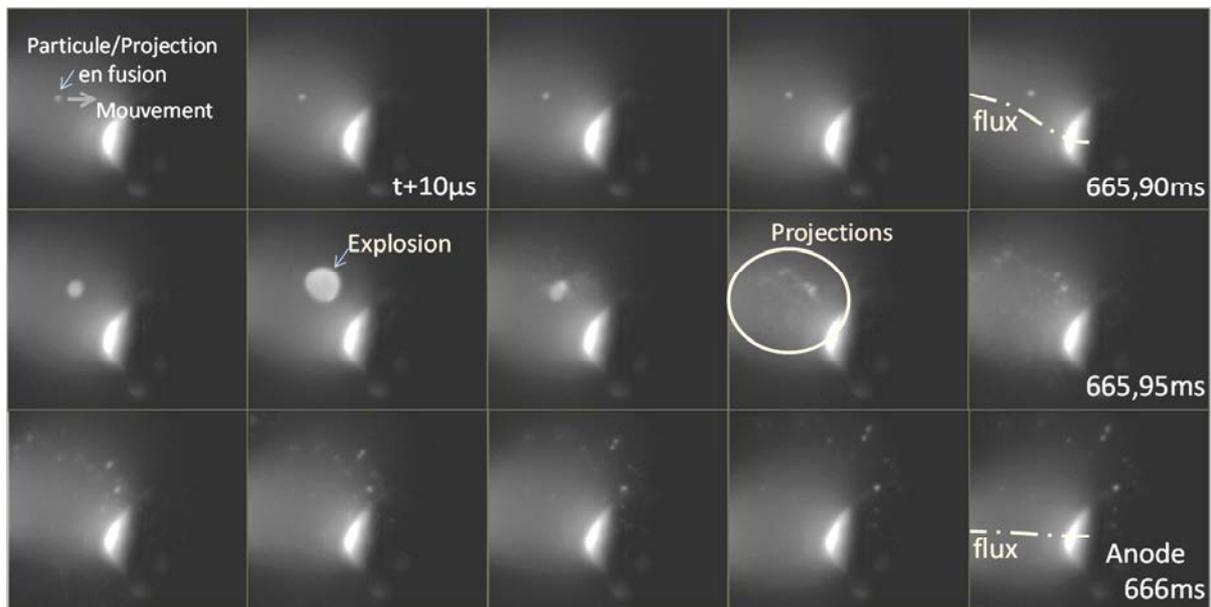


Figure 1-39 : Explosion de particule en vol
 270Vdc, 48Ω+arc, 5,56A, électrode Cu 6,3mm usagés, écartement approximatif 1,2mm
 images 100kfps, temps d'ouverture 1µs

À partir de l'image (première) $t=665.86\text{ms}$, la colonne lumineuse présente une déviation à la rencontre de la particule. Après explosion de la particule, la colonne reprend une trajectoire linéaire (vers la cathode hors champ de caméra à gauche).

Électriquement, la flexion de la colonne négative implique un allongement du parcours des électrons et augmente la tension d'arc entre 4V et 2V (environ 0.5Ω).

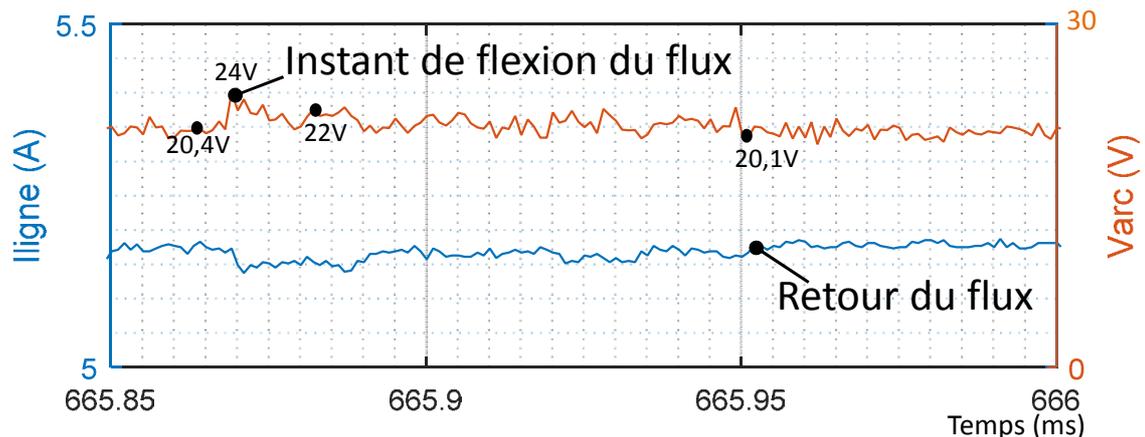


Figure 1-40 : Courant/Tension représentatif de l'évènement Figure 1-39

L'une des hypothèses avancées pour expliquer l'explosion de la particule est liée à la charge qu'elle véhicule. De ce fait, elle attire une partie du flux électro/ionique de la décharge.

D'autre part, l'amplitude de l'impédance d'arc ne se justifie pas uniquement par l'étirement de la colonne d'arc. En effet, la présence d'un objet massif dans le parcours des électrons favorise les collisions dans cette zone et peut engendrer une augmentation locale de la ddp.

Globalement, l'énergie des collisions électron/ions que subit la particule introduit un accroissement de l'excitation thermique jusqu'à son explosion.

1.4 Conclusion de l'étude phénoménologique

Dans cette partie, la théorie sur les décharges électriques a été présentée. Elle a été complétée par la description des phénomènes menant à un arc électrique.

L'exploration des paramètres physiques régissant le comportement de l'arc montre une diversité de résultats et surtout la grande influence de l'environnement d'un arc sur son allure. Cette étude basée sur l'analyse de signaux électriques (courant/tension) a été corroborée par de nombreux constats par imagerie rapide. De cette manière, il a été possible de corréler les informations électriques avec le comportement à la surface des électrodes.

Il en ressort que les arcs sont très fortement dépendants des conditions environnementales telles que la pression du gaz ionisé, l'intensité du courant jouant surtout sur l'échauffement des électrodes, la géométrie des électrodes ou encore le matériau des contacts. On peut ainsi dire que le comportement macroscopique de l'arc est similaire aux prédictions définies par les modélisations d'Ayrton. En revanche la dynamique de l'arc est dépendante du comportement de la décharge. En effet, les paramètres tels que la pression qui influence l'échange thermique et le libre parcours des électrons, l'intensité qui décrit le flux électronique de la décharge et surtout la température électronique de la décharge et de l'électrode, la mobilité à la surface des électrodes, la mobilité dans la décharge lors d'érosion ou encore de liquéfaction des électrodes, sont autant de données difficiles à prédire et intégrer dans la modélisation du bruit d'arcs électriques.

Les investigations faites pour la compréhension du phénomène d'arc ont eu pour objectif de souligner la présence de comportement caractéristique de l'arc en vue de développer un algorithme de détection basé sur ces spécificités.

Le chapitre II traitera de la revue bibliographique et taxonomique des méthodes de détection proposées par la littérature. L'exploration de méthodes de détection dédiées au contexte aéronautique est présentée en chapitre III.

Chapitre 2 :

LE RÉSEAU AÉRONAUTIQUE ET PROTECTIONS

- 2.1 CONTRAINTES LIÉES AU RÉSEAU AÉRONAUTIQUE
 - 2.1.1 DÉFAILLANCES ÉLECTRIQUES DANS LES AVIONS
 - 2.1.2 RISQUES LIÉS AUX ARCS
 - 2.1.3 PRÉSENCE DE DÉFAUT D'ARCS ÉLECTRIQUES DANS LES TOPOLOGIES À COURANT CONTINU
- 2.2 PROTECTIONS ÉLECTRIQUES CONVENTIONNELLES ET AFD
- 2.3 GRANDS PRINCIPES DE DÉTECTION D'ARCS
 - 2.3.1 CLASSIFICATION GÉNÉRALE
 - 2.3.2 CLASSIFICATION DES MÉTHODES D'ANALYSE PAR CONDUCTION ÉLECTRIQUE
 - 2.3.3 PRINCIPE DE LA MÉTHODE COMBINÉE MULTICRITÈRES

2 Le réseau aéronautique et protections

La bibliographie dans ce travail a mis à jour de nombreux cas spécifiques de protections électriques pour les applications DC. L'ensemble des méthodes de détection sont exposées en troisième partie de ce chapitre (2.3). Avant de détailler ces techniques de détection, un aperçu du contexte d'apparition d'arc et de leur impact sur l'environnement d'un aéronef avec les réseaux maillés typés aéronautiques HVDC est décrit en partie 2.1.1. ainsi que les risques spécifiques au milieu énuméré en 2.1.2.

Les systèmes de protection électriques conventionnels sont fréquemment utilisés dans l'industrie (en AC comme en DC). Ils sont basés sur l'observation des surcharges, des surintensités, des courants de court-circuit ou encore des fuites à la terre liées à un défaut d'isolement. Ces protections agissent avant que les défauts de surcharges ne provoquent d'incident et que les défauts d'isolement détériorent une fonctionnalité ou électrisent les usagers. En revanche, malgré leur capacité à détecter des anomalies "hors normes", ils ne permettent pas de protéger l'ensemble d'une installation électrique. Certains défauts comme les arcs électriques séries sont imperceptibles pour ces dispositifs, car en dehors des masques de détection (surchARGE/intensité, fuite de courant). Leur puissance est limitée par la charge victime d'une défaillance et peut paraître tel un arc normal ou une légère variation de charge (momentanée à l'ouverture d'un contact). Les protections conventionnelles sont donc inopérantes pour ce type de défaut alors que celui-ci présente des risques détaillés en partie 2.1 pour l'environnement aéronautique.

2.1 Contraintes liées au réseau aéronautique

Dans le domaine de l'aéronautique, les actionneurs hydrauliques ou pneumatiques sont peu à peu délaissés au profit des actionneurs électriques. Les besoins énergétiques à bord des aéronefs sont donc en pleine croissance. Pour la distribution et la manipulation de ces niveaux de puissance de plus en plus élevés, les réseaux électriques de distribution se sont adaptés à de nouvelles topologies.

PASSAGE EN 270VDC DES RÉSEAUX AÉRONAUTIQUES :

Jusqu'à présent, les réseaux de puissance aéronautiques étaient alimentés par des génératrices qui délivrent une tension de 115V/360-800Hz avec de nombreux convertisseurs pour fournir l'énergie à l'ensemble des équipements de l'appareil : 115Vac-28V_{DC}-230V_{AC}.

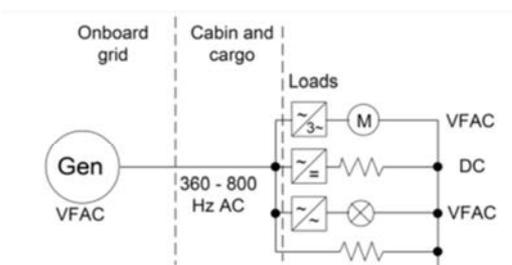


Figure 2-1 : Convertisseurs dans le réseau de puissance conventionnel actuels (AC/DC AC/AC)

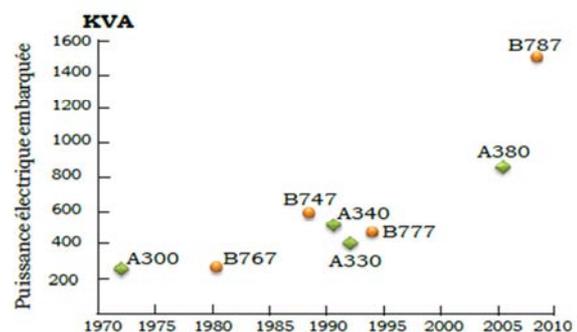


Figure 2-2 : Evolution de la puissance électrique embarquée [Char13]

Les besoins actuels en énergie augmentent (de quelque centaine avant les années 2000 à plusieurs milliers de kW à l'avenir Figure 2-2) et les moyens de production évoluent. C'est le constat qu'a fait Julià Delos Ayllon à travers son mémoire [Ayll10]. Les appareils Solar Impulse ont montré depuis 2010 qu'un vol peut s'effectuer par recharge photovoltaïque ou encore piles à combustible avec une énergie stockée sur batterie. Ces nouvelles sources d'énergie embarquées fournissent du courant continu contrairement aux génératrices AC pour lesquelles il faut ajouter un étage de redressement.

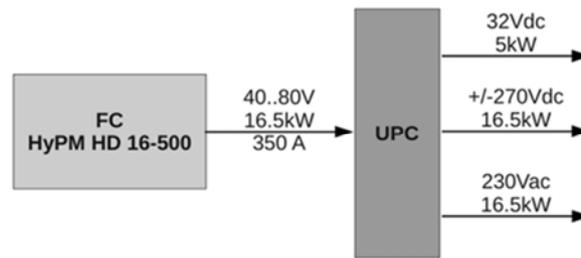


Figure 2-3 : exemple de configuration possible dans une structure DC [Ayll10]

Les constructeurs envisagent déjà des architectures électriques mixtes à base de pile à combustible, batterie lithium-ion (Boeing Dreamliner) et autres sources DC pour diminuer les rejets de CO₂ (Figure 2-3). En effet, à partir de source d'alimentations continues ou redressées, il est possible de stocker l'énergie par batteries. La distribution s'effectue ensuite à travers différents postes de transformation de puissance (convertisseurs DC/DC, onduleurs DC/AC) qui présentent l'avantage d'être moins volumineux qu'en courant alternatif.

CONVERTISSEURS DC : UN GAIN DE POIDS

Dans le milieu aéronautique, pour réduire les émissions et les coûts d'exploitation, les constructeurs réduisent le poids des équipements embarqués. D'après la récente étude réalisée par Johannes Brombach [BSLS11, NyBS12], l'usage de sources continues apporte un gain important sur le poids des convertisseurs de puissance embarqués.

Les caractéristiques du Tableau 3 font apparaître que le convertisseur AC/AC (transformateur/Génératrice) a un rendement poids/énergie de 1.43kg/W alors que le convertisseur DC/DC est plus efficace avec un rapport de 0.17kg/W.

Selon J.Brombach, le remplacement des convertisseurs AC lourds en cuivre (transformateur, bobinage) par des convertisseurs DC offre un gain de masse de l'ordre de 38%. Cette optimisation est possible avec l'usage de sources d'énergie "mixte" HVDC.

Tableau 3 : Rapport poids/puissance pour des convertisseurs de 5kW et plus [BSLS11]

Converter type	Power density
AC/AC	1.43 kg/kW
AC/DC	0.51 kg/kW
DC/AC	0.95 kg/kW
DC/DC	0.17 kg/kW

Comme en AC, les nouvelles topologies HVDC gèrent et distribuent le flux d'énergie par le SSPC (Solid State Power Controller). Véritable outil d'aiguillage, de surveillance et de protection du réseau électrique d'un aéronef, le SSPC se fait intelligent [AnZB12, YCLW15] en intégrant les fonctionnalités de détection d'arcs électriques en ouvrant le circuit électrique (Figure 2-5).

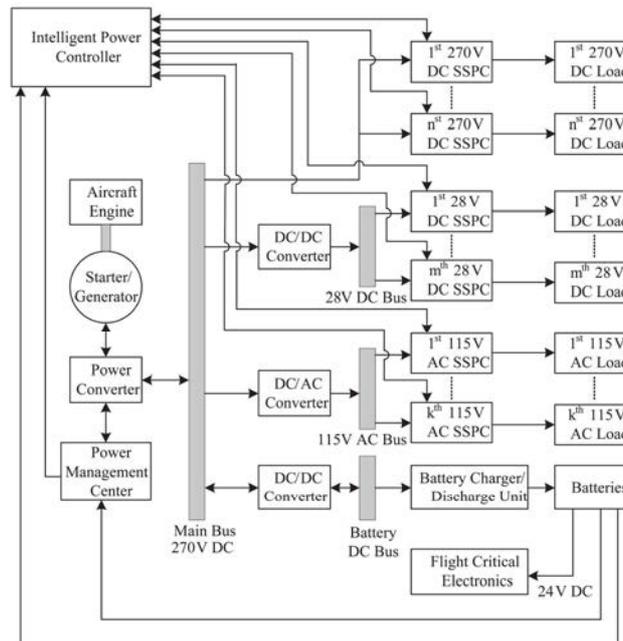


Figure 2-4 : SSCP générique DC PDS [YCLW15]

Le SSCP est un répartiteur d'énergie qui alimente généralement un seul type de charge par voie (Figure 2-4). En revanche, sur une voie, les charges peuvent être multiples. L'enjeu des nouveaux SSCP est de veiller à ce qu'aucun arc ne se présente ni sur la ligne de distribution ni dans la charge grâce à la surveillance des courants/tensions distribués.

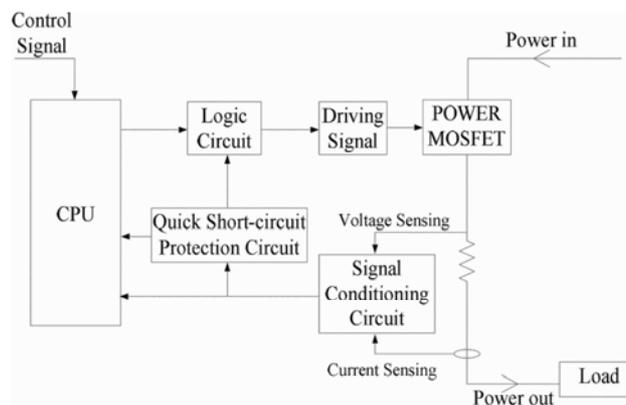


Figure 2-5 : Principe SSCP contrôleur à semiconducteur [MXYW14]

2.1.1 Défaillances électriques dans les avions

En aéronautique, le vieillissement et la fatigue vibrationnelle des conducteurs électriques sont l'une des premières causes de défaillances indésirables [FuHa01].

La synthèse des origines de défaillances électriques en aéronautique est proposée en 2007 par une équipe de la NASA [WTTG07] Figure 2-6. L'expertise réalisée par le comité FAA ATSRAC se base sur les faisceaux défaillants d'aéronefs du constructeur BOEING.

Ce rapport exprime que 55% des origines de défaillances électriques concernent la rupture du pouvoir isolant des câbles. Seulement 14% sont clairement identifiées comme un défaut d'origine mécanique. Les mauvais contacts représentent 9% des cas, et le marquage à chaud des câbles est à l'origine de 9% des défaillances également.

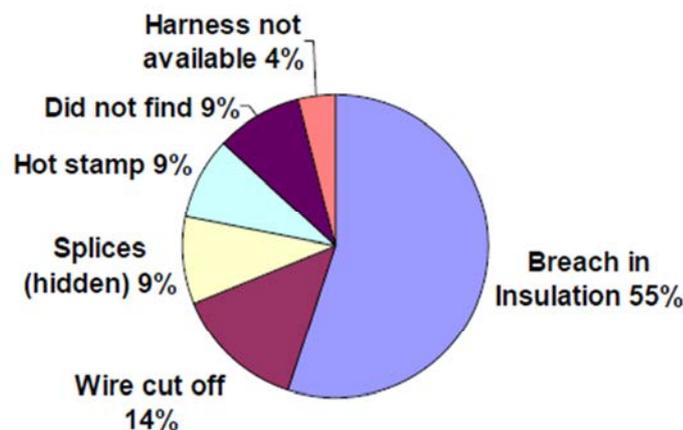


Figure 2-6 : Source des défaillances électriques [WTTG07])

Les origines des défauts électriques, toutes causes confondues (Figure 2-7), sont majoritairement des défauts de courts circuits : usure mécanique des fils, brèche, contact accidentel suite à perforation de la gaine isolante ($\cong 55\%$).

Bien que ces données statistiques ne soient pas orientées sur les défauts d'arcs série, leur présence est comptabilisée parmi les 11% de connecteur coupés, 9% de défaillance de connecteur et autres défaillances électriques référencés Figure 2-7 (6% non spécifié, 5% corrosion, 4% perte de contact, 3% rupture de l'isolant, ...).

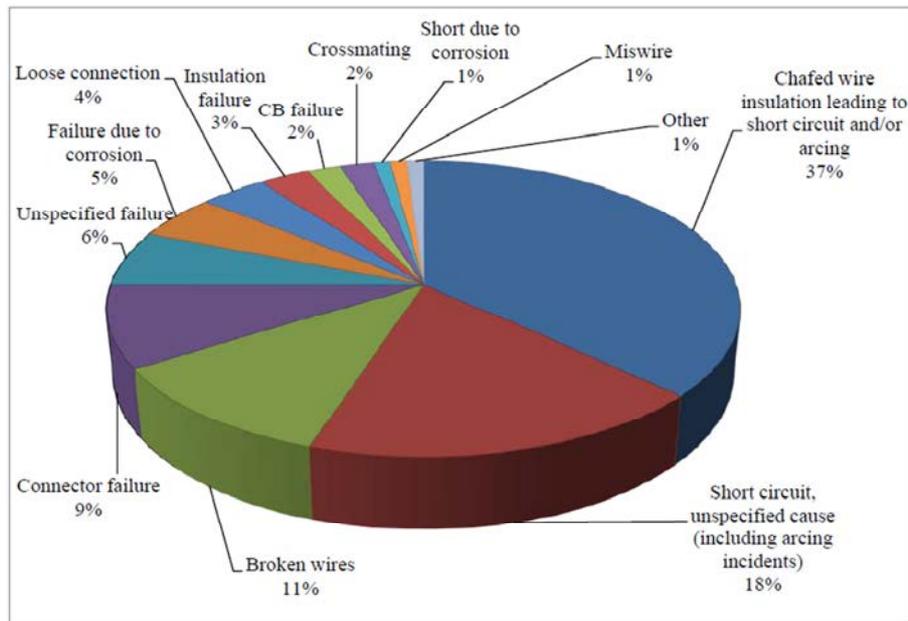


Figure 2-7 : Origine de défauts électriques
(tiré de [Anil12] exploitant les données de [LeAr00])

Il est à noter que électriquement, un défaut d'arc série provoque une augmentation de l'impédance de ligne et perturbe l'alimentation des composants électriques victimes, mais n'empêche pas leur fonctionnement. De ce fait, malgré les données exposées par Wheeler Figure 2-6, Yamasu et Lee Figure 2-7, il est difficile de déterminer le taux d'anomalies provoquées spécifiquement par les arcs séries. Seule une expertise des contacts ou conducteurs après qu'un défaut ou incident soit reporté permet de confirmer la présence de ce type de défauts.

2.1.2 Risques liés aux arcs

Un arc électrique peut créer des dommages par projection de matière en fusion et également par échauffement à plusieurs milliers de degrés Celsius entre un conducteur et son environnement. Ces températures très élevées (supérieurs à 3000°C [Viol93]) en un espace restreint sont le point de départ des incendies d'origine électrique par arc.

Les travaux menés à Toulouse par El Bayda [Elba12] constituent une approche expérimentale des échanges d'énergies produits par un arc. Ils concernent surtout les défauts d'arc impliquant un faisceau de câbles pris dans un harnais aéronautique et l'interaction d'un défaut de câble avec la structure environnante (rayonnement vers la carlingue). Cette étude se limite aux arcs DC sur câbles monobrin cuivre et multibrins aluminés.

Lors de l'apparition d'un arc électrique, il y a un risque que le défaut se propage le long du câble par un effet de conduction thermique et de dégradation des isolants. C'est le phénomène d'Arc Tracking qui peut provoquer de lourds dommages sur une grande surface de faisceaux et leur environnement.

Moffat [MADK08] en a listé les effets et conséquences sur la navigabilité d'un avion, la capacité de détection et de leurs occurrences. Ces caractéristiques sont résumées **Tableau 4**.

Tableau 4 : Diversité et criticité des défauts [MADK08]

<p>Défaut d'isolation</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arc tracking humide <ul style="list-style-type: none"> ○ Conduction d'isolant, Flash, Dépôt de carbone, Feu ➔ Détection peu probable (surtout en vol) • Arc tracking sec <ul style="list-style-type: none"> ○ Conduction d'isolant, Flash, Dépôt de carbone, Feu, Échauffement du voisinage (contact avec d'autres câbles) ➔ Détection possible avec les méthodes existantes au sol ➔ Détection incertaine en vol <p><u>Conséquences locales</u> : Carbonisation de l'isolant, arc, Incendie <u>Conséquences à bord</u> : Perte de contrôle de l'avion, Incendie, Explosion Dangerosité : Extrêmement dangereux Fréquence : Très probable</p>
<p>Défaut de contact</p> <ul style="list-style-type: none"> • Arc série <ul style="list-style-type: none"> ○ Corrosion du contact, Perte de conduction, Flash, échauffement, IR, UV, Pyrolyse ➔ Rarement détectable (surtout en vol) <p><u>Conséquences locales</u> : Carbonisation de l'isolant. Fumée, incendie, arc. Perte de conduction</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fretting Contact <ul style="list-style-type: none"> ○ Vibration (mécanique, inductive) du contact, Usure, résistance de contact, perte de conduction ➔ Détection peu probable avec les moyens existants <p><u>Conséquences locales</u> : Perte de signal, Départ à l'arc</p> <p><u>Conséquences à bord</u> : Perte de contrôle de l'avion, Incendie Dangerosité : Extrêmement dangereux Fréquence : probable</p>

L'étude réalisée par H. El Bayda se concentre non seulement sur le critère de la durée nécessaire pour créer un départ d'incendie, mais également sur la répartition de la puissance dissipée par l'arc électrique. Une répartition des puissances produites et diffusées par l'arc électrique est exposée Figure 2-8 :

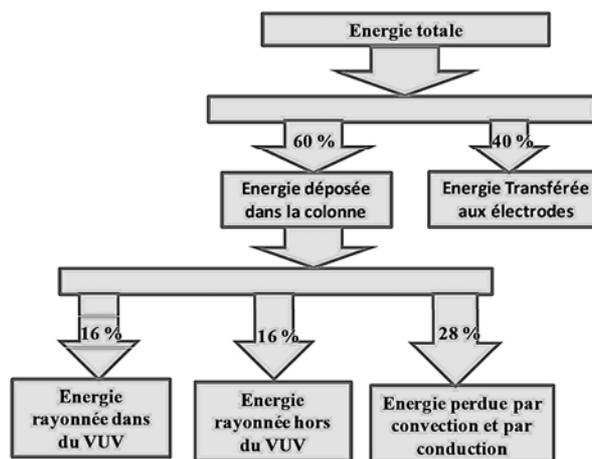


Figure 2-8 : Bilan d'énergie sur les câbles à âme cuivrés [Elba12]

On observe aussi que les conséquences d'un arc créé en laboratoire diffèrent de celles d'un arc en condition réelle (rayonnement, interaction avec les effets de parois). C'est pourquoi Ammerman [AGSN10] a proposé de prendre en considération le rayonnement énergétique de l'arc E qui s'estime par les équations suivantes :

- Estimation sphérique :

$$E = E_{arc} / (4\pi \cdot d^2) \quad \text{où } E_{arc} = \text{énergie (R.i.t)} \text{ et } d = \text{éloignement du défaut} \quad (2.1.)$$

- Estimation dans un environnement confiné rectangulaire :

$$E = k * E_{arc} / (a^2 + d^2) \quad (2.2.)$$

k et a des coefficients tabulés selon les travaux originaux de Wilkins [WiMM04] avec les environnements proposés dans [Ieee04]

Selon Vacqué [VaAu00], les puissances impliquées dans l'arc peuvent être résumées par l'équation suivante :

$$P_a = P_{cond} + P_{conv} + P_{rad} + P_{elec} \quad (2.2.)$$

Avec P_{cond} qui représente la conduction thermique aux particules (gaz) - P_{conv} qui correspond à la convection issue du déplacement de plasma - P_{elec} qui représente le transfert d'enthalpie des électrons ayant atteint l'anode - P_{rad} représente quant à lui le bilan entre la puissance rayonnée du plasma vers l'anode à celle rayonnée par la surface de la tache anodique vers le plasma. La valeur des radiations peut fluctuer en fonction de la densité de vapeur qui a tendance à abaisser la température du plasma et augmenter le rayonnement.

D'après ces équations, les Figure 2-9 & Figure 2-10 illustrent l'incidence énergétique (en calories) d'un défaut d'arc de forte intensité (2-10kA) exposant une surface espacée à 45cm du défaut. L'anomalie est réalisée sur un écartement d'électrodes de 32mm.

- Figure 2-9 : Le défaut est libre et sans limitation d'espace.
- Figure 2-10 : le défaut est dans un milieu confiné de type armoire électrique

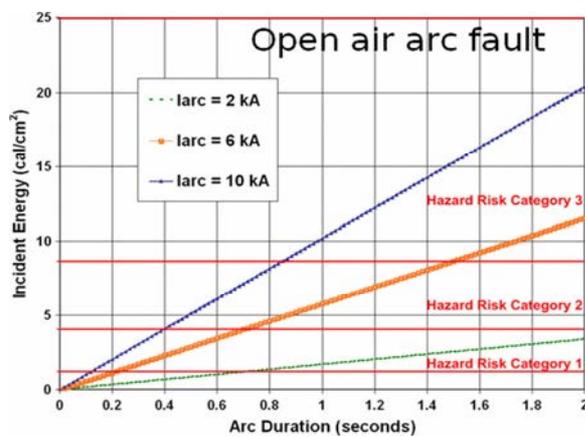


Figure 2-9 :
Énergie rayonnée d'un arc en air libre

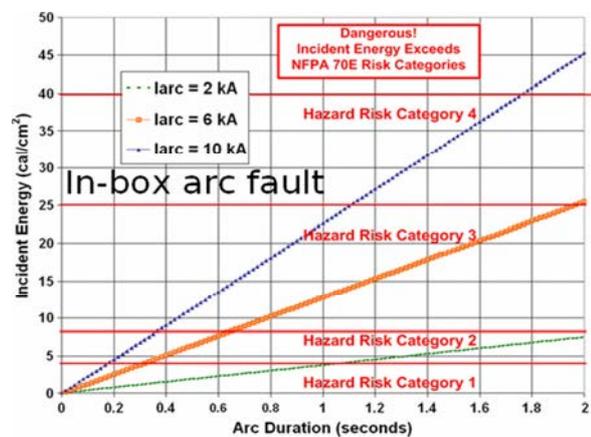


Figure 2-10 :
Énergie rayonnée d'un arc confiné dans l'espace

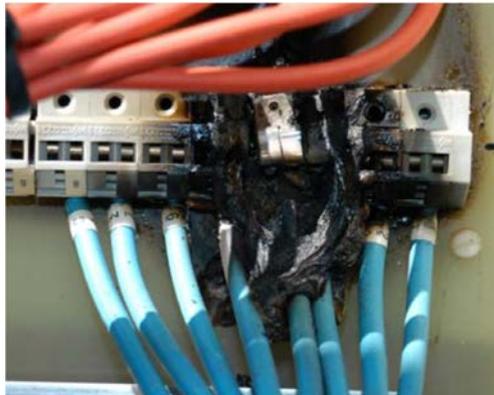
Ces données montrent que la quantité d'énergie développée par un arc, sur la surface au voisinage, est proportionnelle à son intensité. Ainsi, pour 10kA le défaut engendre 10cal/cm² en espace ouvert alors qu'en espace confiné, ce même défaut provoque plus du double d'échauffement (22cal/cm²). Cette notion de puissance rayonnée au champ proche se retrouve dans les travaux de Schau [Scha17] avec un environnement confiné selon différents paramètres (gap, matériaux, intensité). Par ces études, la notion de vitesse de mise en protection est prépondérante pour limiter la propagation du défaut à son environnement.

Plusieurs études montrent que l'enjeu est de minimiser le temps de détection d'arc pour limiter les dégâts et éviter la propagation aux autres organes proches par incendie ou projection de matière (Figure 2-11).

Cette nécessité de détection s'impose également pour :

- le domaine photovoltaïque où l'auto-entretien des arcs par l'énergie solaire augmente la dangerosité en l'absence de source d'énergie pilotable [Haeb07]
- Le domaine du stockage par batterie où l'énergie est stockée en masse et tout échauffement peut provoquer des réactions chimiques explosives [ASDA15, Scha17].

L'ensemble de ces études montrent qu'il est important de déceler la présence d'un défaut d'arc électrique dans un délai en dessous du seuil critique pour l'environnement.



**Figure 2-11: photo de dégâts de connecteur engendrés par un feu d'arc électrique [Haeb07]
Boîtier électrique PV**

2.1.3 Présence de défaut d'arcs électriques dans les topologies à courant continu

L'évolution des technologies de conversion d'énergie favorise le déploiement des systèmes à courant continu. Les réseaux DC offrent un meilleur bilan énergétique par la réduction des pertes électromagnétiques. Les convertisseurs sont également moins lourds à intégrer et plus souples à adapter sur un réseau existant [BSLS11].

Cette facilité de mise en œuvre s'impose dans de nombreuses applications : Production [LiDC11] et acheminement d'énergies [Kaip07], data center, véhicules [HeML12], avion plus électrique (MEA : More electric aircraft) [Ayll10].

Dans un avion comme dans tous les réseaux à courant continu, la qualité des périphériques interconnectés joue sur le comportement global de la structure d'alimentation électrique. On parle alors de topologie complexe composée de multiples organes interdépendants.

En plus des charges traditionnelles (résistives, inductives, capacitives ou encore à forces électromotrices), 4 types d'interfaces à commutation de puissance sont à considérer dans un réseau DC : [SKLL15] Figure 2-12

- Unité d'interface réseau : Grid Interface Unit (GIU)
qui crée l'interconnexion entre les réseaux. Exemple : AC/DC, (générateur, convertisseur)
- Unité d'interface de producteur d'énergie : Renewable Interface Unit (RIU)
Interface les sources d'énergie de type photovoltaïque, pile à combustible, etc.
- Unité d'interface de stockage d'énergie : Storage Interface Unit (SIU)
Transmets l'énergie de façon bidirectionnelle
- Interface de charge : Load Interface Unit (LIU)
Alimente des charges qui requièrent la mise en forme du signal source (convertisseur)

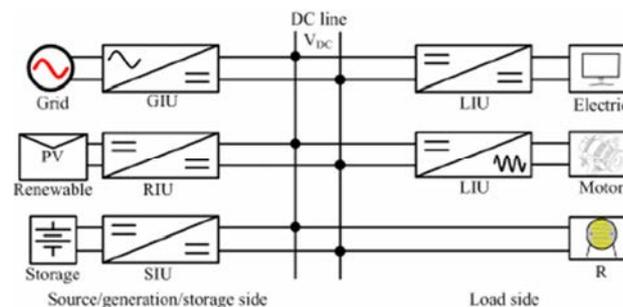


Figure 2-12 : Diversité de réseau DC (Seo 2015)

Chaque interface présente une occupation spectrale de fréquence. Il s'agit d'une signature pouvant varier d'un modèle à un autre en fonction de la consommation des charges en aval ou des sources en amont.

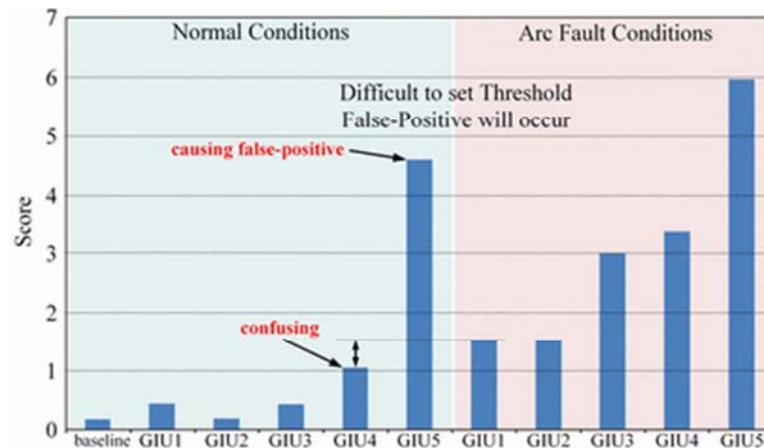


Figure 2-13 : Résultat de la moyenne DFT d'alimentation AC/DC GIU

Par exemple, dans un domaine connexe à l'étude, Seo [SKLL15] montre que pour 5 convertisseurs GIU (AC vers DC), il est possible de distinguer 2 degrés de perturbation spectrale produite par une alimentation. Cette pollution est illustrée par le comparatif de sources Figure 2-13 selon les catégories :

- Les Sources DC : GIU1, GIU2, GIU3, en conditions nominales, produisent une signature fréquentielle faiblement polluée (faible impact spectral)
- Les Sources DC : GIU4, GIU5, en conditions nominales, produisent une signature fréquentielle fortement polluée (impact spectral important)

Quant aux charges, elles peuvent :

- Être passives et admettre toutes formes d'ondes (AC ou DC)
- Nécessiter une alimentation continue (DC)
- Nécessiter une adaptation de l'alimentation (DC→AC ou DC→DC)

Ces constatations soulignent que lors de détection de défaut d'arc par analyse fréquentielle, certaines alimentations et charges à fort encombrement spectral peuvent provoquer de fausses détections.

À l'inverse des fausses détections de présence d'arc, la multiplicité des étages de conversions peut occulter la présence de défaut électrique. D'une part, la composante fréquentielle des signaux issus des convertisseurs est complexe (spectrale, harmoniques, régulation et asservissement), d'autre part les interfaces d'entrée et de sortie de convertisseurs atténuent et filtrent les informations utiles pour la recherche de défaut [YuDJO7].

Schématisé en Figure 2-14, un défaut d'arc est introduit successivement (modèle basique de bruit gaussien proportionnel au courant) (Yao2015) en différents points d'un réseau complexe de convertisseurs DC/DC. La modélisation du comportement réseau Figure 2-16 révèle que les différentes logiques de régulation présentées (Figure 2-15 : Asservissement ACD/CDC de la source) réagissent différemment en fonction de la position d'un défaut d'arc sur le réseau.

Ainsi, les traces Figure 2-16 exposent les comportements du réseau "smart-grid" [YaHW15] selon la position des défauts décrite en Figure 2-14. Les traces indiquent que les convertisseurs compensent un trouble d'alimentation dû à l'arc par une augmentation du courant pour maintenir leur consigne de sortie et tentent de réguler la puissance (cas1). En situation où le défaut est présent en aval du convertisseur (cas2), c'est l'intensité fournie par le convertisseur qui subit des variations en raison de la nouvelle impédance de charge due à l'arc.

Dans un réseau continu, la présence d'un arc série ne se résume pas simplement à une augmentation de l'impédance de ligne. L'arc peut aussi faire varier le comportement de l'ensemble des charges en raison des adaptations de point de fonctionnement des systèmes de régulation selon le type de régulation mis en œuvre (exemple d'asservissement Figure 2-15).

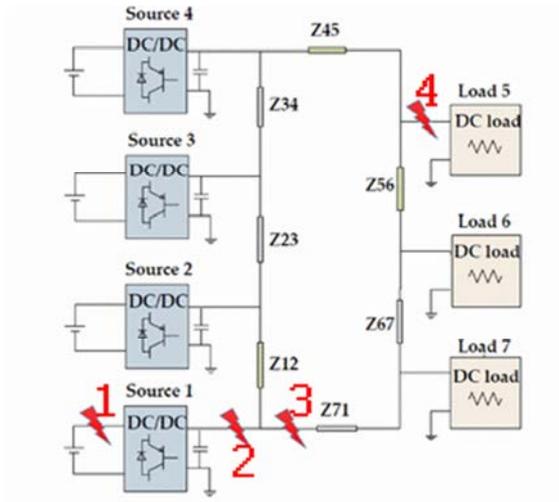


Figure 2-14 : Smart grid DC/DC (Yao2015)

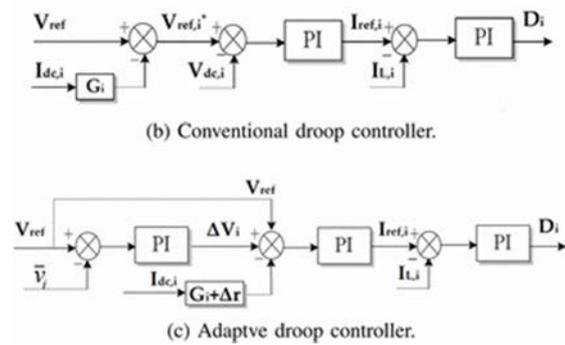


Figure 2-15 : Logique de régulation CVD(b); AVD(c) (Yao2015)

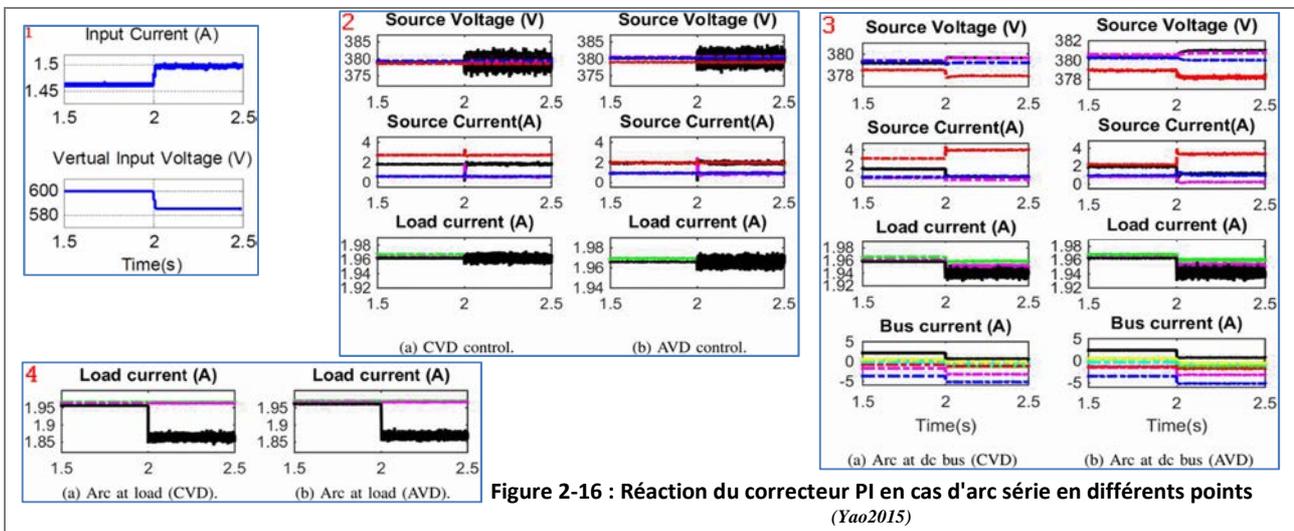


Figure 2-16 : Réaction du correcteur PI en cas d'arc série en différents points (Yao2015)

2.2 Protections électriques conventionnelles et AFD

On distingue 4 types de défauts électriques :

- Surtension.

Augmentation soudaine de la tension due à la foudre ou à l'ouverture d'un circuit fortement inductif. Cette situation peut provoquer le claquage des isolants menant soit à la destruction des composants, soit à une conduction par arc ou carbonisation conductrice (équivalent à un court-circuit).
La parade pour lutter contre ces cas se réduit à l'usage de parafoudre, limiteur et relais de surtension
- Surintensité par surcharge.

Augmentation de l'intensité au-dessus de la limite nominale d'utilisation. Ce qui se traduit par l'échauffement des conducteurs et contacts. La protection se fait par fusible, Relais à déclencheur thermique de disjonction, SSPC ou RCCB
- Surintensité par court-circuit.

Violente augmentation de l'intensité ($>10 \cdot I_{nominal}$) due à une liaison accidentelle entre 2 potentiels différents (phase / neutre). Cet incident a pour conséquence la création d'échauffements importants, du passage en fusion des conducteurs pouvant provoquer des arcs électriques et des incendies.
La protection est confiée aux fusibles rapides, aux disjoncteurs à déclencheur magnétique ou de façon intelligente SSPC RCCB.

La réactivité de la protection dépend de la robustesse du conducteur face aux surcharges selon l'équation :

$$t_{delay} = \sqrt{k \frac{S}{I_{cc}}} \quad (2.3.)$$

S la section en mm

I_{cc} le courant de court-circuit

Avec la valeur du coefficient $k = 115$ pour les conducteurs cuivre gainés PVC, $k = 135$ gainé caoutchouc ou butyle, $k = 143$ isolé au PR ou à l'éthylène propylène et $k = 74$ pour les câbles en aluminium isolé par du PVC

- Perturbation d'alimentation du récepteur

Définie comme une chute de tension perçue par le récepteur (charge), elle est parfois due à un déséquilibre sur les réseaux AC, mais elle peut également avoir pour origine un défaut électrique série tel qu'un faux contact ou un arc électrique.

Par ces variations de tension anormale, ce type de cas est susceptible de créer différents types de dysfonctionnements du récepteur (perte de puissance, logique de commande hors limites, etc.). De plus, ces variations d'alimentation ne sont pas différenciées par les protections conventionnelles tel un défaut de la source d'alimentation (inoffensif) ou provenant de la ligne d'alimentation (faux contact, échauffement du conducteur, arc → faits dangereux).

La protection contre les défauts de surcharge et surintensité est prise en charge par les disjoncteurs conventionnels. Ils répondent aux courbes de disjonctions classiques : (Figure 2-17)

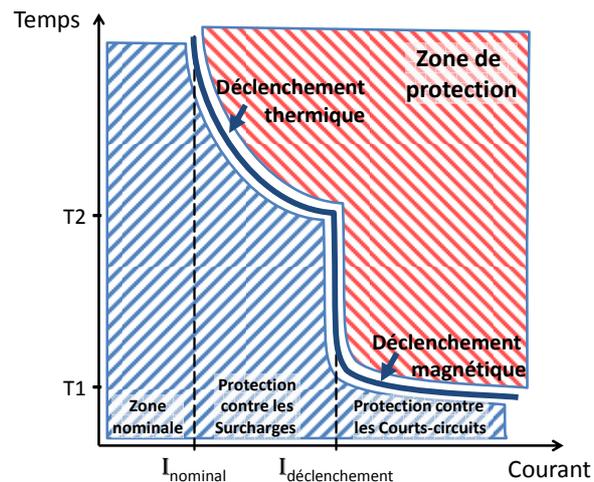


Figure 2-17 : Courbe générique de disjonction pour l'AC

Toutefois, les dispositifs conventionnels ne détectent pas tous les défauts et notamment les défauts d'arcs électriques malgré leur dangerosité. Parmi les défauts électriques d'arcs, on distingue :

- Arc de défaut faible impédance (LIF)

Les anomalies de faible impédance sont associées au court-circuit tant l'augmentation de l'intensité est violente. Il s'agit de la conduction à travers un plasma d'arc entre une phase et un régime de phase, neutre ou terre (ddp élevée). Seules la puissance de la source d'alimentation et les caractéristiques intrinsèques de l'arc (impédance non nulle) limitent l'intensité et la puissance du défaut.

- Arc de défaut haute impédance (HIF)

Il s'agit d'une conduction entre 2 potentiels à travers un système limitant le courant. Lorsqu'il s'agit d'un arc, l'impédance du défaut associé à l'impédance du système en série limite l'emballement thermique de l'arc contrairement aux LIF.

Les anomalies de haute impédance regroupent aussi bien les défauts de faux contacts, fuites à la terre, que les arcs séries.

2.3 Grands principes de détection d'arcs

Les normes dédiées à l'habitat [Iec13, UI06] qualifient l'arc électrique comme une décharge électrique lumineuse ou de conduction "anormale" entre 2 conducteurs isolés. Depuis peu, la norme AS6087 [Assa00] définit les contraintes de détection de défauts sur les réseaux HVDC pour l'aéronautique. Le but d'une détection d'arc est de retirer le défaut avant qu'il n'occasionne une propagation de défaillances.

La littérature présente de nombreuses méthodes dédiées à la détection d'anomalies électriques dans des domaines autres que le réseau HVDC±270V_{DC}. Cette section présente les grands principes de détections de défauts connus. Il est à noter que dans les domaines d'application différents, il est difficile de comparer les méthodes proposées tant leurs modes opératoires diffèrent l'un de l'autre pour la détection de défaut d'arcs. En effet, chaque méthode possède une chaîne de traitement originale (acquisition, étendue de mesure, résolution, fidélité) et procède à un traitement dépendant de leurs capacités de calcul. En raison de leurs diversités et de leurs domaines d'applications spécifiques, leurs performances sont difficiles à juger (rapidité, complexité, etc.).

2.3.1 Classification généraliste

En 2008, Liu [LCLL08] s'est appliqué à démontrer qu'un arc produit des perturbations à travers de multiples domaines physiques. La classification généraliste de ces domaines de propagation d'information et les alternatives de traitement sont détaillées Figure 2-18.

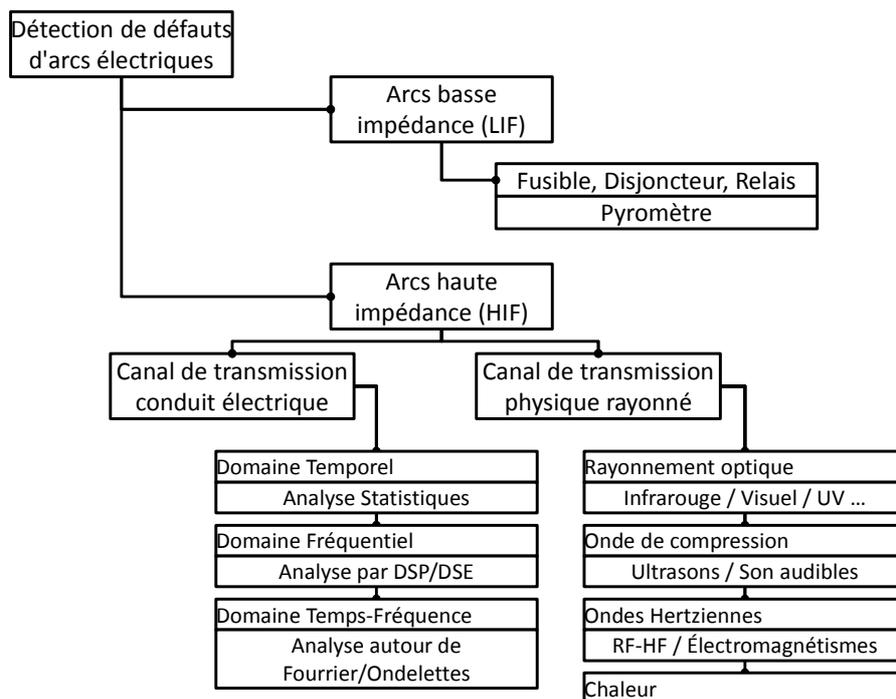


Figure 2-18 : Classification des méthodes et domaines de détections

Selon Lopez et Liu [LCLL08, Lope09], les dispositifs de détection de défaut électrique (AFDD¹) exploitent un ou plusieurs de ces domaines pour le développement des méthodes de protections.

Ils peuvent cependant être catégorisés en 2 types :

- Défaut d'Arc de faible impédance : Caractérisé par une élévation soudaine de l'intensité perceptible par les organes de protection (disjoncteur, fusible, etc.)

¹ AFDD = Arc Fault Detection Device

- Défaut d'Arc de haute impédance : Difficiles à détecter, car ils ne sortent pas des normes d'intensité, ils peuvent être perçus selon deux approches :
 - Méthode physique : Cette méthode s'appuie sur la mesure de données physiques telle que le rayonnement électromagnétique, hertzien, photoélectrique [SiSS02] ou encore les variations de pression du gaz environnant (triangulation audio) [HaLe10].
 - Méthodes électriques : Ce canal de transmission permet l'analyse de la signature du courant et de la tension. On y retrouve 3 familles :
 - Méthodes fréquentielles
 - Méthodes temporelles
 - Méthodes temps-fréquence

Dans le contexte de détection d'arc électrique pour le domaine de l'aéronautique de cette thèse, de nombreuses contraintes d'étude entrent en considérations :

- La pression atmosphérique (de 1100hPa à 200hPa) correspondant à l'altitude,
- La température ambiante (-50°C à +90°C),
- L'espace confiné du fuselage d'un avion, cabine et cockpit,
- Les contraintes de topologies du réseau de distribution d'énergie,
- Risque de perturbations CEM des organes et de diaphonie des lignes,
- Durée et vieillissement des matériaux. s

Dans ces conditions, il est donc préférable de travailler dans le domaine des ondes conduites pour déceler les anomalies. En raison de leur complexité de mise en œuvre dans un environnement aéronautique (bruit, vibration, topologie, injection de signaux proscrit, etc.), les autres supports de transport d'information connus sont écartés de cette étude.

2.3.2 Classification des méthodes d'analyse par conduction électrique

Dans la partie 1.2, il a été vu que les caractéristiques d'établissement d'un arc série ou parallèle sont définies par une série de phénomènes physiques. Elles peuvent varier légèrement en fonction des matériaux mis en jeu (électrodes en défaut) et de l'isolant (à travers lequel se réalise le défaut).

Dans la partie 2.3.4 se situe une revue des moyens proposés par la littérature et/ou présent sur des dispositifs commerciaux en cours d'exploitation pour l'analyse et la détection d'arcs en courant continu.

Pour le courant continu, l'industrie de l'automobile a déjà étudié le vieillissement des faisceaux suite aux vibrations et les défaillances qui en incombent. Ces travaux sont orientés sur les arcs parallèles [GuJD04, LuZa03]. Le domaine photovoltaïque est quant à lui en pleine expansion et nécessite de nouvelles protections. Les panneaux et réseaux de collecte d'énergie sont très vulnérables aux arcs série et parallèle qui s'entretiennent avec l'énergie solaire produite jusqu'à destruction de l'unité de production [JPLP11, Rest07, RSNM08, ScNo09].

En revanche, peu de travaux concernent l'aéronautique. Pourtant la problématique reste vaste.

2.3.2.1 Études temporelles

Dans le domaine temporel les techniques de détection s'appuient sur l'analyse des variations du courant de ligne qui peuvent être dues à :

- un changement de charge ou de caractéristique de la ligne
- une ouverture/fermeture de circuit
- un défaut électrique

L'identification d'un défaut d'arc dans un réseau en fonctionnement consiste à déceler la dérive du signal en dehors d'un gabarit de comportement normal (pentes abruptes, non linéaires, évènements répétitifs et chaotiques, bruits). Cette variation de charge, dans le cas d'un arc, est provoquée par l'ajout d'une impédance d'arc parasite et instable propre à l'arc. Les méthodes de diagnostic de ligne électrique par réflectométrie [FuSD09] se basent sur la variation d'impédance pour caractériser le réseau. Dans le domaine temporel, les méthodes non intrusives, évoquées par la suite et Figure 2-19, se limitent à l'observation et l'analyse des mesures courant/tension de ligne :

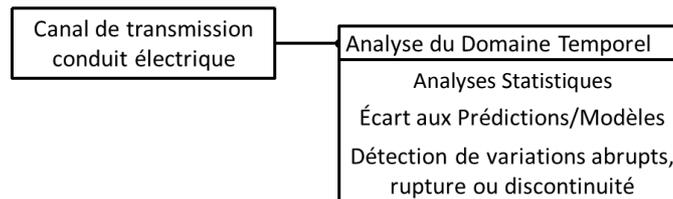


Figure 2-19 : Analyses du domaine temporel non intrusives

Plusieurs approches sont possibles pour déterminer la présence d'arcs de façon non intrusive par l'exploitation des signaux courant/tension de ligne :

- Analyse statistiques :
Consiste à estimer la probabilité qu'une variation ne soit par "normale" et donc un arc
- Prédiction fonctionnelle/dysfonctionnelle :
Anticipe et estime les valeurs nominales que doivent prendre les signaux nominaux continu et transitoire.
- Détection de variations abruptes, ruptures ou discontinuité :
Décèle parmi l'ensemble du signal un évènement pouvant être celui d'un arc. S'en suit l'analyse de l'évènement pour déterminer la nature du signal.

On retrouve également d'autres méthodes élémentaires basées sur la dérivée de la puissance [BaPe06], le différentiel, l'analyse de l'entropie du bruit d'arc [GJSR16], le changement de point de fonctionnement [PaRO11] ou encore la corrélation [RTSL13].

2.3.2.1.1 Écart à la modélisation fonctionnelle

La modélisation d'un phénomène comme les arcs électriques se base sur sa compréhension comportementale. Les modèles d'arcs électriques ont évolués essentiellement sur 3 axes de recherches :

- Les modèles basés sur la physique : [ZiMo09] [KaLi98]
Se fondent sur la description mathématique de processus physiques dans un arc électrique. Ces modèles combinent : équations électromagnétiques, dynamique des fluides et thermodynamiques.
Ils se présentent sous forme de systèmes complexes d'équations différentielles.
- Les modèles de circuits équivalents : [AGSN10] [TeKo04]
Ce modèle est réalisé en décrivant les effets de l'arc sur un circuit électrique. Leurs règles sont souvent déterminées en relation avec les caractéristiques courant-tension de l'arc ou encore par l'impédance apparente dans le système.

- Les modèles heuristiques : [ABZB15] [AnST10] [PBTJ09]
Ces modèles tentent une description générale de l'arc sur la base de données expérimentale combinant parfois des modèles mathématiques macroscopiques ou encore de comportement électrique équivalent (R, L, Diode). Il est fréquent d'y adjoindre des équations d'optimisations qui permettent d'affiner la corrélation avec les observations.

Lorsque la charge est connue, il est aisé de mettre en place une estimation d'écart au comportement fonctionnel selon un modèle. J.Beck [BeNe06] sollicite un modèle d'après les mesures antérieures. Un différentiel entre le signal modélisé (\hat{y}_k) et le signal instantané (y_k) évalue l'écart du signal vis-à-vis du modèle avant de prendre une décision (Figure 2-20).

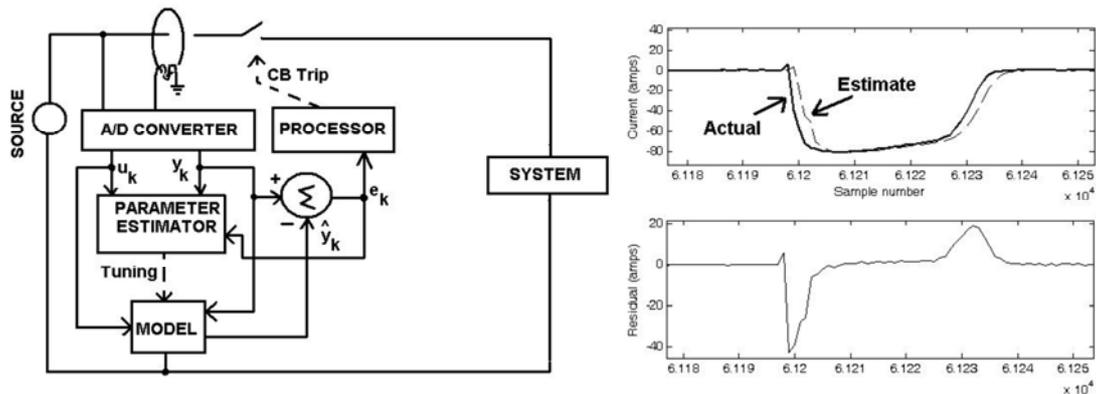


Figure 2-20 : Différentiel d'écart à l'estimation par modèle [BeNe06]

Pour ce qui est des systèmes à temps de transition très lents comme la production d'énergie photovoltaïque, d'autres travaux proposent une modélisation "floue" basée sur l'antériorité du signal [ScNo09]. Ainsi, un système de dynamique lente, voire stable, est admis comme ne pouvant subir de variation très rapide (obstruction progressive du soleil par les nuages, etc.). C'est ainsi que Schimpf propose un algorithme d'estimation prédictive basée sur l'antériorité (filtre passe-bas). Il décide que toutes variations brutales (de durée $<175\mu s$) signifient que la cellule photovoltaïque n'est pas en phase de production normale Figure 2-21.

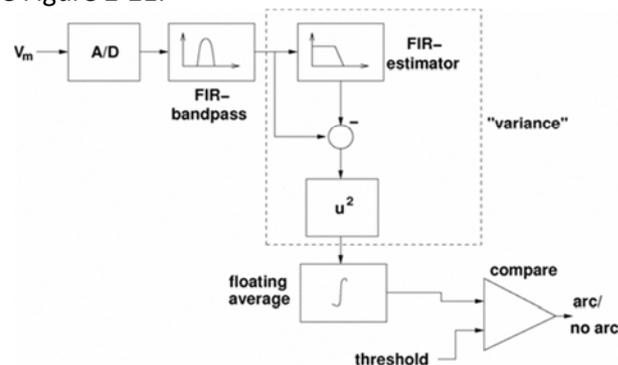


Figure 2-21 : Algorithme prédictif selon la tension produite en PV [ScNo09].

Le travail de Schimpf Figure 2-21 est dédié au contexte expérimental pour la production photovoltaïque ($60V_{dc}$, Charge résistive 10Ω (6A)). Les filtres FIR sont de bande passante PB-10kHz et PBande 1kHz-7.5kHz. Son système propose une réactivité de l'ordre de $175\mu s$. En revanche, par nature cette méthode ne peut subir de variations supérieures à 1kHz (onduleur, etc.) qui seront considérées comme un défaut.

À l'inverse de ces modélisations qui estiment le comportement de la charge, d'autres méthodes se basent sur une modélisation de l'arc qui s'ajoute au système. Yao (Yao2011) estime le comportement d'un arc en utilisant le courant de ligne ou la tension d'arc adjoint à l'équation de Paukert. Elle estime

la tension d'arc sous la forme $V_{arc} = a / I_{arc}^b$ (avec a et b des coefficients expérimentaux). Cette estimation montre une fidélité proche du comportement d'arc au regard du différentiel (signal estimé – signal réel) présenté par l'auteur Figure 2-22.

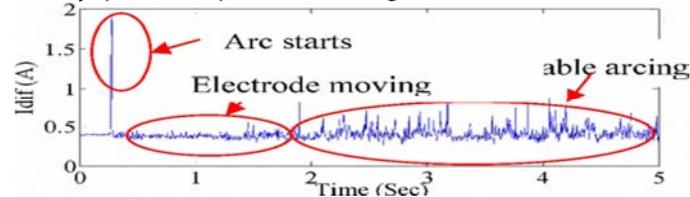


Figure 2-22 : Résultats différentiel Paukert(Iarc)-Iarc selon (Yao2011)

Plus récemment, Mackay [MSRR15] a proposé une méthode basée sur la détection d'amorçage par la chute de tension perçue par la charge d'après une perte en ligne (tension d'arc) prédite. Cette comparaison détecte toutes les variations similaires à celles d'un arc sans distinctions des cas sains.

Ces méthodes basées sur l'antériorité, l'écart au modèle et l'estimation d'impédance d'arc sont la base de cette contribution. Ils se retrouvent dans la partie algorithmique de détection (notamment section 4.1.3).

2.3.2.1.2 Détection de variations abruptes, ruptures ou discontinuité

De nombreux domaines d'applications (finance, audio, vidéo ...) font appel aux algorithmes statistiques permettant de relever tous changements abrupts d'un signal. Parmi ces outils "mathématiques", émergent les travaux de recherche de Michelle Basseville et Nikiforov [BaNi93] visible en partie dans leur ouvrage qui est dédié à la détection de variation abrupte de signal.

Les variations abruptes anormales sont détectées par la méthode de la somme cumulative (CUSUM). Cet algorithme a notamment été dédié à la détection de transitoires dans une séquence. On y trouve de nombreuses applications pour la surveillance de continuité de signal (transmission de données, moteur, bourse, etc.).

L'algorithme CUSUM de base pour la détection de transitoires positifs et négatifs est représenté par l'équation appliquée par Nguyen [Nguy15] :

$$g_k^- = \max \left[0, g_{k-1}^- - \left(y_k - \hat{\theta}_{k-1} \right) - v \right] \quad g_k^+ = \max \left[0, g_{k-1}^+ + \left(y_k - \hat{\theta}_{k-1} \right) - v \right]$$

$$t_a = \min \left[k : \left(g_k^+ \geq h \right) \vee \left(g_k^- \geq h \right) \right] \quad g_{t_a}^+ = g_{t_a}^- = 0 \quad (2.4.)$$

Où θ_{k-1} est la valeur estimée après un filtre passe-bas et y_k est la valeur d'entrée. Le paramètre de dérive v et le seuil h sont des paramètres de conception. Alors que la valeur de seuil h définit la modification minimale des données de séries temporelles que CUSUM peut détecter. La latence du traitement est contrôlée par le paramètre v . Et t_a la date réelle hors latence.

Le second intérêt des travaux de Basseville est mis en œuvre par le travail de Roger Owen Hill section 2.4 [Hill95] qui réalise une détection de défauts en deux temps via la méthode GLR (Generalized Likelihood Ratio).

- Dans un premier temps : le changement de charge est détecté lors de variations abruptes de signal à partir de la vraisemblance selon un calcul établi par une observation à longue durée (relative à la constante de temps du système étudié).
- Dans un second temps : une seconde analyse GLR est réalisée sur un échantillon réduit qui a été sélectionné par la première analyse.

Les résultats de la première analyse GLR sont présentés Figure 2-24. Le résultat de la première équation GLR permet de déterminer une variation de charges par dépassement de seuil. La seconde analyse réalise le rapport de vraisemblance statistique uniquement à partir des valeurs moyennées et cumulées pour limiter les évaluations erronées.

La constante de temps de filtrage des 2 calculs de GLR successifs est adaptée à la plage d'étude de chaque phase (grande pour l'étape de détection de variation ; courte pour l'évaluation du bruit de l'arc).

Ceux-ci permettent de déterminer la célérité du changement de comportement et évaluer la gravité du phénomène observé afin de désigner la présence de défaut électrique.

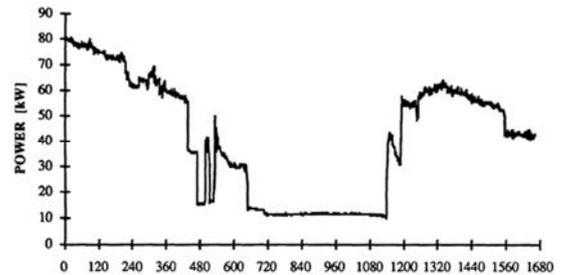


Figure 2-24 : Monitoring de signal (moteur)

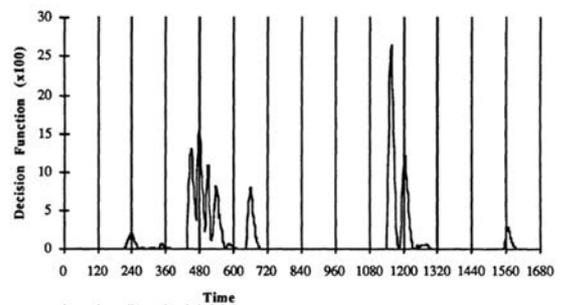


Figure 2-24 : Analyse GLR

La troisième méthode dérivée des travaux de Basseville est étudiée par Nopiah Baharin [NoAl10] qui exploite la méthode RDE (Running Damage Extracting) pour détecter les signes de fatigue et d'usure sur les moteurs électriques.

L'algorithme propose une analyse à long terme le comportement des signaux pour en déterminer la dérive du signal selon l'équation :

$$K = \frac{1}{n(rms)^4} \sum_{i=1}^n (X_j - \bar{X})^4 \quad (2.5.)$$

|| Tiré des coefficients de Kurtosis avec n le nombre d'échantillons, X_j la valeur de l'échantillon.

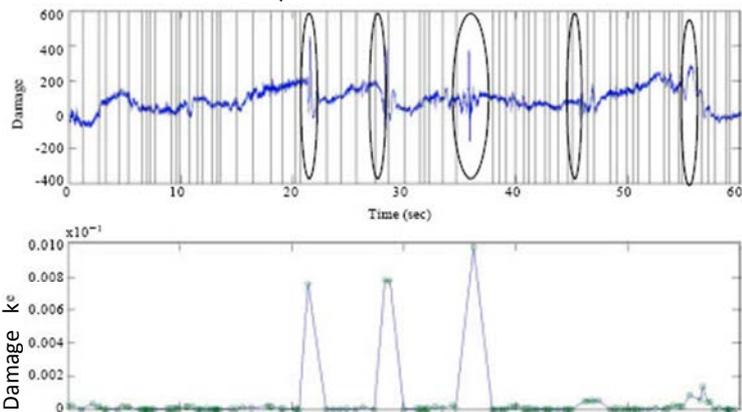


Figure 2-25 : (bas) Résultat par RDE / (haut) signal d'acquisition présentant des variations abruptes.

|| La Figure 2-25 reflète le traitement par RDE d'un signal acquis sur moteur continu à Fe=500Hz

2.3.2.2 Analyses fréquentielles

Les perturbations fréquentielles produites par les arcs électriques sont largement exploitées et analysées comme en témoignent les travaux suivants : [SKLL15] [CCXW09] [YHHW12] [WMBJ14] [UGHE12] [WeWB14] [JPLP11](...)

La détection de défaut d'arc est réalisée par l'analyse fréquentielle du courant de ligne dans plusieurs bandes de fréquences plus ou moins larges. Ainsi :

- Meng Xie [MXYW14] a retenu la plage [10Hz, 10kHz] pour des charges inductives,
- Seo [SKLL15] a retenu la plage [20kHz, 120kHz] en utilisant des charges d'usage plutôt numérique (LED light, TV et PC).
- Wang [WMBJ14] dans le photovoltaïque, adopte la bande [1 – 100 kHz] avec [StMe10] et [RTSL13]
- alors que Gao [GZLS14] reste en basse fréquence dans la plage [0.1-4 kHz].
- Le dispositif d'expérimentation proposé par Texas instrument [Ti:i12] quant à lui exploite la bande [40 kHz, 100 kHz].

▪ Dépendance environnementale de l'analyse spectrale

Toutes ces signatures fréquentielles d'arc série sont dépendantes des charges utilisées, de la configuration du circuit électrique et des conditions de mesures (caractéristiques de la sonde de mesure et fréquence d'échantillonnage). Dans de nombreux travaux, il apparait que la détection est particulièrement délicate à mettre en œuvre. En effet, pour des charges à commutation (onduleur, pwm, convertisseur), le spectre se rapproche de celui d'un arc électrique (Figure 2-27) alors que pour les défauts sur charges selfiques, le spectre s'atténue à travers les inductances.

Séo [SKLL15] expliquent que l'arc se confond facilement avec d'autres charges dans la bande [20kHz-120kHz] (Figure 2-27). Alors que les travaux de Yao [YHHW12] (Figure 2-26), sur une bande [10-100kHz], montrent que la caractéristique fréquentielle d'un arc dépend également de sa puissance

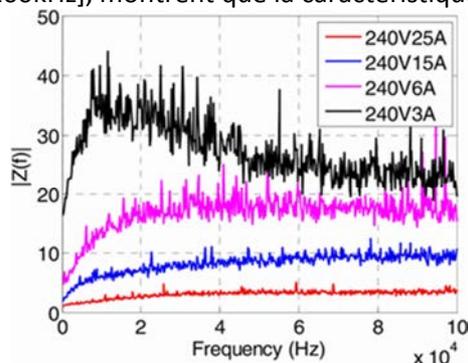


Figure 2-26 : DSP d'impédance d'arc 240Vdc, charge variable [YHHW12]

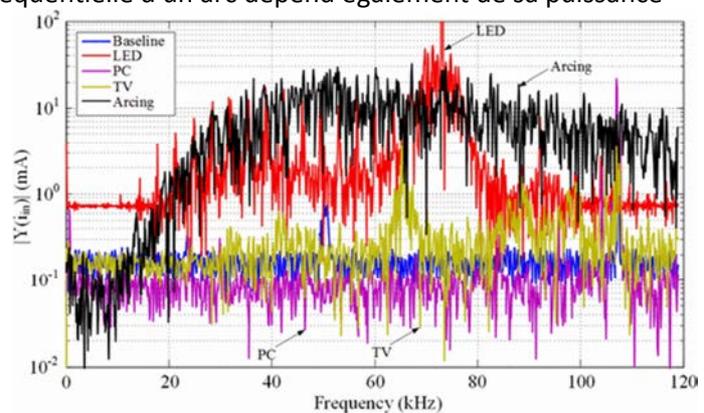


Figure 2-27 : Spectrogramme de charge [SKLL15] sonde BP:10kHz-100kHz

Ces constatations se complètent avec Wendl [WeWB14] qui différencie les différentes phases de l'arc avec la longueur du gap^2 . Ces observations expliquent qu'à faible intensité (Figure 2-28) l'arc présente une forte hétérogénéité du spectre alors qu'il se stabilise au-delà de 10A. Il en est de même pour l'éloignement des électrodes (Figure 2-29) qui harmonise le comportement des arcs après 2mm d'écart ($PSD(f)$ similaire de 2 à 4mm).

² Gap : Espace de séparation entre les électrodes

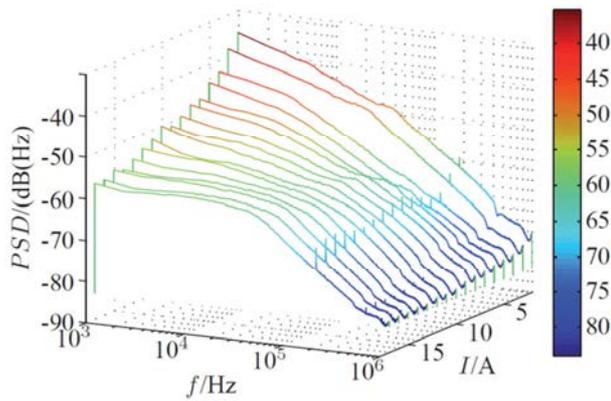


Figure 2-28 : DSP d'arc en fonction de l'arc [WeWB14]

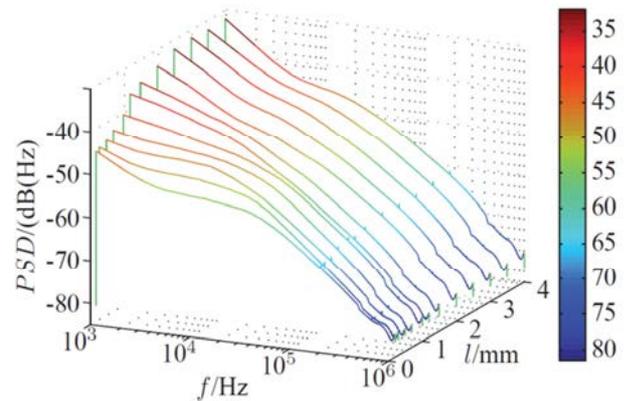


Figure 2-29 : DSP d'arc en fonction de Lgap 22 Ω, 6A, tension variable [WeWB14]

▪ **Détection d'arc par densité spectrale de puissance (DSP) en bandes de fréquences :**

Dans le domaine fréquentiel, les algorithmes de détection de défaut d'arc travaillent sur la densité spectrale de puissance (DSP). Wendl et Weiss [WeWB14], proposent un algorithme basé sur une transformée de Fourier fenêtrée (méthode de Bartlett). Pour chaque fenêtre temporelle de 33ms trois DSP sont calculées sur les plages fréquentielles [1kHz-10kHz] [40kHz-400kHz]. Et Seo [SKLL15] suggère une approche similaire sur la bande [20kHz-40kHz-60kHz-80kHz-100kHz-120kHz] afin de limiter la pondération du domaine spectral des charges et sources (à découpage présentées Figure 2-27) comme le montre les résultats des 5 bandes pour différentes alimentations (GIU³) Figure 2-30.

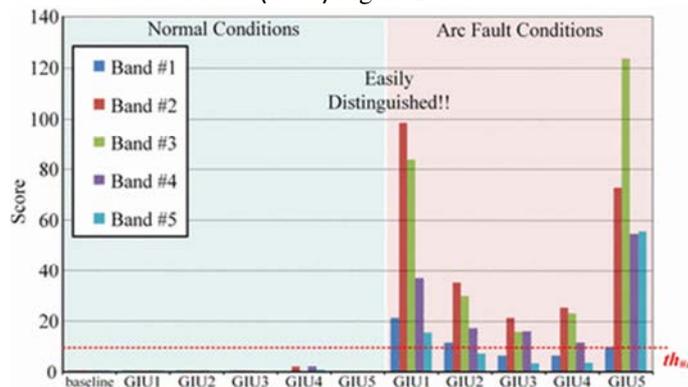


Figure 2-30 : Résultat d'analyse fréquentielle multi-bande avec 5 sources d'alimentation (Seo2015)

Lorsque le spectre haute fréquence n'est pas altéré par le système (filtrage par inductance), certains travaux exploitent les composantes spectrales produites par l'arc en hautes fréquences de l'ordre de 15MHz comme l'a fait Restrepo [Rest07, RSNM08] dans le domaine AC.

³ GIU : "Unité d'interface réseau" correspondant à un AC/DC selon la terminologie de l'auteur cité en 2.1.3 page 50

2.3.2.3 Analyse temps-fréquence

Les bruits importants produits par l'arc sont mis en évidence par [ScNo09] [PHKB04] (*Johnson et al. 2011*) [KePa99]. Ces variations dans le temps sont liées à :

- La thermodynamique lente des électrodes [WeWB14]
- Les phénomènes chimiques d'oxydation des électrodes et de chauffe des gaines isolantes [AJHF14]
- L'asservissement des organes présents sur le réseau (charges, alimentations, convertisseurs) à la recherche du meilleur point de fonctionnement (MPPT) [JPLP11] [YHHW12] [YCLW15]

L'analyse temps fréquence de ces phénomènes instables caractéristiques de l'arc est couramment réalisée par la transformée en ondelette ou par la transformée de fourrier à court terme.

▪ Temps-Fréquence à base d'ondelette

L'utilisation des transformées en ondelettes est couramment citée pour la détection des signaux d'arc non stationnaire. Sous sa forme discrète (DWT), elle est similaire à la DFT qui, elle, décompose les signaux en cosinus/sinus. La DWT effectue une décomposition selon les ondelettes mères Ψ (Harr, Meyer, Daubechies, Coiflet and Symlet [Mall99]). De nombreux travaux utilisent une ondelette mère de type Coiflet [GWWJ09] ou encore Daubechies [YHJZ14] [YaHW15] [GCDT14] [WaBa15] (...) en raison de ses performances particulièrement adaptées à l'analyse des arcs électriques. La décomposition s'effectue selon une arborescence Figure 2-31 où l'ondelette mère-fille est soumise au signal de façon incrémentale de rang n .

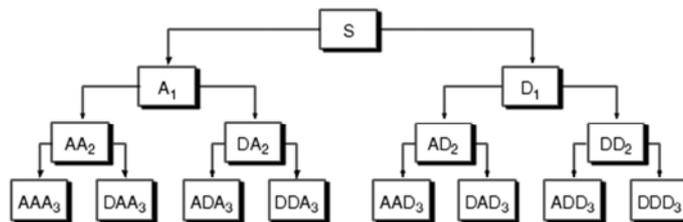


Figure 2-31 : Arborescence des ondelettes. S onde initiale

Dans leurs travaux, Yao [YHHW12] sur charges R et Gi-Hyeon [GCDT14] sur convertisseur DC/AC pour le PV, calculent la valeur RMS du signal obtenu en se basant sur une ondelette Daubechies de rang DB3.1 et DB3.4 (soit une bande de fréquence de [6.25-12.5kHz] Figure 2-32 et [25-31.25kHz] Figure 2-33). Ces valeurs sont alors soumises à seuillage selon des algorithmes (déterministe ou flou) dédiés à chaque application pour déterminer s'il s'agit d'arc, de transitoire ou de perturbations lors de commutation de charges. Sur les traces de Yao, soumises aux ondelettes DB3.1 et DB3.4, on constate Figure 2-32 et Figure 2-33 une augmentation significative de la valeur RMS (proche de 0,01) pendant les perturbations fréquentielles. Cette augmentation est exploitée pour la détection de défauts.

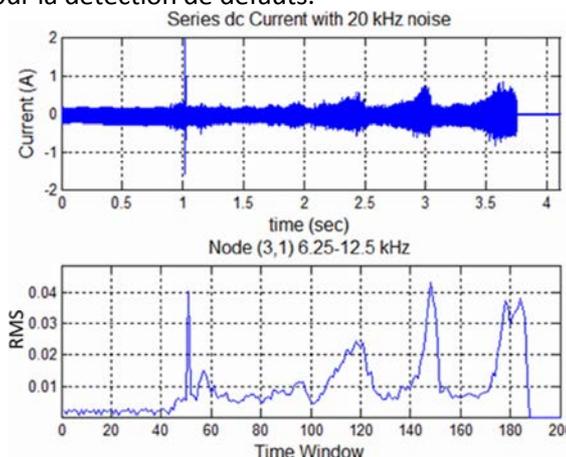


Figure 2-32 : Courant analysé et résultat moyen d'ondelette de type DB3.1; bandes de fréquence 6.25-12.5kHz (Yao 2012)

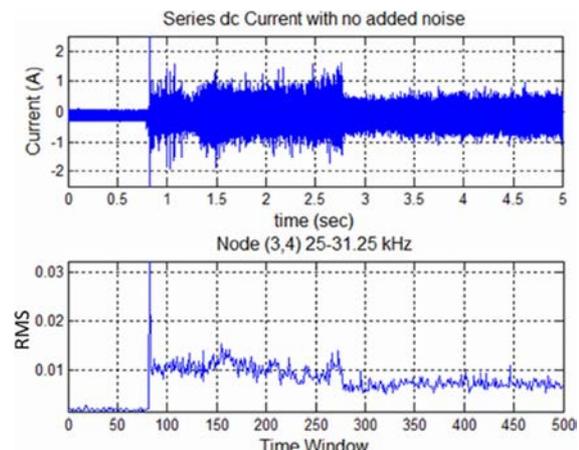


Figure 2-33 : Courant analysé et résultat moyen d'ondelette de type DB3.4 bandes de fréquence 25-31.25kHz (Yao 2012)

Une autre méthode consiste à observer l'évolution dans le temps du rapport d'énergie calculé suivant :

$$\alpha = \frac{E}{E(0)} = \frac{E(1)+E(2)+E(3)}{E(0)} \quad (2.6.)$$

$$\text{Où } E(i) = \sum |x_i(n)|^2$$

avec i de rand 0,1,2,3

Yunmei [GWJ09] (avec Coiffard6) et Yao [YHJ14] proposent une détection basée sur le calcul du coefficient α pour la détection des variations des ondelettes fille par rapport à l'ondelette mère. Ainsi, l'instabilité des arcs est mise en lumière par la récurrence des perturbations dans le temps tel qu'illustré Figure 2-34.

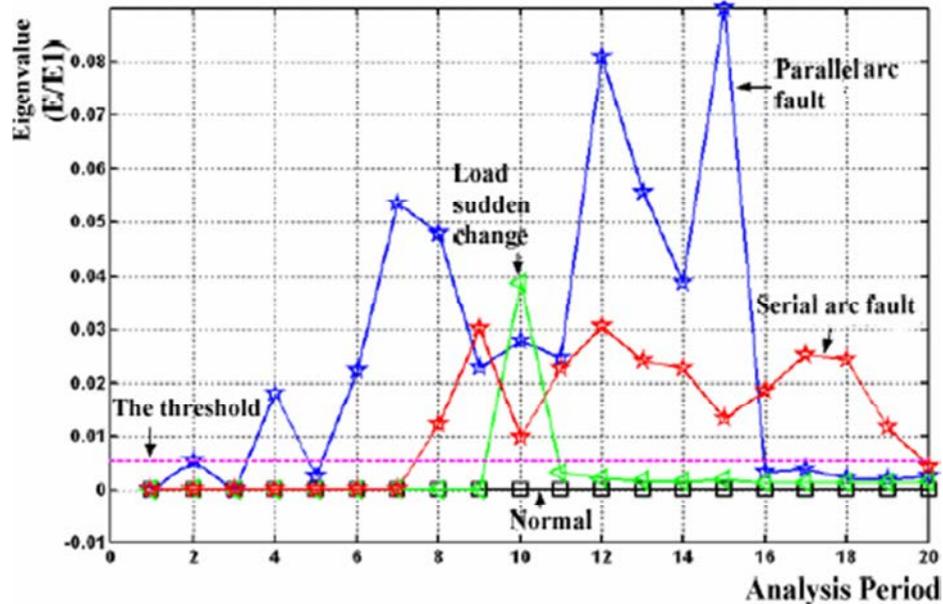


Figure 2-34 : Variabilité de signaux obtenus par ondelette
Sans arc, avec variation de charge, avec arc sériel, avec arc parallèle

Figure 2-34 : Sans anomalie le coefficient est constant et faible. Une variation de charge provoque l'apparition de pic lié à la transition de charge. En revanche, sur des arcs sériels et parallèles, le coefficient de variabilité augmente et passe au-dessus du seuil de détection.

▪ Temps-Fréquence à base de transformée de Fourier

L'utilisation de transformées de Fourier est peu exploitée en temps réel pour l'analyse de contenu fréquentiel d'arc électrique. Un des premiers algorithmes de détection de ce type a été proposé par Leprettre [LeRe01] qui propose alors une analyse morphologique du spectrogramme appliqué aux réseaux alternatifs. Depuis, la puissance de calcul a augmenté et le spectrogramme obtenu par STFT est devenu un outil de visualisation très prisé pour l'observation et la caractérisation d'arcs. Hong et Johnson [CCXW09] [JoAr14] présentent le spectrogramme temporel des signatures d'arcs par ce biais.

La STFT s'obtient par DFT fenêtrée glissante dans le temps dont les fenêtres peuvent se superposer (méthode de Welch) sous la forme :

$$X(n, k) = \sum_{m=0}^{N-1} x[m+n] \cdot w[n] \cdot \exp(-\frac{j2\pi kn}{N}) \quad (2.7.)$$

Où :

m est utilisée pour représenter la taille de la fenêtre $w[m]$

n et k sont les index de temps/fréquence

La résolution de la STFT dépend du type de fenêtre, la longueur du segment, et le taux de recouvrement des signaux

Johnson pour le laboratoire SANDIA [JoAr14] a tracé le spectrogramme des courants obtenus lors de l'apparition d'un arc sur un réseau dédié au photovoltaïque très basse tension avec des arcs de 100W à 300W (Figure 2-35).

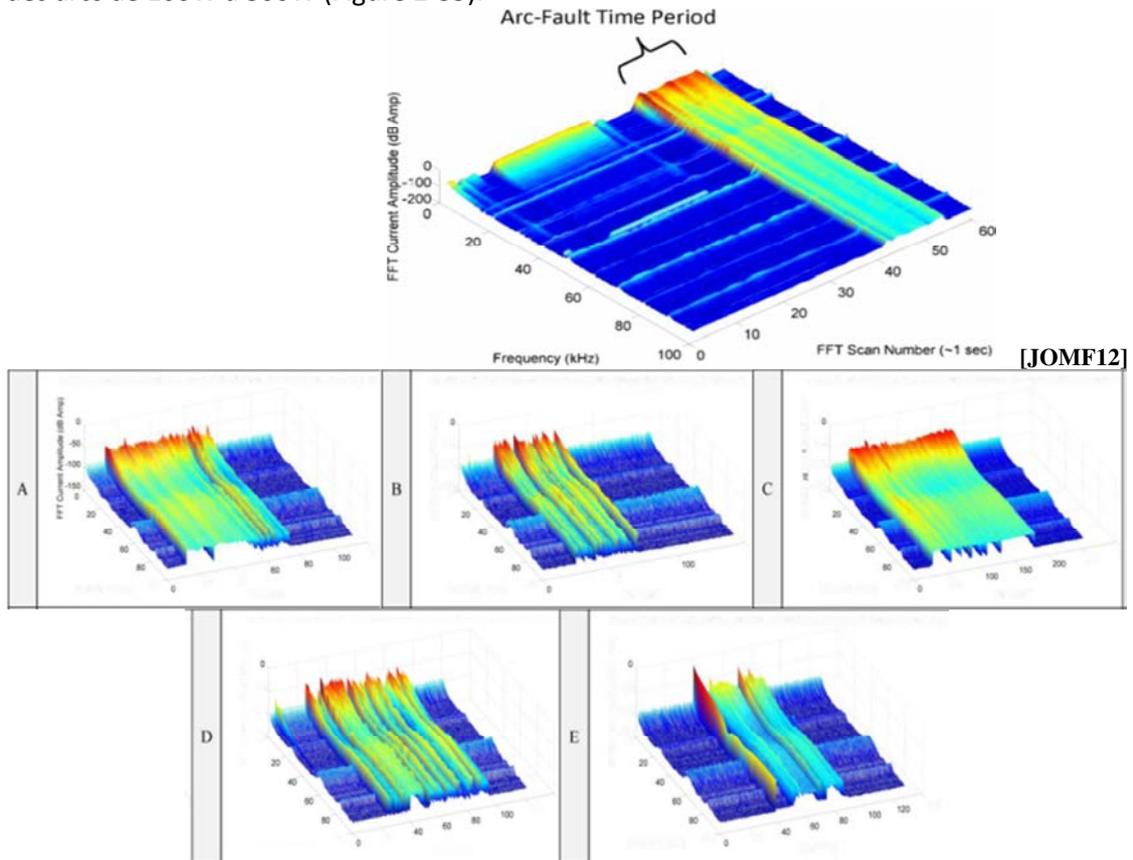


Figure 2-35 : analyse temps/fréquence à 0.28ms/DFT. Signal 5MHz, DFT 65.5ks (Johnson et Armijo 2014)

Figure 2-35, on constate l'étalement fréquentiel de l'arc visible dans la durée de l'enregistrement. On remarque alors que l'arc électrique possède un encombrement spectral large et légèrement oscillant dans le temps. Cette représentation illustre une DFT de 13ms répétée toute les 280 μ s.

Les études et surtout les observations temps fréquences présentes dans la littérature démontrent la forte étendue spectrale des perturbations de ligne produit par les arcs électriques. Tantôt ces données sont utilisées pour l'analyse du comportement d'arc tel que le présentent les membres du laboratoire Sandia qui analyse l'influence de l'environnement sur l'arc (notamment la chimie des gaines lors de la combustion). Tantôt elles sont utilisées pour la détection de défaut. La transformée en ondelette est privilégiée pour l'observation et la détection de bruits liés à la présence d'une signature d'arc électrique sur une bande de fréquence spécifique.

2.3.3 Principe de la méthode combinée multicritères

Le principe du multicritère est récurrent dans la littérature. Il consiste à combiner plusieurs détections de domaines différents (temporel/fréquentiel/conduit/rayonné/etc.) pour augmenter la fiabilité des détections.

Ces algorithmes se combinent :

- par la forme d'un arbitrage logique en tout ou rien :
C'est le cas de Yang Gao [GZLS14] qui applique une logique combinatoire à l'issue de 4 critères avec un seuil TOR. Dans son étude, Amaury Augeard [ASDA15] propose une application dédiée à la protection des batteries. Il y combine 11 critères (fréquentiel, dérivée, ondelette, etc. en courant/tension) à travers une somme de tous les résultats (11 parmi 11 $\binom{11}{11}$) et réalise ainsi un *ET* logique sur l'intégralité.

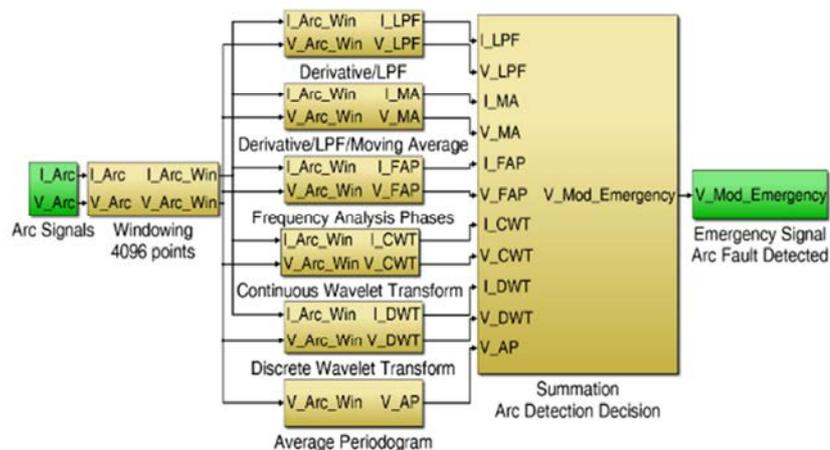


Figure 2-36 : Partie Décision par sommation 11 parmi 11 [ASDA15]

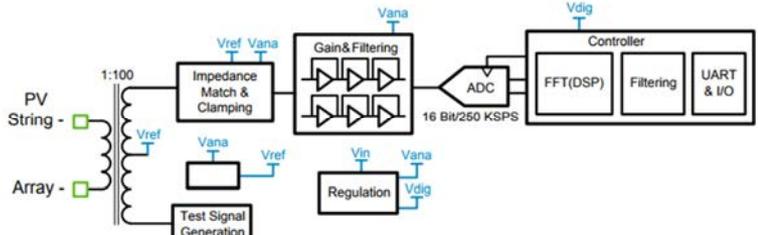
- par la forme d'un arbitrage par coefficients de probabilité ou discrimination par apprentissage à l'aide d'un réseau de neurones :
Les réseaux de neurones sont rependus dans les publications universitaires pour la détection de défaut électrique. Parmi d'autres, les travaux de Haoying Gu [GZWN12] se démarque par une discrimination de défaut suite à un entraînement supervisé. Il s'appuie sur les données d'une analyse en ondelette de 8 charges différentes afin de définir un seuil déterministe.

L'association de plusieurs critères est choisie notamment pour l'amélioration des performances de détection en combinant des méthodes complémentaires. Cette complémentarité est d'autant plus efficace qu'elle associe des informations de domaines différents : Courant de ligne, Tension, Phase, rayonnement HF, etc.

En contrepartie, cette logique de décision complexe précédée d'une multitude de calculs pour chaque critère ajoute de la difficulté à l'implémentation du dispositif de détection en embarqué.

2.3.4 Dispositifs de détection sur courant continu

Le domaine du photovoltaïque est précurseur dans la protection électrique contre les défauts d'arcs électriques sur courant continu DC. De nombreux dispositifs de détection de défaut d'arc (AFDD/AFCI) sont apparus sur le marché. Mais les applications dédiées à l'aéronautique en courant continu restent marginales. Voici quelques exemples dans le domaine photovoltaïque :

	<p>Texas Instrument RD-195 (2013) La plateforme d'évaluation proposée par TI permet d'intégrer les algorithmes de détection d'arc comme mentionné par la note d'application AN-2154. Ce dispositif mesure jusqu'à 15A et sa structure permet la reconfiguration avec de nouvelles données.</p> 
	<p>SANSANA PVA-F-R et PVA-F-T series Parmi les premiers articles du commerce répondant aux normes Nationales Electric Code (NEC 2011 Article 690.11). 4 canaux jusqu'à 15/20A 1kV_{DC max} Certifications: UL 1699B (type 1) recognition, UL 1998</p>
	<p>SANTON (2012) Détecteur grand public pour le PV 1000V_{DC} de 1A à 40A Certification UL1699B - PV AFD Type 1</p>
	<p>SMA Le groupe SMA propose d'intégrer la détection dans ses convertisseurs d'énergie PV. 1699B, 2011 NEC Section 690.11. Détection d'arcs supérieurs à 300 W et interruption en moins de 2s</p>
	<p>E-T-A USA Dédié aux réseaux photovoltaïques</p>

2.4 Conclusion

Alors que le photovoltaïque regorge d'informations sur les arcs électriques et notamment série, le domaine des protections électriques pour l'aéronautique est encore pauvre en documentations dédiées.

Ce chapitre a présenté une synthèse des problématiques et des contraintes liées à la détection de défauts d'arcs électriques pour un système d'énergie HVDC 270V_{DC} pour l'aéronautique.

Le balayage des principes de détection proposés par les milieux analogues tels que l'automobile, le photovoltaïque et parfois la distribution d'énergie pour le domestique 220/110V_{AC} a permis de faire ressortir les éléments suivant :

- La mesure de la signature d'un arc est fortement dépendante de son environnement : La puissance de la décharge influence le comportement tout comme ses caractéristiques physiques (écartement des électrodes, etc.).
- Les perturbations du signal électrique augmentent significativement en présence d'arc. De nombreuses méthodes exploitent ce 'bruit' pour la détection.
- Dans le cas de charges à découpage, les perturbations spectrales de l'arc s'ajoutent au spectre initial et lorsque le défaut est en amont des convertisseurs, leur comportement s'adapte aux variations électriques (suivit de l'asservissement).

L'analyse de l'ensemble de ces observations est abordée dans le chapitre suivant pour l'élaboration d'une méthode de détection multicritères pour la détection de présence d'un défaut d'arc série sur la ligne électrique.

Aux vues de l'ensemble de ces remarques, nous décidons que la suite de nos analyses porte sur :

- L'analyse temporelle du bruit produit par l'amorçage et l'apparition d'un arc électrique.
- L'analyse fréquentielle du signal et de l'étalement spectral du bruit produit par l'arc.

Dans un premier temps, un banc expérimental a été développé d'après les contraintes environnementales décrites par les travaux antérieurs selon les contraintes spécifiques à notre étude conduisant à la création d'une base de données de signature courant/tension d'une ligne avec et sans défaut.

Chapitre 3 :

BANC EXPÉRIMENTAL ET BASE DE DONNÉES

- 3.1 ASPECT NORMATIF
 - 3.1.1 DÉFAUTS ÉLECTRIQUES RECONSTITUÉS EN LABORATOIRE
- 3.2 BANC DE MESURE
 - 3.2.1 CONSTITUTION ET APPAREILLAGES DU BANC DE MESURE
 - 3.2.2 ARCS
 - 3.2.3 CONFIGURATION GÉNÉRALE
- 3.3 BASE DE DONNÉES DE SIGNAUX EXPÉRIMENTAUX
 - 3.3.1 SÉRIE DE DONNÉES DE TEST

3 Banc expérimental et base de données

Cette partie décrit le cadre normatif dans lequel s'inscrivent les travaux de recherche ainsi que le banc d'expérimentation qui a permis d'analyser, développer et tester les algorithmes de détection. Notre système de détection étant basé sur l'analyse du courant de ligne, nous avons créé une base de signaux dans des conditions diverses afin de pouvoir tester nos algorithmes de détection selon une méthode d'évaluations des performances spécifiée en 3.4.

3.1 Aspect normatif

Pour reproduire et vérifier le bon fonctionnement des dispositifs de détection de défaut électrique, les normes existantes en AC et DC proposent plusieurs modes opératoires repris dans cette thèse :

- Dans le domaine domestique (AC) les normes UL1699 section 42.2 et IEC62606 section 9.9.4 s'accordent pour définir plusieurs configurations de test d'arc série à base de charges prédéfinies simples (Figure 3-1), multiples (Figure 3-3), et de masquages (Figure 3-2).
- Le domaine photovoltaïque (DC), la norme UL1699 section 29.2 & 29.3 définit des configurations à base de convertisseurs DC/AC et de multiples générateurs.
- Le domaine aéronautique pour le continu propose également à travers la norme AS6087 section 4.7.7 de tester l'immunité des dispositifs au voisinage et s'assure du non-déclenchement lors de défauts présents sur une ligne proche (couplage par diaphonie).

Les configurations proposées se présentent comme suit :

- Charge simple : (Figure 3-1)
Une seule charge est mise en série avec le défaut.

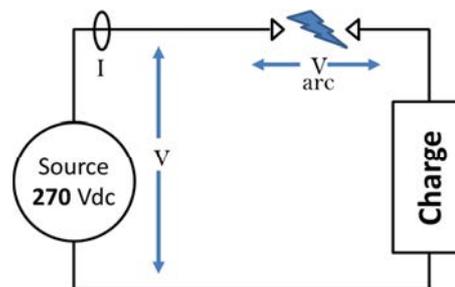


Figure 3-1 : Charge simple

TEST1 en régime établi (décrit par IEC62606 appliqué en AC)

TEST2 en régime transitoire (décrit par IEC62606 appliqué en AC)

- Charges de masquage : (Figure 3-2)

Un réseau complexe est souvent peuplé de plusieurs organes électriques. Une anomalie d'arc série peut apparaître suite à une épissure sur l'une des branches du réseau. Ce test permet d'évaluer la sensibilité d'un appareil à réagir dans le cas de figure où une seule charge est victime d'arc (masquage de l'impact de l'arc sur la signature électrique).

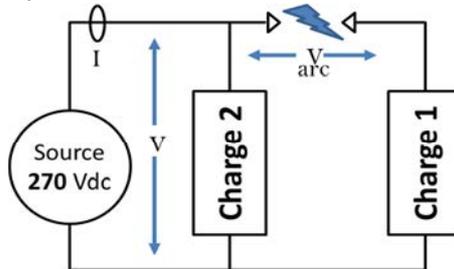


Figure 3-2 : Charge de masquage

TEST3 où charge 1 est une charge constante résistive et charge 2 est une charge spécifique à tester (décrit par IEC62606 appliqué en AC)

TEST4 où charge 2 est une charge constante résistive et charge 1 est une charge spécifique à tester (décrit par IEC62606 appliqué en AC)

- Charges multiples : (Figure 3-3)

Le défaut peut se situer sur la ligne d'alimentation de l'ensemble des charges à tester.

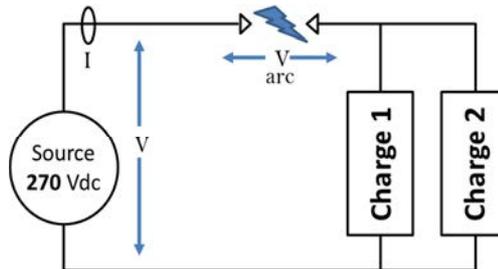


Figure 3-3 : Charge multiple

Sous la référence TEST5 (décrit par IEC62606 appliqué en AC)

Un défaut peut être présent à la mise sous tension, lors de la chauffe, en transitoire, ou encore de façon inattendue en fonctionnement nominal.

Les différentes techniques d'amorçage d'arc série exploitée pour tester ces configurations sont évoquées en section 3.3.2 de ce chapitre.

3.1.1 Défauts électriques reconstitués en laboratoire

La reconstitution des défauts d'arcs en laboratoire qui reproduisent des conditions réelles est essentielle pour l'observation et le développement d'algorithmes de détection.

La littérature et les normes évoquent plusieurs modes d'amorçage de l'arc en conditions contrôlées :

- Par chemin carboné
- Par surtension
- Par écartement
- Par embrasement inter électrode
- Par sectionnement
- Par contact d'un fluide ionisant

Cette section est consacrée à la description de ces méthodes :

➤ Embrasement inter électrode

La norme UL1699b définit le protocole de création d'arcs à l'aide d'électrodes 6mm possédant un écartement calibré et mis en contact à travers de fines particules conductrices telles que de la laine de fer (Figure 3-4) qui se vaporise lors du passage d'un courant.

Cependant, cette méthode ne produit pas toujours des arcs reproductibles. Les travaux réalisés par SANDIA [AJHF14, JoAr14] montrent une inhomogénéité des résultats en fonction de la composition chimique de la gaine, ainsi que du taux d'oxygénation de la décharge d'arc.



Figure 3-4 : Pont par laine de fer (UL1699b)

➤ Écartement

La norme IEC62606 (paragraphe 9.9.2) évoque les tests à l'ouverture par l'écartement d'électrodes conductrices (Figure 3-5). La répétitivité de cette méthode est fortement dépendante de la température des électrodes tel que démontré section 1.2 (Influence des conditions environnementales d'expérimentations sur l'arc) ainsi que par Wendl [WeWB14] en fonction de l'intensité.

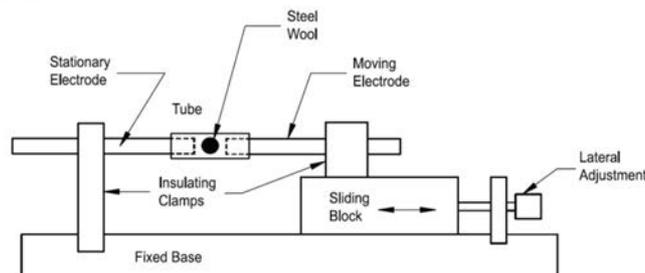


Figure 3-5 : Dispositif d'écartement (UL1699b)

➤ Surtension

Le dispositif GDARC (Générateur de Défaut d'Arc Reproductible et calibré) développé en 2010 au sein du laboratoire MAE406 de l'IJL (Institut Jean Lamour) par J.Andrea [ASTR10] permet de générer des impulsions haute tension qui ionisent l'espace inter-électrode isolant par surtension.

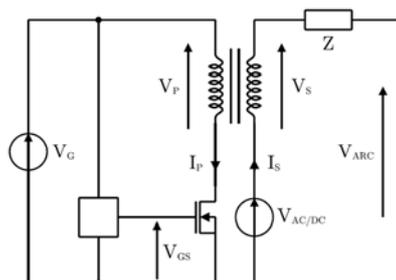


Figure 3-6 : Schéma du GDARC (Andrea2010)

Le GDARC est constitué d'un transformateur BT/HT qui multiplie au secondaire l'impulsion subie par le primaire par la fermeture brève du MOSFET de contrôle. D'une impulsion 60V_{DC} au primaire résulte 14kV. Par sa faible impédance de bobinage secondaire, le GDARC se place en série avec l'alimentation (AC ou DC), la charge (Z) et les électrodes (gap Varc). En AC, le déclenchement de l'impulsion HT peut être synchronisé en phase avec l'alimentation.

➤ Chemin carboné

La norme UL1699 propose des tests d'arc à travers les chemins carbonés. Ceux-ci sont créés par une carbonisation de l'espace isolant à l'aide d'une source haute tension. Ces tests correspondent à un contact vieillissant, oxydé ou accidentel.

L'échantillon de câble dégradé (Figure 3-7) est fabriqué par 2 conducteurs dont la gaine est striée avant de subir un stress par surtension. Après carbonisation, l'échantillon est alors prêt à être testé comme un défaut de conducteur (Figure 3-8).

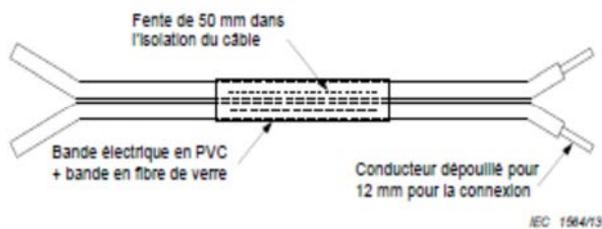


Figure 3-7 : positionnement des câbles striés pour la carbonisation et arc (UL1699)

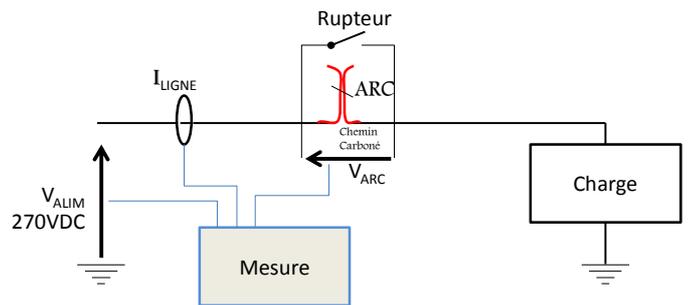


Figure 3-8 : Circuit fermé avec chemin carboné

➤ Connexions intermittentes : Test par vibration

La reconstitution de perte de contact par "faux contact" et vibration est reproduite par un ploc vibrant à l'aide d'un fil rigide dont la cosse est suspendue à un goujon. L'aspect mécanique (Figure 3-9) et le profil de vibration (Figure 3-10) du faux contact sont proposés par la norme AS6087.

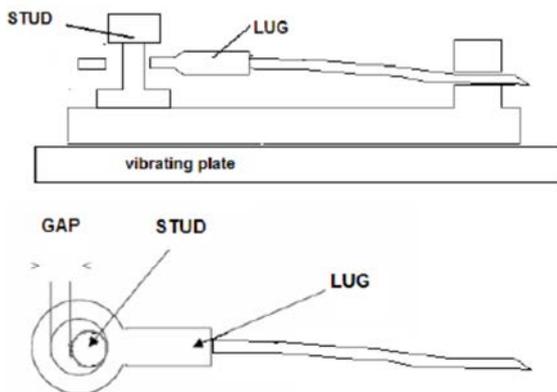


Figure 3-9 : Documentation technique du pont vibrant (AS6087)

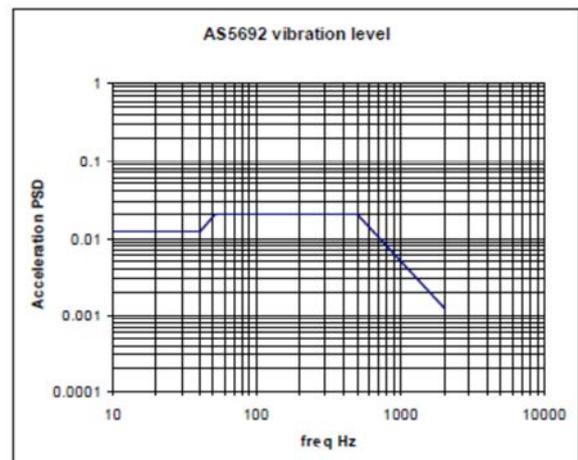
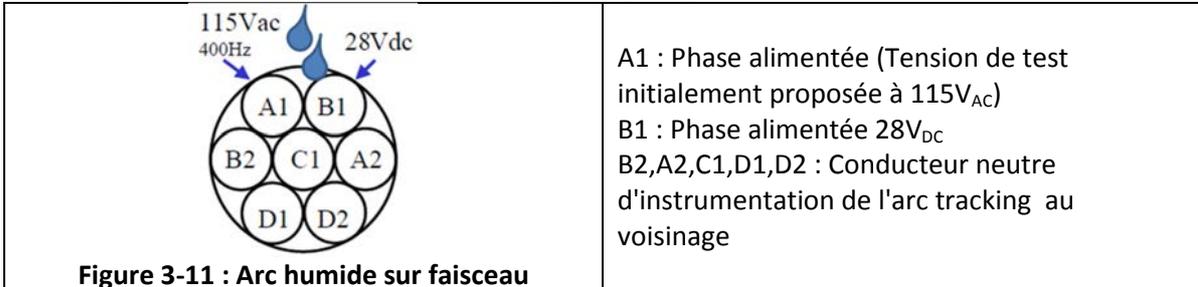


Figure 3-10 : Profil d'accélération/fréquence recommandé (AS6087)

➤ Arc humide

Les recommandations de AS6087 évoquent la création d'arcs dans un faisceau de câbles (nommé berceau dans l'aéronautique).

Cet arc est réalisé par l'intrusion d'une solution ionisée (saline) au goutte à goutte sur le faisceau meurtri par des fentes décalées selon la morphologie Figure 3-11:



➤ Arc parallèle par sectionnement : Guillotine

Le dernier mode de création d'arcs est le test de la guillotine qui consiste à couper une paire de câbles à l'aide d'une lame. Cette méthode est dédiée aux arcs parallèles de forte puissance (faible impédance).

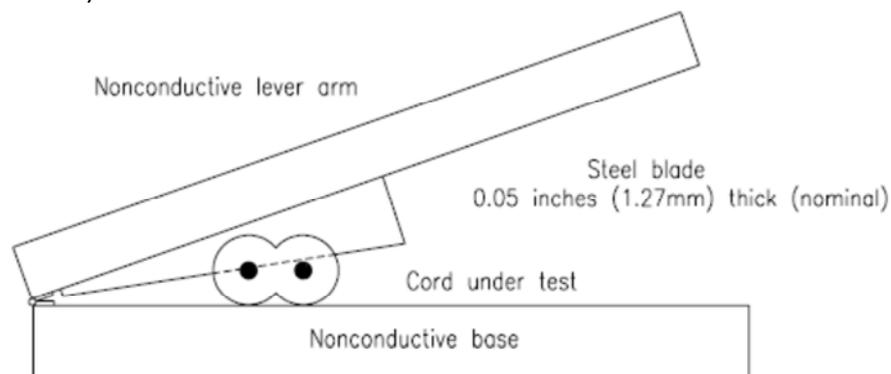


Figure 3-12 : Guillotine de sectionnement (AS6087)

La singularité des signatures d'arcs est aussi nombreuse qu'il y a d'arcs. À cette diversité de situation s'ajoutent pour ces travaux les contraintes aéronautiques : réseau complexe, diversité des charges, complexité des charges, conditions environnementales.

3.2 Banc de mesure

Le banc expérimental développé au sein de l'équipe 406 de l'IJL permet de :

- Faire varier les charges testées
- Générer des défauts d'arcs électriques à l'intérieur d'une enceinte climatique (pression atmosphérique/température)
- Mesurer les données de courant, tension de ligne et tension aux bornes de l'arc
- Tester les méthodes de détection en temps réel et avec un prototype de détection.

3.2.1 Constitution et appareillages du banc de mesure

Les arcs étudiés sont mis en série entre l'alimentation et la charge Figure 3-13.

L'enceinte climatique (Figure 3-14) est associée à une pompe à vide pour simuler la perte de pression due à l'altitude. Un chauffage soufflant permet d'augmenter la température à l'intérieur du confinement.

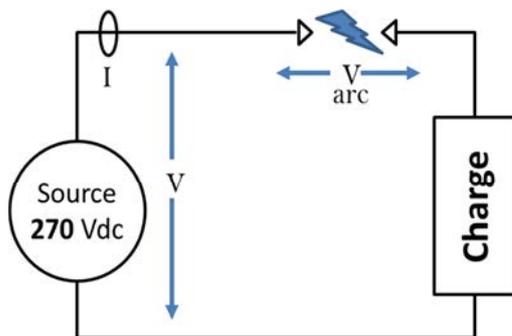


Figure 3-13 : Schéma de base

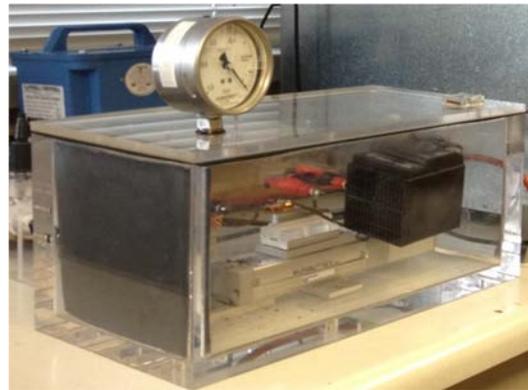


Figure 3-14 : Enceinte climatique

Les mesures sont réalisées par un oscilloscope LECROY HDO6104 4 voies à une cadence de 1MS.s^{-1} avec les sondes suivantes :

Sonde de tension	Sonde de courant	
Sonde différentielle	Lecroy AP015 DC 50MHz*	Max. Peak 50 A
Testec TT-SI 9010	Lecroy CP030A DC 70MHz*	Max. Peak 50 A
DC 70 MHz, Max. Peak 7 kV	* Selon calibre choisi	

Les sources d'alimentation sont :

Source d'alimentation	
ET System	Chroma
source de tension sinus/triangle/carré	Source de tension continue
0 – 400 V 10 – 400 Hz	0 – 450V, 23A
Source de tension continue	
0 – 400 V 3kW	

Principales caractéristiques des charges utilisées :

Charge résistive	Charge selfique
Résistances bobinées Langlois selon calibre 250 – 12Ω 3kW avec effet selfique 20 – 120mH	Charge inductive réglable Langlois 36 – 250mH Charge inductive bobinée 0.2 – 0.5 – 1 – 2mH
Résistances bobinées fixes 1k – 500 – 200 – 100 – 50 Ω 500W 7 – 5.6 – 4.5 – 3.3 – 2.2 – 1.1 – 0.7 Ω (leurre)	Charge active pilotée Chroma EN_63200Series : réglée Courant/Puissance/résistance/tension Carré, continu, rampe

3.2.2 Arcs

Les arcs expérimentés au cours de ces travaux sont créés selon 4 modes opératoires :

a) Électrodes

Au sein du laboratoire, les arcs sont principalement générés par l'écartement de 2 électrodes (Figure 3-15) à travers lesquelles un courant circule (circuit fermé Figure 3-16). La rupture de contact amorce la production d'une décharge électrique d'arc (Surtension inductive, thermo-émission). En DC, cet arc est maintenu jusqu'à interruption du courant ou étirement de la colonne d'arc provoquant une extinction naturelle.

Les électrodes sont maintenues par 2 mandrins en acier acceptant les diamètres de Ø1 à Ø8mm. Les matières des électrodes sont : cuivre, carbone, tungstène, nickel, laiton, aluminium.



Figure 3-15 Électrodes cuivre/carbone

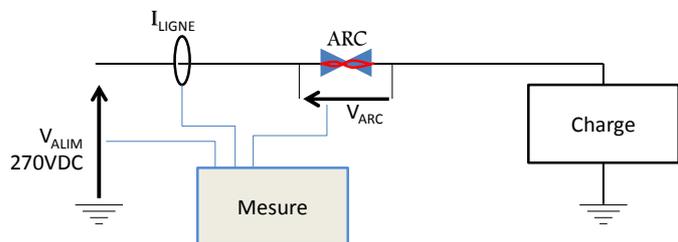


Figure 3-16 : Circuit fermé par électrodes d'écartement

b) Chemin carboné

Les arcs sur chemin carboné sont réalisés sur câble AWG16 rigides avec isolant PVC. Il s'inspire de la norme UL1699b et la carbonisation est réalisée à l'aide du générateur de surtension GDARC construit à l'IJL selon les travaux de J.Andrea [ASTR10].



Figure 3-17 : Chemin carboné

c) Pont vibrant

Un pont vibrant est réalisé par l'IJL à l'aide d'un balancier secoué à fréquence variable (Figure 3-18).



Figure 3-18 : Pont vibrant Mono touche IJL

d) Arc humide - par pont salin



Figure 3-19 : Arc par pont salin
sur brèches de 2mm

Ces arcs obtenus par conduction d'une solution saline produisent de fortes irrégularités (faible et brèves conduction, avant passage à l'arc). La Figure 3-20 en est un exemple d'arc série obtenu par pont salin sur une alimentation $270V_{DC}$ et charge 48Ω .

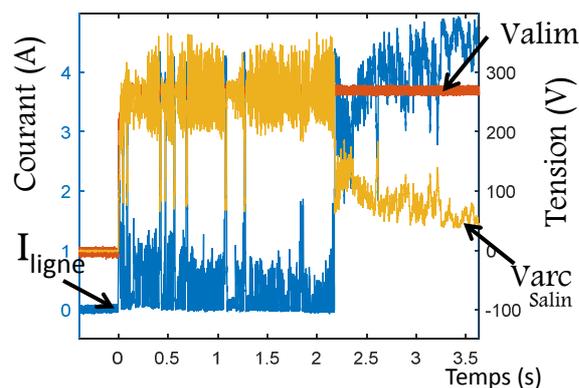


Figure 3-20 : Création d'arcs série par pont salin humide (charge 48Ω +arc)

Ces arcs sont intégrés en série dans les configurations défectueuses qui constituent le banc expérimental de la base de données décrite par la suite en 3.3.

3.2.3 Configuration générale

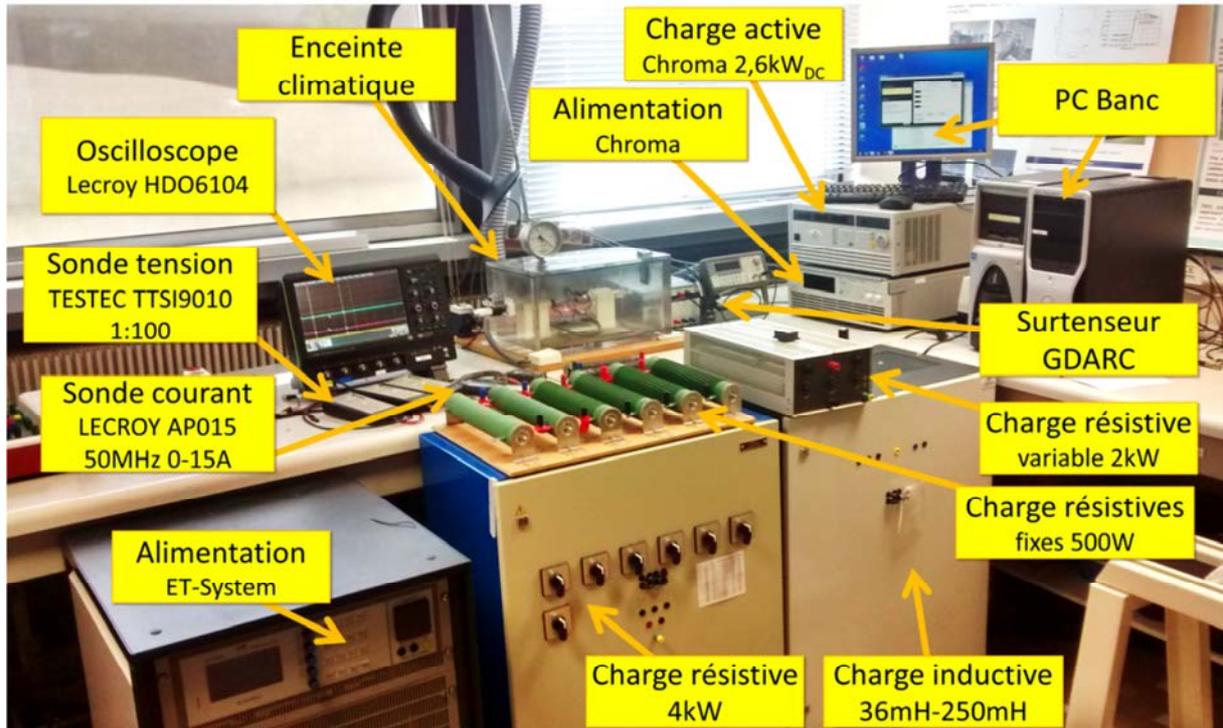


Figure 3-21 : Configuration complète du banc de test

Les différentes configurations exposées 3.1 sont réalisées à l'aide de l'ensemble des équipements disponibles au laboratoire (Figure 3-21 ci-dessus).

L'arc est produit à l'intérieur de l'enceinte climatique. Un dispositif (switch pilotable) permet d'inhiber ou d'activer l'arc sur demande et d'ajouter en série ou parallèle des charges pour créer des transitions avec et sans arc (Figure 3-22).

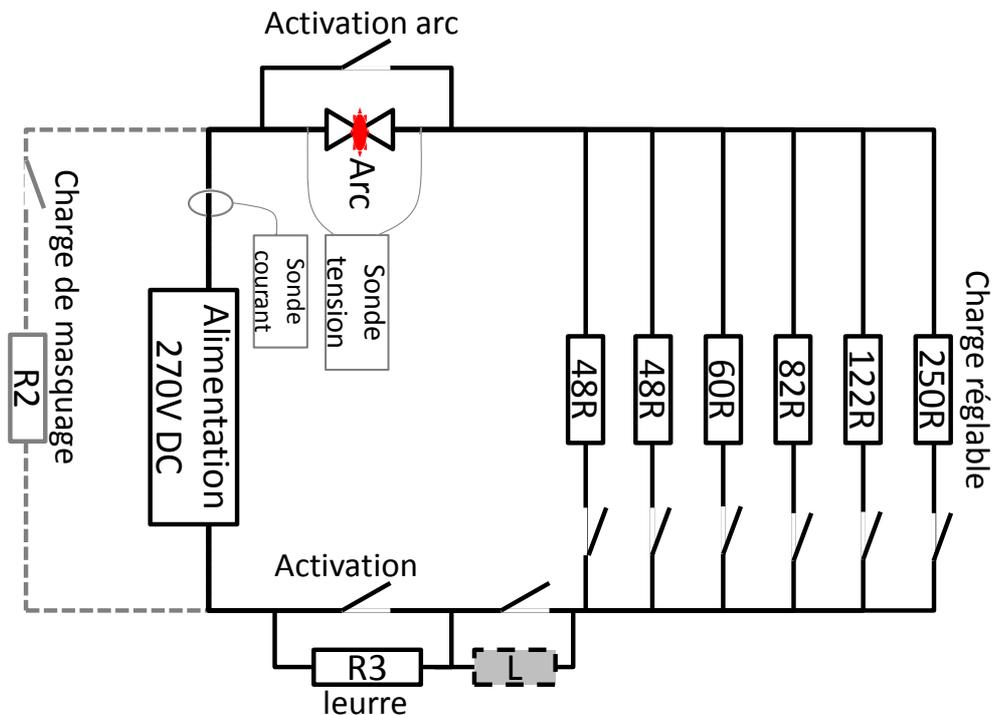


Figure 3-22 : Topologie générique banc de test

Les signatures de courant élaborées par le banc permettent d'évaluer les performances de détection des algorithmes selon la procédure décrite en 3.4 (Méthode d'évaluation des performances). Pour juger de la pertinence des diagnostics, non seulement des arcs sont créés, mais également des variations de charges sans arc et notamment à l'aide de "Leurre". Le leurre a pour but d'éprouver les algorithmes qui se basent sur une variation de charge de valeur proche et similaire à un arc. C'est pourquoi le leurre est compris entre 0.7Ω et 7Ω qui correspond à la résistance d'un arc entre 2 et 25A dans notre configuration.

3.3 Base de données de signaux expérimentaux

3.3.1 Série de données de test

Un large panel de données est indispensable à la mise au point de méthodes de détection des arcs électriques. Ce panel reproduit différentes phases de vie d'un réseau électrique telles que présentées en section 3.1.

Afin de valider la pertinence d'une détection d'arc, les signaux se reposent aussi bien sur des cas de défaut électrique que sur des cas sans défaut. Pour ce faire, le banc réalise 3 actions (Figure 3-22) :

- Défaut d'arc sur charge résistive ou selfique simple
- Défaut d'arc sur charge résistive ou selfique avec une charge de masquage (en parallèle)
- Transitoires sans défaut d'arc par l'ajout d'une nouvelle charge (en parallèle) ou d'une charge série (leurre).

Le rôle de la résistance de leurre en série est de simuler l'apparition d'une charge équivalente à un arc électrique (de valeur ohmique proche ou similaire d'un arc).

L'intégralité des traces acquises de la tension d'alimentation, la tension d'arc et du courant de ligne sont indexés selon une référence unique. Cette référence permet de constituer une liste des signaux à partir de leurs conditions expérimentales :

- Type d'alimentation
- Type de défauts ou transitoire
- Distances d'écartements (pour les arcs à l'ouverture)
- Type de charges
- Conditions environnementales atmosphériques (pression, hygrométrie, gaz isolant)

La base de données intègre 1450 évènements (arcs, transition) acquis, parmi 1254 signaux référencés et identifiés. La moitié des essais ont été effectués avec l'alimentation ETSsystem (linéaire à 3 étages de conversion) et l'autre moitié avec l'alimentation Chroma (à découpage).

Alimentation 270Vdc	
Chroma	626 (898 évènements)
Etsystem	628

Environ 450 signaux sont des signaux sans défauts d'arc obtenus avec des commutations de charges combinées. La base de 1045 signaux identifiés avec arc se répartissent comme suit Tableau 5 :

- 712 sont produits sur des électrodes cuivres (tous diamètres confondus).
- 116 signaux d'arcs proviennent de chemins
- 83 traces viennent d'arcs créés par électrodes en graphite de carbone.

Le reste des mesures expérimentales se partagent entre du fer, laiton, de l'aluminium et tungstène.

Tableau 5 : Décompte et répartition de la base de données, type d'arc/variation

TOTAL type d'ARC	1045
électrodes Cu/Cu	712
Chemin Carbonisé	116
électrodes C/C	83
électrodes Fe	60
électrodes Laiton	32
électrodes Al/Al	32
électrodes diverses	10
Total NOARC	444
Leurre (R proche de Rarc)	159
NOARC (charge active)	205
Autres	80

L'exécution de l'écartement reste libre pour une grande partie des expériences.

Tableau 6 : Décompte et répartition des valeurs de charges étudiées

Charges			
Résistive	total 1251	Leurre (r)	total 44
Valeurs libres	298	fk0.70RΩ	15
121Ω 2.2A	8	fk1.12Ω	18
81.7Ω 3.3A	15	fk5.6Ω	11
59.7Ω 4.5A	156	Charge pilotée électroniquement	
48.3Ω 5.6A	467		
40.5Ω 6.7A	2		
34.7Ω 7.8A	3		
30.5Ω 8.9A	13	Inductance	total 1254
26.8Ω 10.1A	3	Sans self	899
24.1Ω 11.2A	192	0.25mH	6
22.2Ω 12.1A	6	0.5mH	21
18.8Ω 14.4A	14	1mH	49
16.2Ω 16.6A	14	34mH	93
14.4Ω 18.8A	3	120mH	90
13.7Ω 19.7A	57	250mH	96

Sur plus de 1250 signaux, 900 sont de nature résistive. 350 sont selfiques d'une valeur de 0.25mH jusqu'à 250mH. La référence d'essai résistive est la valeur 48Ω (1.5kW).

Tableau 7 : Décompte et répartition des conditions environnementales d'expérience

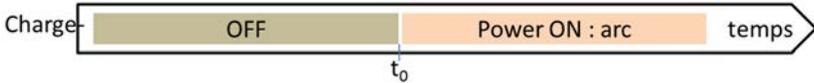
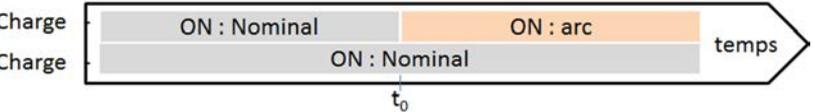
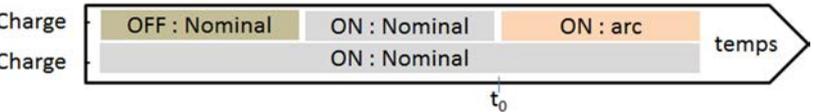
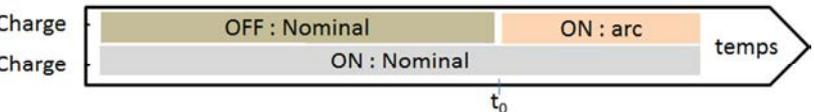
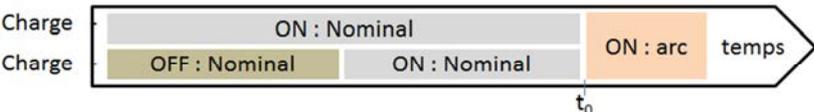
Pression approximative (et altitude correspondante)										
Pression (altitude)	P _{Amb} (sol)	900hPa (990m)	800hPa (1951m)	700hPa (3016m)	600hPa (4212m)	500hPa (5582m)	400hPa (7195m)	300hPa (9176m)	200hPa (11790m)	100hPa (15818m)
Nombre	687	7	42	6	6	6	13	6	66	48

Pour l'analyse du comportement en altitude, 35% des essais sont réalisés à pression inférieure à 200hPa (équivalent à plus de 10km d'altitude).

Les paramètres d'acquisition identiques : Cadence d'échantillonnage 1MHz, dynamique d'amplitude 1A/Division.

3.3.2 Signaux expérimentaux

Les signaux de la base de données répondent aux séquences d'apparition des défauts suivants :

- Charge simple :
 - Apparition de défaut en cours d'utilisation de la charge
 
 - Apparition de défaut au lancement de la charge
 
 - Apparition de défaut après le lancement de la charge
 
- Charge de masquage :
 - Apparition de défaut en cours d'utilisation d'une des charges
 
 - Apparition de défaut après le lancement de la charge
 
 - Apparition de défaut au lancement de la charge
 
- Charges multiples :
 - Apparition de défaut après le lancement d'une des charges
 
 - Apparition de défaut en cours d'utilisation d'une des charges
 

Pour exemple : à chaque séquence de configuration appartiendra une correspondance de signaux du courant de ligne :

- Figure 3-23 – A : activation de charge (R 48Ω) en présence d'arc
- Figure 3-23 – B et C : apparition d'un défaut sur une charge (R) déjà active
- Figure 3-23 – D : apparition d'un défaut
- Figure 3-23 – E et F : apparition d'un défaut après activation (en chauffe)

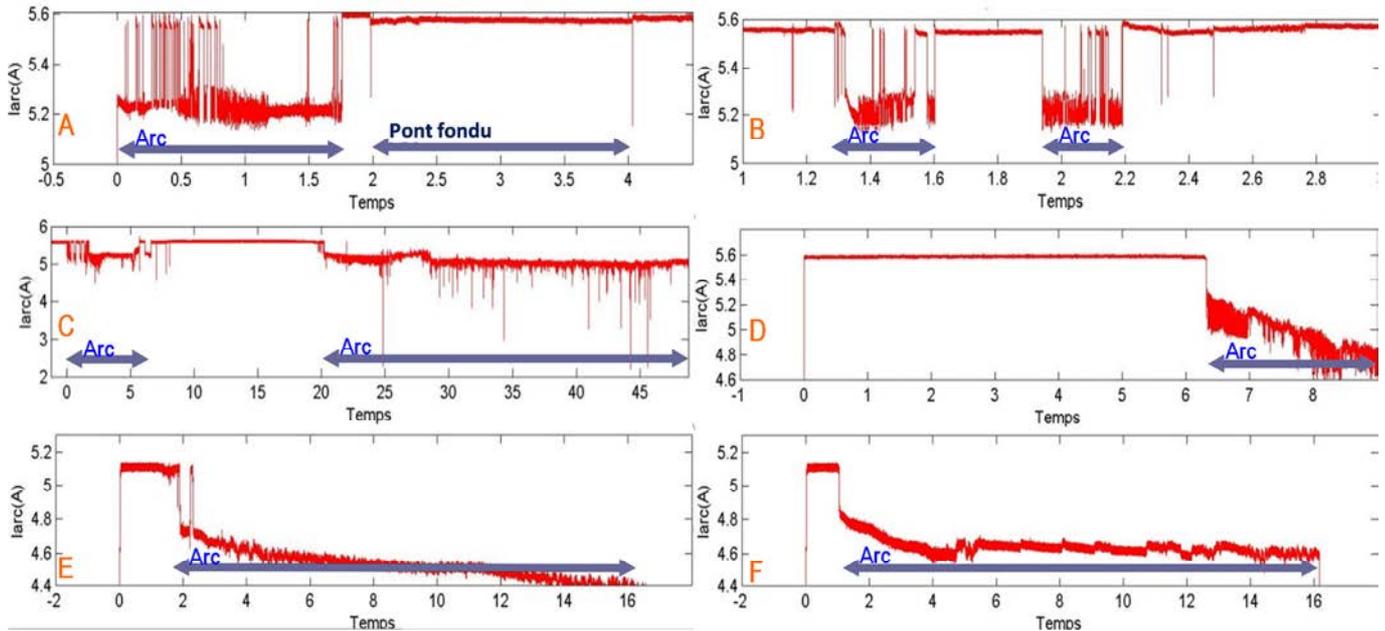


Figure 3-23 : Courant d'arc série à 270VDC par écartement d'électrode tungstène et cuivre pour une charge 48ohms

La multitude des états transitoires de charges est l'une des problématiques majeures.

Voici un échantillon de la forme des signaux obtenus avec le banc expérimental pour différentes configurations d'arcs:

- Écartement d'électrodes

Sur la trace ci-dessous, on identifie une tension d'arc moyenne de 18.8V précédés par une pente due à l'augmentation de la distance ('gap') inter électrodes à la création de l'arc (écartement)

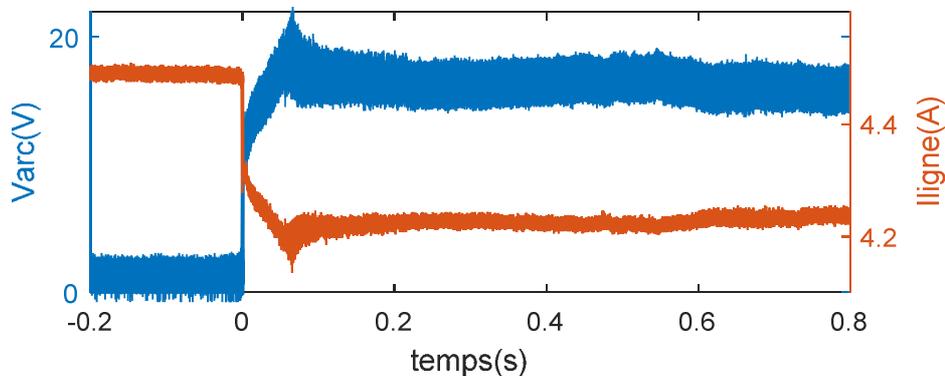
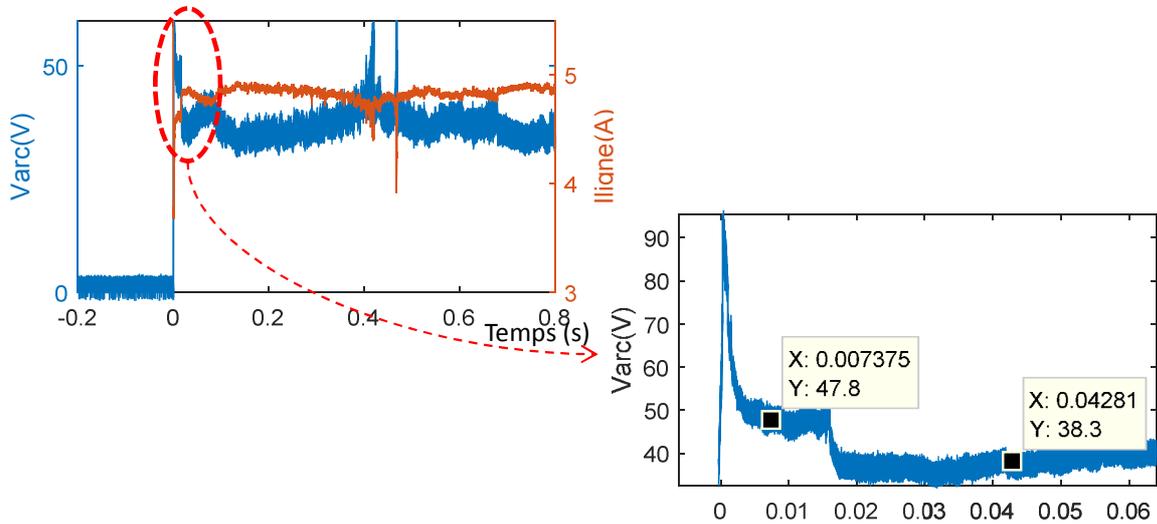


Figure 3-24 : signal arc par ouverture de contact
Électrode laiton 6mm

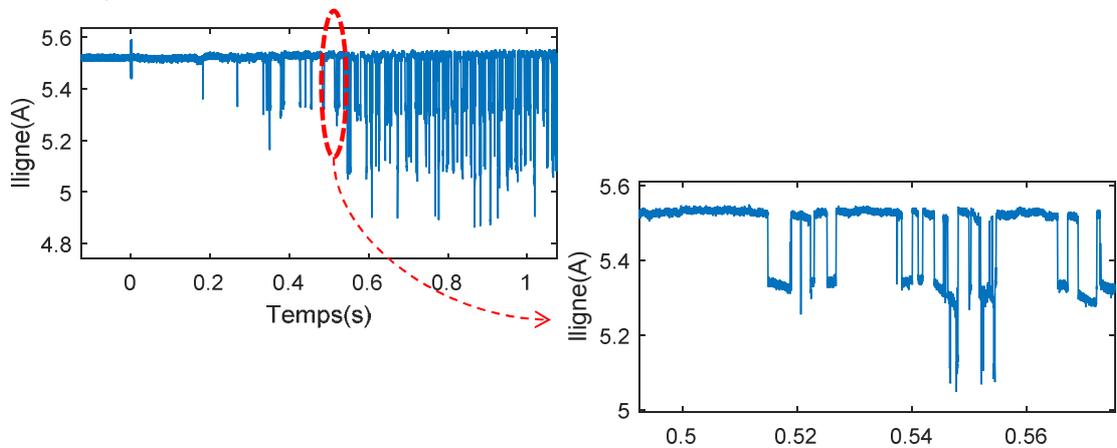
- Chemin carboné

Sur la trace ci-dessous, on reconnaît l'activation de la carbonisation par le pic de tension aux bornes du chemin carboné qui décroît fortement (chauffe du carbone) jusqu'à conduire. 2 niveaux de tension d'arc sont à noter Figure 3-25 : environ 47V lorsque l'arc apparaît (présence de pollution, plastique, carbonisation, oxydes) puis environ 38V pour une intensité de 4.8A sur 270V_{DC}.



- plot vibrant

Les arcs créés par la vibration d'un plot vibrant sont chaotiques, de durée très variable (Figure 3-26)



- Charge pilotée

La charge pilotée de nos essais effectue la mesure U/I à son entrée et régule sa consommation selon une consigne paramétrée (en W ou A). Lors d'apparition d'arc, l'asservissement rejoint la consigne autant que possible. Voici 2 types de régulations :

- Asservissement en puissance

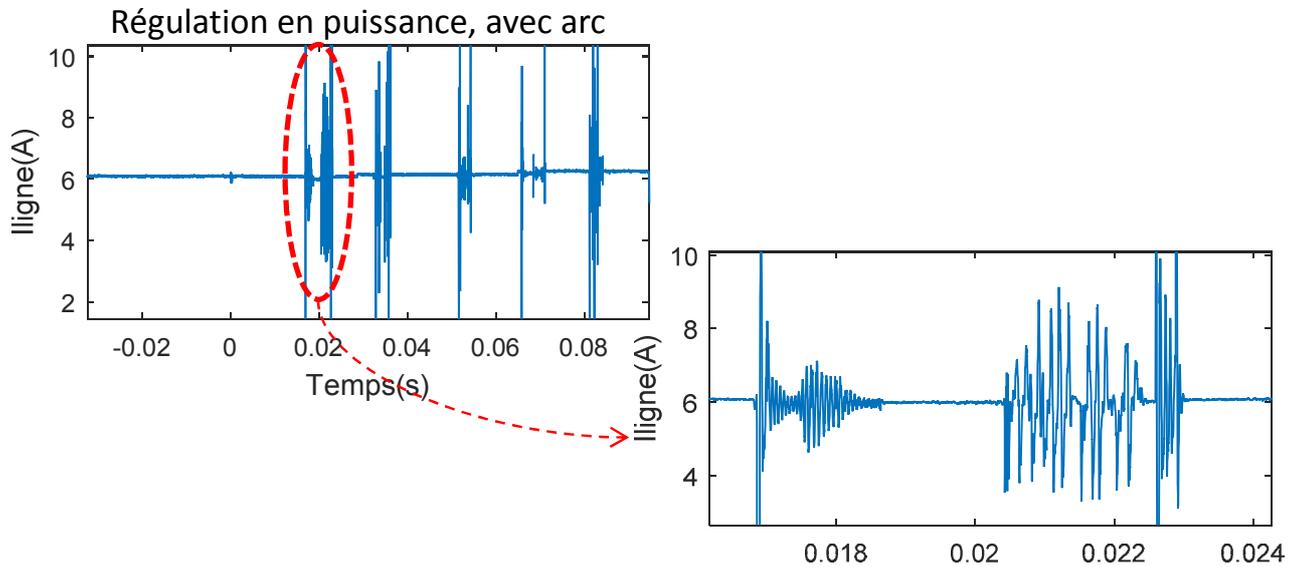


Figure 3-27 : signal d'arc fugitif sur une charge active régulée en puissance 1.6kW 270V_{DC}

- Émulation de convertisseur (signal triangle 10kHz)

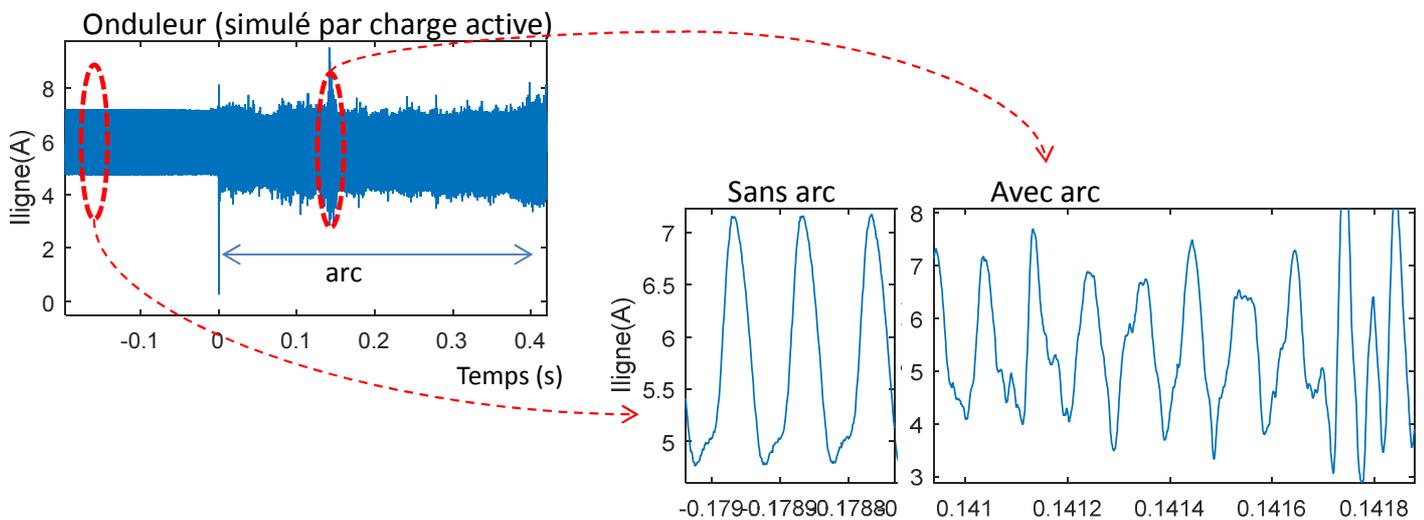


Figure 3-28 : signal triangle avec activation d'arc par ouverture

Ces signaux servent au développement et à la validation des algorithmes en plus des signaux définis par les normes.

3.4 Méthode d'évaluation des performances

Toutes les méthodes développées au cours de ces travaux de thèse sont soumises à une évaluation de performances. Les résultats sont comparés aux informations contextuelles (tagues arc/noArc, tension d'arc) de la base de données pour vérifier la justesse des diagnostics.

La base de données étant composée de cas positifs (défaut) et négatifs (sans défaut), il est possible de déterminer le taux de :

- Bonne détection de défaut (TP : "True positive case" en anglais)
- Mauvaise détection de défaut (FN : "False Negative case")
- Fausse détection de cas sain (FP : "False Positive case")
- Juste non-détection (TN : "True Negative case")

Tableau 8 : Matrice de confusion générique

		ARC (P :Positive)	NO ARC (N :Negative)
Bonne détection	OK	TP : True Positive case Nombre % de bonne détection	TN : True Negative case Nombre % de bonne non-détection
Mauvaise détection	NOK	FN : False Negative case Nombre % de mauvaise détection	FP : False Positive case Nombre % de fausse détection (à tort)
Total		Nombre de signaux avec arc	Nombre de signaux sans arc

L'ensemble des résultats sont résumés dans les matrices de confusion [Fawc06] (Tableau 8) qui détermine le *taux de bonnes détections de cas positifs* exprimé par la **SENSIBILITÉ** et le *taux de bons diagnostics de situations saines* (négative) par la **SPÉCIFICITÉ**. L'ensemble des diagnostics justes sur l'ensemble des signaux représente la **JUSTESSE (accuracy)**.

Sensibilité (True positive rate : TPR ou Sensitivity)

$$TPR = \frac{\Sigma TP}{\Sigma (TP;FN)} \quad (3.1.)$$

Spécificité (True negative rate : TNR ou Specificity :SPC)

$$SPC = \frac{\Sigma TN}{\Sigma (TN;FP)} \quad (3.2.)$$

Justesse (Accuracy)

$$Accuracy (ACC) = \frac{\Sigma TP + \Sigma TN}{\Sigma (TP;TN;FP;FN)} \quad (3.3.)$$

Pour aider au choix de valeurs-seuils discriminantes, la courbe de ROC (Receiver Operating Characteristic) [BrDa06] est un outil graphique qui permet de visualiser la capacité d'un test dichotomique à dissocier une population saine ou en défaut. Pour le tracé de la courbe de ROC, l'abscisse correspond à la population de fausse détection positive parmi une population saine ($1 - Spécificité$) alors que l'ordonnée révèle le taux de bonne détection parmi les tests de défaut réellement positifs (sensibilité).

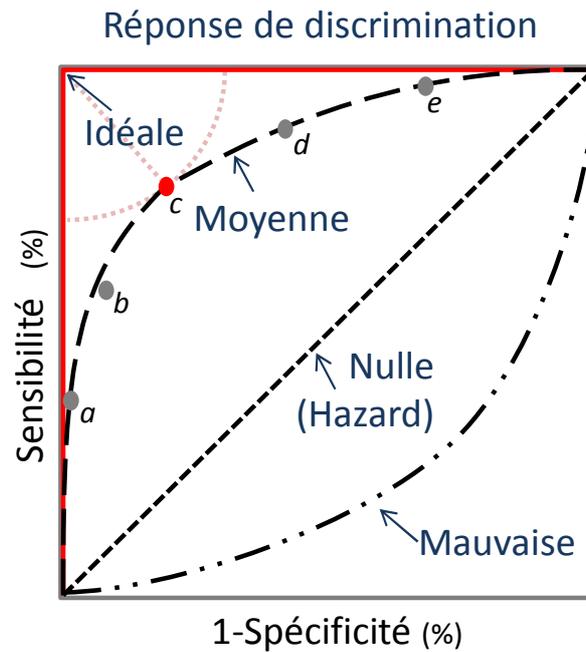


Figure 3-29 : Courbe de ROC pour une capacité de discrimination mauvaise, nulle, moyenne (selon plusieurs valeurs-seuil du test) et idéale

Le fonctionnement d'une courbe de ROC est tel qu'une fonction totalement discriminante présentera un seuil de discrimination apte à différencier 100% des cas positifs et 100% des cas négatifs soit une spécificité et sensibilité maximale située dans l'angle supérieur gauche (courbe rouge). En revanche, lorsqu'un seuil ne permet pas une distinction totale, la discrimination devient moyenne. La courbe dépend alors de la valeur du seuil déterministe (de a à e). Le point c étant le plus proche de l'angle supérieur gauche, il présente les meilleurs résultats (justesse) malgré ses fausses et non détections. Les deux derniers tracés ne présentent aucun bénéfice pour le diagnostic (Nulle et Mauvaise).

Les illustrations Figure 3-30 et Figure 3-31 montrent les effets d'un changement de valeur-seuil selon 2 visions : La Figure 3-31 représente la distribution de résultats sur le plan dichotomique binaire (vrai/faux/, positif/négatif). Alors que la Figure 3-30 illustre un nuage de points-résultat en fonction d'un domaine d'étude à 1 dimension (par exemple : intensité du courant, puissance, etc.).

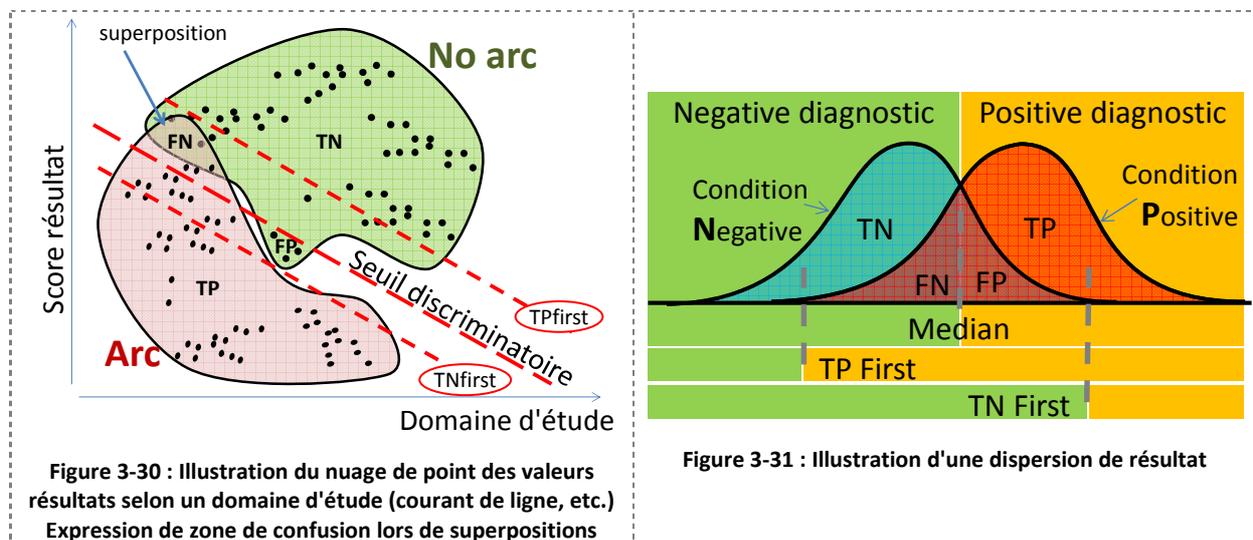


Figure 3-30 : Illustration du nuage de point des valeurs résultats selon un domaine d'étude (courant de ligne, etc.)
Expression de zone de confusion lors de superpositions

Figure 3-31 : Illustration d'une dispersion de résultat

Lorsque les 2 catégories (diagnostic positif/négatif) se superposent, le recouvrement introduit une confusion d'interprétation source de doute par de fausses détections. Ainsi de faux positifs se mélangent à de vrais positifs et de faux négatifs avoisinent les cas sains.

Il faut alors faire le choix du meilleur compromis pour le système selon la stratégie souhaitée :

- Soit, les vrais positifs (TP) sont privilégiés au détriment de faux positifs (**FP**) afin de s'assurer qu'un défaut est détecté même si cela perturbe un fonctionnement normal (qui est considéré à tort comme un défaut). Cette stratégie "**sur-sécuritaire**" est illustrée par le point 'e' Figure 3-29 et le choix de seuil "TNfirst" Figure 3-30
- Soit, les vrais négatifs (TN) sont maximisés même si cela implique de "ne pas prendre en compte" des cas positifs (**FN**) pour éviter d'interrompre un périphérique en cas de doute. Cette stratégie de "**Prudence**" est illustrée par le point 'a' Figure 3-29 avec le choix du seuil "TPfirst" Figure 3-30
- Soit, une Justesse meilleure (maximise les TP et TN) qui permet d'admettre des erreurs à condition de couvrir un maximum de cas et de se rapprocher de l'angle supérieur gauche. Le point 'c' de la Figure 3-29 représente cette stratégie "**Intuitive**" également représentée par un seuil médian Figure 3-30.

Pour l'aéronautique, les performances souhaitées sont maximales avec 0 fausses détections et 100% de détection. A défaut de performances idéales, nous souhaitons limiter les faux déclenchements au détriment d'une bonne détection en privilégiant la prudence avec le point 'a'.

Pour juger les algorithmes de détection, certains travaux comme ceux de Ghaderi [GMGS15] ajoutent des critères de jugements basés sur le **coût** en ressources matérielles de calcul (complexité), le **délai** de détection, l'**universalité** des méthodes à plusieurs systèmes/topologie électrique et enfin l'**intégrité** de la méthode pour garantir que les informations traitées sont authentiques et ne subissent pas de transformations (traitement/transformation partiel, injection de signal, intrusif, etc).

Chapitre 4 :

CONTRIBUTION À LA RECHERCHE DE CRITÈRES DISCRIMINANTS POUR LA DÉTECTION

- 4.1 DÉTECTION PRÉLIMINAIRE PAR LA VARIATION BRUTALE DE CHARGE
 - 4.1.1 ANALYSE DE LA RÉPARTITION DES VARIATIONS D'IMPÉDANCE
 - 4.1.2 CARACTÉRISATION DU DÉFAUT À PARTIR DE LA VARIATION D'IMPÉDANCE
 - 4.1.3 EXPLOITATION DE LA CHUTE DE COURANT POUR LA DÉTECTION ET L'IDENTIFICATION DE DÉFAUT
- 4.2 EXTRACTION DES COMPOSANTES STOCHASTIQUES DE L'ARC TRAITEMENT PRÉLIMINAIRE
 - 4.2.1 PRINCIPE DE L'ESTIMATION APRIORI (LATENTE) ET MODE D'ÉVALUATION DES PERFORMANCES
 - 4.2.2 PERFORMANCE DE LA MÉTHODE D'EXTRACTION DE BRUIT
- 4.3 CRITÈRES D'ANALYSE PROPOSÉS POUR LA DÉTECTION DE DÉFAUT D'ARC
 - 4.3.1 CRITÈRE 1 : PUISSANCE DU BRUIT D'ARC (PR : PUISSANCE DU RÉSIDU)
 - 4.3.2 CRITÈRE 2 : DISPERSION DE L'AUTOCORRÉLATION DU RÉSIDU (CENTRALISATION)
 - 4.3.3 CRITÈRE 3 : MOYENNE DE LA VARIANCE GLISSANTE DU RÉSIDU (MVGR)
 - 4.3.4 CRITÈRE 4 ET 5 : ANALYSE FRÉQUENTIELLE
 - 4.3.5 CONCLUSION SUR LES CRITÈRES
- 4.4 ASSOCIATION DE MULTIPLES CRITÈRES
 - 4.4.1 CONSTITUTION D'UN DÉTECTEUR COMBINÉ (DÉTECTION D'ÉVÈNEMENT, ANALYSE, DÉCISION)

4 Contribution à la recherche de critères discriminants pour la détection

La détection d'arc électrique constitue le cœur des travaux de thèse. Ils s'articulent sur l'analyse des instants qui suivent l'ignition des défauts d'arcs série.

Pour ce faire, 4 outils ont été à l'étude : l'identification d'évènement, l'extraction de bruits propre à l'arc, le traitement et l'analyse de signaux selon différents critères et enfin la combinaison de ces multiples critères.

La première étape suggère de limiter le dépistage de présence d'arc uniquement aux situations à risque identifiées à partir de brusques variations d'impédance lors de l'apparition des arcs série. Cette description se trouve en partie 1 de ce chapitre.

La seconde étape consiste à extraire la composante bruitée des signaux électriques mesurés par le biais de la méthode du "résidu" basé sur une modélisation '*apriori*' qui est présentée en partie 2.

Mais avant d'exécuter ces diagnostics, la première partie expose le mode opératoire pour évaluer et constituer un panel conséquent de spécimens de défauts d'arc électrique et également de transitions sans défauts.

4.1 Détection préliminaire par la variation brutale de charge

L'apparition d'arcs en série sur une ligne électrique provoque une modification de la charge perçue par la source d'alimentation (cf. modélisation d'arc section 1.1.2 page 8). L'ajout soudain de l'impédance d'un arc (plasma) induit une discontinuité du courant de ligne. Cette variation peut être exploitée pour déceler la présence d'un arc. À noter que les variations ne sont pas toutes provoquées par un arc.

Dans cette partie, deux techniques sont étudiées pour traiter et qualifier une variation de charge. Ces méthodes classifient le risque qu'un signal soit d'origine défectueuse sans confirmer pour autant la présence d'un arc. Elles sont basées sur l'analyse de la variation de charge à partir de données statistiques et également par modélisation de la tension d'arc selon l'équation de Paukert [Pauk93].

4.1.1 Analyse de la répartition des variations d'impédance

Le dispositif expérimental par ouverture du circuit (présenté en section 0) permet de faire une étude statistique du saut d'impédance sur 2 types d'électrodes : Carbone et cuivre 6.3mm. La Figure 4-1 présente ces résultats sous forme de rapport exprimé en pourcentage entre la chute de courant et le courant nominal.

La tension d'alimentation est réglée à 270V_{DC} pour observer la variation du courant : image de la variation de résistance du circuit. Un minimum de 3 essais par valeur a été mené afin d'observer la répétabilité des résultats et ceci pour un courant inférieur à 23A.

Les résultats consignés Figure 4-1 indiquent une proportionnalité du saut de courant en fonction de l'intensité du courant nominal. La distribution statistique tous courants confondus est représentée Figure 4-2.

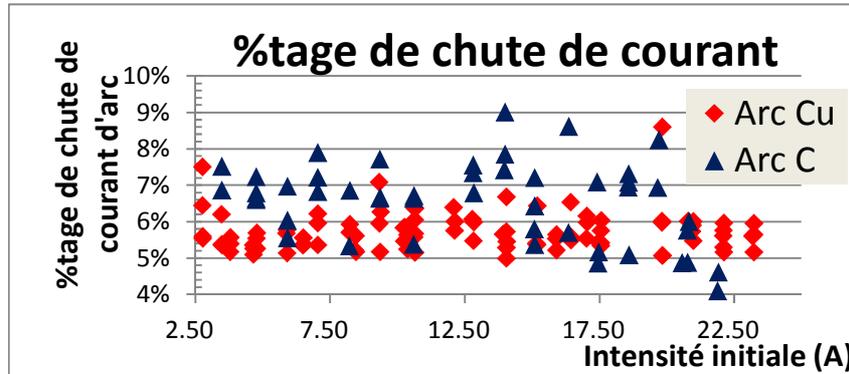


Figure 4-1 : Pourcentage de chute de courant d'arc à 270Vdc

Figure 4-2

Les 94 mesures effectuées avec les électrodes cuivre montrent qu'une majorité des sauts de courant sont compris entre 5.5% et 6.5% (5.5%=34, 6%=40, 6.5%=14).

Les 55 mesures avec une paire d'électrodes carbone à l'ouverture représentent une dispersion des cas plus large avec des variations allant de 4.5% à 9.5%

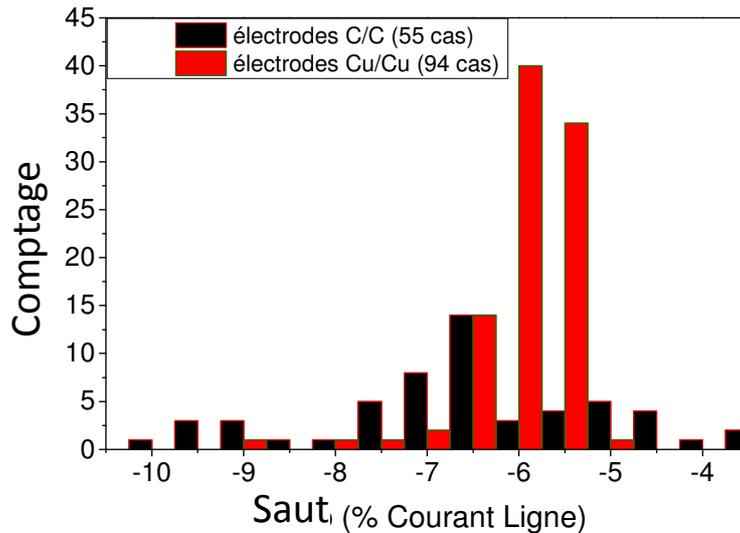


Figure 4-2 : Statistique de variation du courant lors d'apparition d'arc (149 cas d'ouverture Cu/Cu & C/C 270V_{DC} charges variables)

Pour les électrodes en cuivre la distribution est très centrée autour de 6% alors que pour les électrodes de carbone on observe une plus grande distribution des valeurs avec un maximum moins haut autour de 6,5%.

4.1.2 Caractérisation du défaut à partir de la variation d'impédance

Différents modèles d'arc ont été présentés dans la section 1.2.2. Ils prennent en compte la nature des électrodes, leur écartement et surtout l'intensité du courant. Ces modèles sont utilisés dans certains travaux de détection comme ceux de Yao [XSHJ11, YHHW12] faisant mention de l'usage de l'équation de Paukert réduite à 2 termes "a" et "b" sous la forme :

$$V_{arc} = \frac{a}{I_{arc}^b} \quad (4.1.)$$

Les coefficients a et b sur des électrodes cuivres en fonction de l'écartement sont obtenus par ajustement expérimental. Le Tableau 9 présente ceux obtenus par Yao qui diffèrent légèrement des résultats de Paukert. [Pauk93, YHHW12](Paukert 1993, Yao 2012).

Tableau 9: Valeur coeff a & b (Yao2012)

x	0.04 in 1 mm	0.06 in 1.5 mm	0.08 in 2 mm	0.10 in 2.5 mm	0.12 in 3 mm
a	38.28	54.30	67.81	72.66	78.38
b	0.1660	0.2496	0.3036	0.3055	0.3165

Pour exemple :

à 1mm, Yao relève des coefficients A=38.28 contre 36.32 pour Paukert,

De même pour le coefficient B= 0.166 au lieu de 0.124.

La caractéristique de l'impédance d'arc sous la forme de a/i^b se confirme par nos expérimentations à l'aide d'une variation de courant de ligne (tension variable) sur des électrodes cuivre (chemin carboné AWG16, $d \cong 1\text{mm}$). (Figure 4-3)

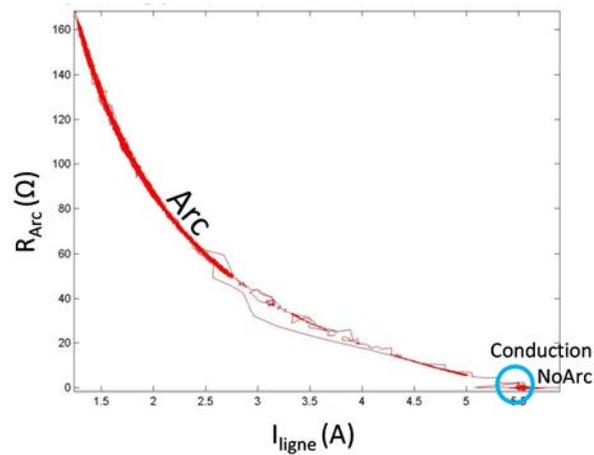


Figure 4-3 : Variation de résistance de l'arc en fonction du courant.

La résistance de l'arc est alors de plusieurs dizaines d'Ohms à faible intensité de courant électrique, puis diminue jusqu'à quelques Ohms.

Pour autant, les expérimentations par ouverture d'électrodes en cuivre montrent des coefficients qui diffèrent de la littérature. Ils sont basés non pas sur le courant d'arc, mais sur le courant initial avant l'arc. Les coefficients sont alors de : $32 < a < 36$ et $0.38 < b < 0.40$.

Il est donc possible de prédire approximativement la chute de courant rencontré sur la ligne en défaut lorsque le défaut apparaît en fonction de son intensité nominale.

4.1.3 Exploitation de la chute de courant pour la détection et l'identification de défaut

Une variation de charge ne constitue pas nécessairement une anomalie dans un réseau électrique. Cependant, un défaut électrique de type arc série est toujours accompagné d'une chute de courant due à l'ajout de l'impédance d'arc.

La première méthode revient à détecter une variation de signal à l'aide de seuils prédéfinis expérimentalement (en pourcentage de la charge : vue en 4.1.1).

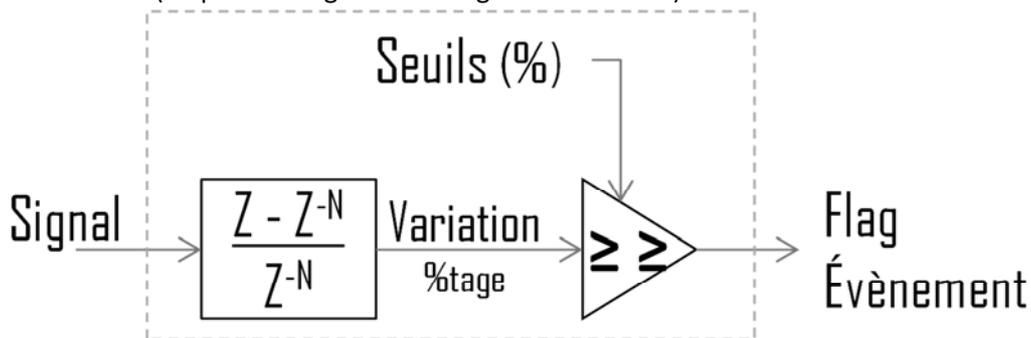


Figure 4-4 : Méthode de discrimination par variation (seuil statistique)

Ainsi, telle que présentée Figure 4-4 la variation du signal est estimée par le calcul du ratio du signal instantané (Z) et du signal antérieur (Z^N). Un seuillage détermine si la variation est comprise dans la tranche de variations identifiée statistiquement comme étant provoquée par un arc électrique.

Cette méthode sélectionne uniquement les transitions comprises dans la fourchette de valeurs prédéfinies, qu'ils soient arc ou non-arc.

Malgré tout, cette méthode n'est efficace que pour des charges linéaires présentant une anomalie en régime établi.

La seconde méthode consiste à prédire la diminution de charge provoquée par l'ajout (Figure 4-5) de la résistance d'un arc en série d'après une estimation par le modèle de Paukert :

- En fonctionnement normal, l'impédance de ligne = Z_{charge} .
- En présence de défauts d'arc, l'impédance de ligne = $Z_{charge} + Z_{arc}$ estimé.

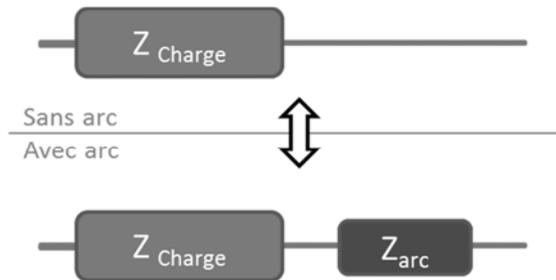


Figure 4-5 : Modèle équivalent Z_{ligne} avec/sans Arc

Selon l'estimation de la valeur de tension d'arc en fonction de l'intensité, l'utilisation du modèle de Paukert anticipe l'impédance d'un arc pour une intensité donnée. Ainsi, la variation de charge en cas de défaillance est prédite en continu par l'ajout d'une résistance d'arc série estimée.

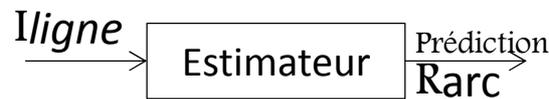


Figure 4-6 : Prédicteur R_{arc}

La réalisation algorithmique d'une détection par cette méthode est décomposée en 6 étapes :

- Mesure instantanée de la tension et du courant de ligne (V_{source} & I_{ligne})
- Estimation de la tension d'arc V_{arc} (estimée)
- Estimation de l'impédance d'arc Z_{arc} déduit de V_{arc} estimée et I_{ligne}
- Estimation de l'impédance de ligne Z_{ligne} en temps réel d'après V_{source} / I_{ligne} mesuré
- Estimation de l'impédance de ligne Z_{ligne}' avec un défaut soit : $Z_{charge} + Z_{arc}$ (estimée)
- Comparaison entre la résistance de charge et la résistance prédite en cas d'arc (latence Z^N).

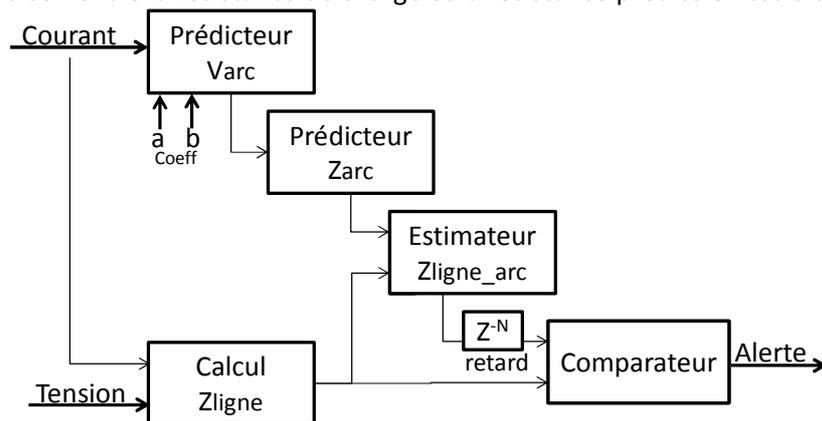


Figure 4-7 : Algorithme de prédiction d'impédance de ligne défectueuse

La plage de prise en compte est définie entre les extremums expérimentaux ayant servi à calculer les coefficients a et b du modèle. ($a_1=36$, $a_2=32$ et $b_1=0.38$, $b_2=0.40$).

La méthode réalise une prédiction permanente de l'impédance de charge dans le cas où un arc se produit.

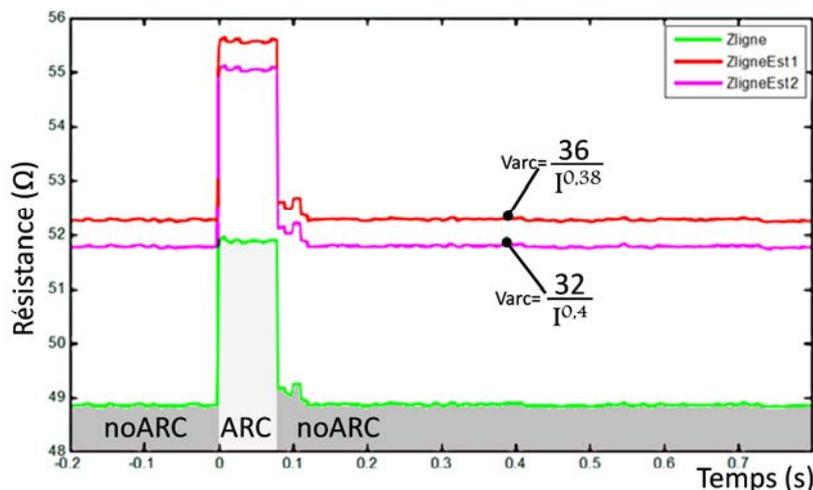


Figure 4-8 Estimation de l'impédance de ligne en fonction du courant de charge (temps réel, sans retard) (cadence : 250 estimations.s⁻¹)

La Figure 4-8 illustre l'usage d'une estimation prédictive avec une charge résistive 48Ω alimentée en 270V_{DC} à laquelle s'ajoute un arc pendant moins de 100ms (Courbe verte).

Lors du passage à l'arc, l'impédance de ligne rejoint la plage de valeurs prévue par l'estimateur (espace entre la courbe rouge et magenta).

En présence de l'arc, dans le cas où un second arc s'ajouterait au premier, la prédiction estime la nouvelle valeur de la résistance de charge.

Comme la précédente méthode (statistique), celle-ci ne sélectionne que les transitoires de charges qui représentent potentiellement un arc et exclue toutes autres transitions marginales considérées comme "normales" et hors plages prédéfinies par l'estimateur.

Toutefois, cette proposition est contrainte par la diversité de comportement de l'arc en fonction des électrodes. L'évolution du gap entre les électrodes engendre une modification de la tension d'arc, tout comme le changement de matériaux tel que l'illustre la Figure 4-9 qui présente différente charge et électrodes dans l'air à pression ambiante.

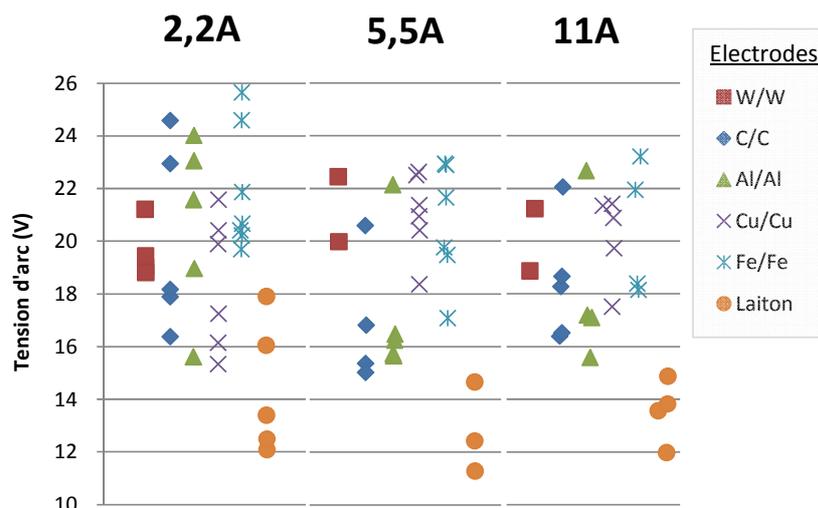


Figure 4-9 : Variation de tension d'arc selon le matériau des électrodes en fonction du courant (Courant avant arc : 32 cas 2.2A, 26 cas 5.5A, 24 cas 11A distribués selon : 8W, 17Cu, 14C, 14Al, 17Fe, 12laiton)

Figure 4-9 illustre l'influence des matériaux quant au comportement de l'arc.

Ainsi, à travers la représentation des valeurs moyennes Figure 4-10, le laiton apparaît comme un matériau à part entière. Il délivre une tension d'arc inférieure aux autres matériaux (entre 12V et 14V).

Pour les autres électrodes, 2 groupes se distinguent par la valeur moyenne des tensions d'arc :

Groupe 1 : Tungstène, fer, cuivre qui convergent sur la même tension d'arc comprise entre 20V et 22V à partir de 5.5A.

Groupe 2 : Aluminium et carbone dont la tension d'arc moyenne autour de 18V est inférieure aux matériaux du groupe 1 à partir de 5A.

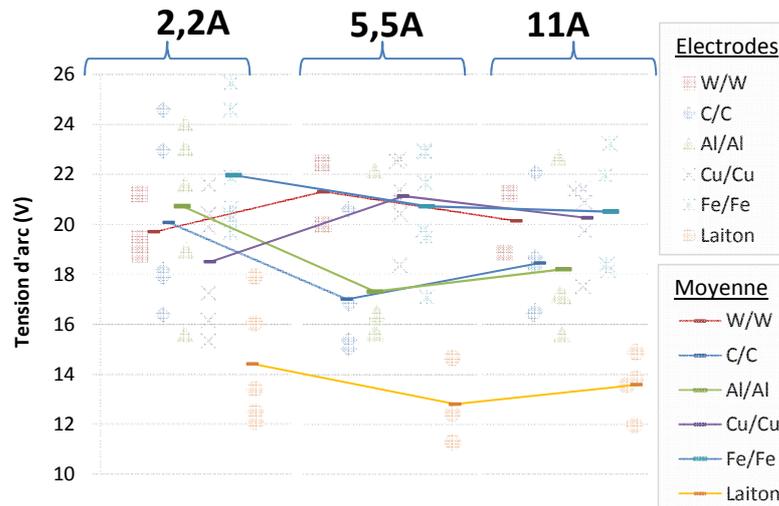


Figure 4-10 : Variation moyenne de tension d'arc selon le matériau des électrodes

L'identification de la nature de l'arc, bien que non traitée dans ces travaux de thèse, ouvre la voie à une étude d'algorithmes de détection dépendant de la nature de l'arc. Ainsi, les algorithmes de détection ont la faculté de prendre en compte tout ou partie des aspects suivants :

- Arc sur électrodes fer et laiton : sensible à la chaleur, ces électrodes fondent et produisent des ponts fondus et discontinuités de l'arc (arc flash). → Voir section 1.3.2.1 *Ponts fondus et microcontacts de métal en fusion*.
- Arc Aluminium : Ce métal devient mou et se déforme sous l'effet de la chaleur modifiant la longueur d'arc. De plus, une épaisse couche d'oxydation isolante se crée lors du refroidissement des contacts (fin d'arc).
- Arc carbone : grande dispersion spectrale. La structure du matériau favorise l'apparition d'harmoniques fréquentiels réduisant significativement la dispersion fréquentielle. → Voir section 0 limitation de la méthode IDS par STFT.

Dans un premier temps, les méthodes proposées au cours de ces travaux de thèse prennent en compte que les sauts par "drop" compris entre 4 et 15%. L'utilisation et l'exploitation de l'identification des matériaux fait partie des perspectives d'évolution des méthodes proposées.

4.2 Extraction des composantes stochastiques de l'arc

Traitement préliminaire

L'identification de l'arc passe par la reconnaissance de sa signature électrique (bruitée). C'est la voie exploitée par de nombreux auteurs qui identifient les perturbations d'arc comme étant un bruit de nature blanc gaussien ou brun [YaHW15] [ScNo09] [PHKB04] (*Johnson et al. 2011*) [KePa99]. Les observations faites section 1.2 relèvent également l'impact des conditions environnementales (nature du câble/contact, section impliquée, température, pression, etc.) sur le comportement de ces perturbations.

De nombreux travaux utilisent une méthode de filtrage pour sélectionner soit les signaux de haute fréquence [ScNo09] soit les composantes spectrales dans une bande réduite [WeWB14].

Le principe du "**résidu**" est couramment utilisé en automatique pour diagnostiquer la divergence de comportement d'un système modélisé et déceler une anomalie fonctionnelle à partir de l'extraction du bruit présent dans un système. Par sa réactivité et son dynamisme propre aux modèles, l'obtention du résidu présente une fidélité supérieure aux stratégies de filtrage (passe haut). En revanche, *les synthèses de résidus demandent une connaissance très fine du système à commander ou à diagnostiquer* [Mous11].

En l'absence de modélisation du système à surveiller, le résidu est élaboré par une estimation **a-priori** d'après un signal source. Ainsi, l'estimateur détermine une modélisation par apprentissage (estimation polynomiale, etc.) ou par traitement latent. La différence obtenue d'après cette estimation définit le **résidu** (Figure 4-11).

L'objectif des travaux qui suivent est de déterminer une méthode alternative permettant d'extraire une partie de l'information pouvant être estimée comme un bruit considéré comme "anormal".

L'approche proposée a pour objectif :

- De retirer la composante continue d'un signal
- D'extraire les perturbations "gaussiennes" du signal d'arc
- D'absorber les "écarts" erratiques du signal
- La méthode doit répondre à une dynamique importante en particulier en cas de transitoires de charge.

4.2.1 Principe de l'estimation a priori (latente) et mode d'évaluation des performances

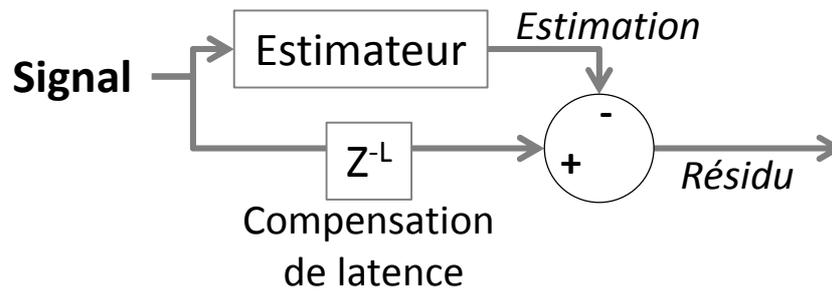


Figure 4-11 : Estimation du résidu *a priori*

Le résidu, image des perturbations de signal produites par l'arc électrique, s'obtient par la soustraction du signal mesuré avec la tendance du signal qui est estimé en temps réel. Cette estimation, à défaut d'être modélisable, est approximée par différent biais : Estimation polynomiale, Filtrage, Tendance, Projection.

Le principe de création du résidu par le différentiel d'une approximation du signal est représenté par la Figure 4-11. L'étape d'estimation n'est pas sans conséquence sur le traitement 'temps réel' et engendre une latence compensée avant d'effectuer la comparaison (latence dépendante de la fenêtre de l'estimation).

Parmi 3 méthodes d'estimations/approximations testées au cours de ces travaux, 2 sont présentés par la suite :

- Retrait de la composante basse fréquence par filtrage (PB ou à moyenne glissante)
- Détermination de la tendance par reconstruction de pentes ou rampes successives.

Bien qu'ayant été évaluée au cours des travaux de thèse, l'estimation polynomiale n'est pas retenue pour reconstituer le signal de référence. En effet, cette méthode nécessite une estimation sur un échantillon de temps finis, lourds à répéter en temps réel.

La stratégie des méthodes d'estimation et approximation du résidu étudiées est énumérée par la suite. L'évaluation de leurs performances est décrite en partie 4.2.2

a) Méthodes d'estimation par filtrage PB : moyenne médiane

Le filtrage par moyenne glissante effectuée l'équivalent d'un filtrage passe-bas de fréquence de coupure $F_c = \frac{F_e}{N}$. Le principe de la moyenne glissante est rappelé par la Figure 4-12.

Avec un pas de glissement de 1, le calcul de l'estimation $Y(k)$ se résume à :

$$Y(k) = \frac{1}{W} \sum_{p=k-\frac{W}{2}}^{p=k+\frac{W}{2}-1} y(p) \quad (4.2.)$$

Si le signal est suréchantillonné, il est possible d'appliquer une réduction par une période de glissement T supérieur à 1 selon :

$$Y(n \cdot T) = \frac{1}{W} \sum_{p=n \cdot T - \frac{W}{2}}^{p=(n \cdot T) + \frac{W}{2} - 1} y(p) \quad (4.3.)$$

Avec :

W : largeur de la fenêtre glissante

T : période (pas) de glissement adjacent

La fréquence d'échantillonnage est alors réduite de $F_e' = \frac{F_e}{T}$ lorsque $T > 1$.

De façon implicite, la moyenne glissante médiane introduit une latence entre le signal initial et l'estimation de $L = \frac{W}{2 \cdot T}$.

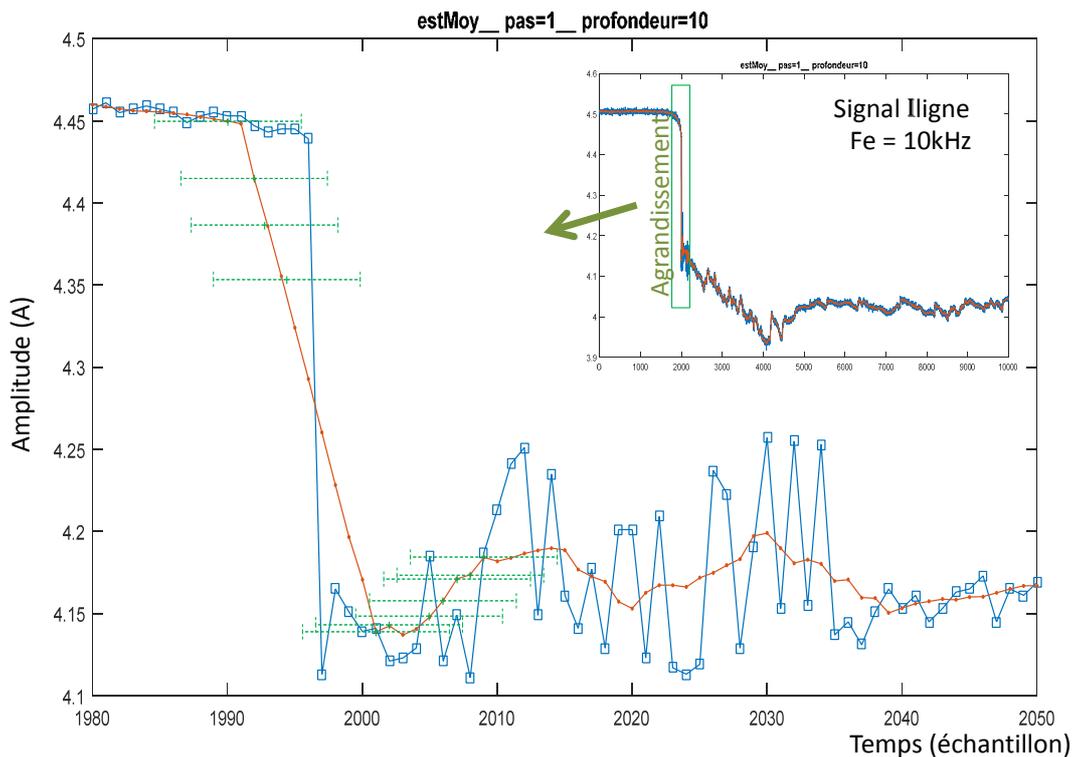


Figure 4-12 : Principe moyenne glissante médiane en $\pm \frac{W}{2}$

b) Méthodes d'estimation par estimation à filtre passe-bas

Le filtrage numérique est capable d'effectuer tous types de filtrage linéaires de façon paramétrable. Il est également une alternative économique en ressource de calcul (buffer, opérateur, etc.).

Pour générer l'estimation d'une tendance de signal, le filtrage étudié est de la forme :

$$H(z) = \frac{e^2}{4} \cdot \frac{1+2 \cdot Z^{-1}+Z^{-2}}{1-2 \cdot (1-e) \cdot Z^{-1}+(1-e)^2 \cdot Z^{-2}} \quad (4.4.)$$

$$\frac{e}{\omega} = \frac{Fc}{Fe}$$

Avec :

Fe la fréquence d'échantillonnage

Fc la fréquence de coupure

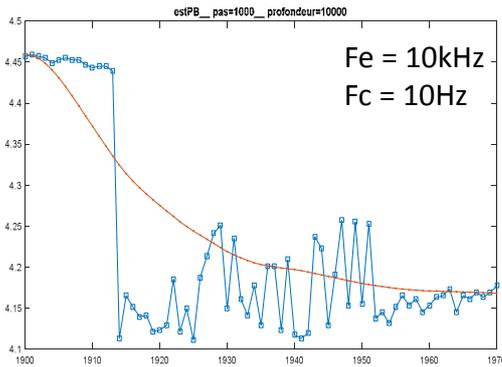


Figure 4-13 : Réponse filtre Fc=10Hz

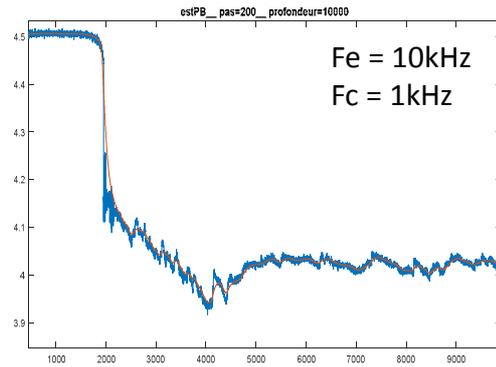


Figure 4-14 : Réponse filtre Fc=1kHz

Pour une fréquence de coupure basse, l'estimation présente une faible réponse en fréquence. Cette latence engendre la création d'artéfacts qui crée au niveau du résidu une partie de composante continue lors de transitoires (Figure 4-13). En revanche, si la fréquence de coupure est élevée, une partie des informations basses fréquences est perdue.

c) Méthodes d'estimation par estimation en rampes

La méthode d'estimation 'a priori' par rampes successives réalise un suivi du signal. L'inclinaison de ces rampes s'évalue toutes les périodes T . La pente est calculée en prenant le point courant et le point à la distance W .

Pour effectuer cette estimation, il est nécessaire de disposer d'une mémoire de W points.

L'estimation $Y(k)$ illustré Figure 4-15 se transcrit par l'opération :

$$Y(k + T) = Y(k) + \text{pente} \cdot T \quad (4.5.) \quad \text{pente} = \frac{y(k+W) - Y(k)}{W} \quad (4.6.)$$

$$= Y(k) + \frac{y(k + W) - Y(k)}{W} \cdot T$$

Avec :

Y le signal estimé

y le signal initial

W la largeur (distance) d'estimation (ligne de mire)

T la période d'estimation ($T \leq W$)

La pente de la rampe à appliquer est déterminée à partir de la valeur de l'estimation à l'instant k et de la valeur du signal à l'instant $k + W$ espacé d'une distance de W points.

La projection de la pente à la distance W est réévaluée toutes les périodes T (avec $T \leq W$).

Le point de départ du calcul de la pente correspond à la dernière valeur de la rampe à l'instant $k \cdot T$.

L'estimation introduit une latence de T points avec le signal original.

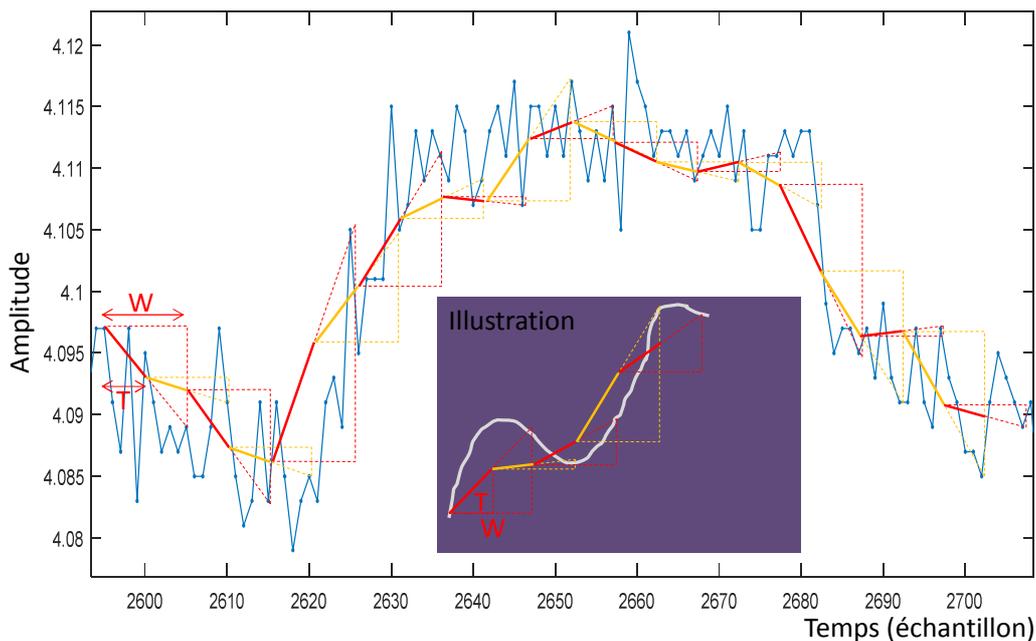


Figure 4-15 : Illustration explicative de l'estimation par rampe

d) Méthodes d'estimation par estimation de pentes

Cette méthode est similaire à celle du paragraphe précédent. En revanche les pentes sont réévaluées avant que la rampe aboutisse à T_0+W . L'angle ainsi obtenu est reporté bout à bout à l'instant T_0+T . Cette modification d'inclinaison à $T < W$ implique la nécessité de compenser la réduction par un coefficient correcteur $\alpha = \frac{T}{W} + \frac{1}{W}$ où T est la période de calcul et W la période d'estimation de l'angle.

L'estimation interprétée Figure 4-16 se formalise par :

$$\begin{aligned}
 Y(k + T) &= Y(k) + \text{pente} \cdot T & (4.7.) \\
 &= Y(k) + \frac{y(k + W) - y(k)}{W} \cdot T * \alpha & (4.8.)
 \end{aligned}
 \qquad \text{pente} = \frac{y(k+W) - y(k)}{W}$$

Avec :

y le signal initial

Y le signal estimé

W la largeur (distance) d'estimation (ligne de mire)

T la période d'estimation ($T \leq W$)

$\alpha = \frac{T}{W} + \frac{1}{W}$ le coefficient correcteur d'amplitude

Ce mode d'estimation introduit une latence de $(W - T)$ entre le signal original et le signal estimé.

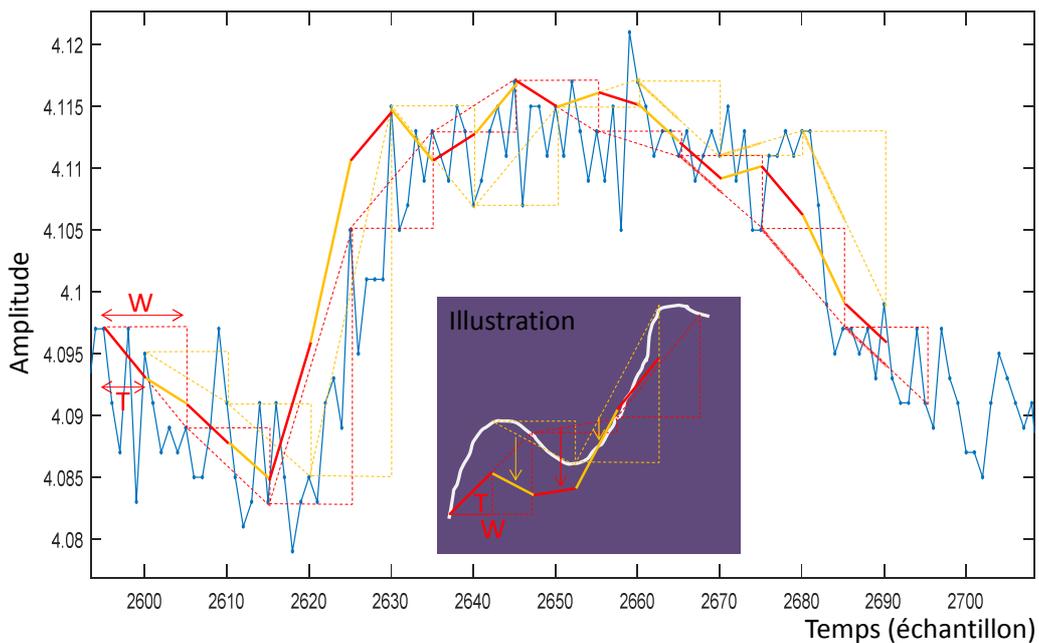
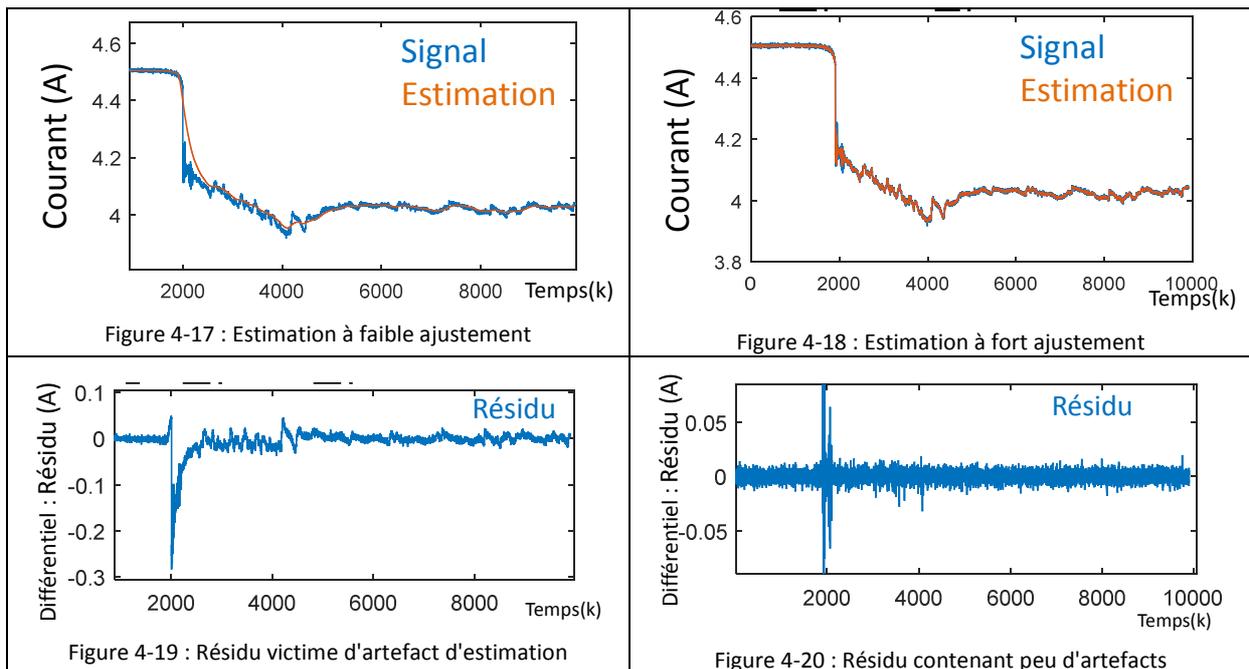


Figure 4-16 : Illustration explicative de l'estimation par pente

4.2.2 Performance de la méthode d'extraction de bruit

L'ambition de la technique du résidu est d'avoir une estimation dynamique qui suit rapidement les variations du signal sans transmettre d'artefacts (BF) au résidu lors de transitoires de charge par exemple. Toutefois, l'estimation ne doit pas absorber le bruit produit par les perturbations d'arc afin qu'elles se retrouvent dans le résidu et puissent être analysées.

À titre d'exemple, la Figure 4-17 présente un signal et un estimateur à faible dynamique de réponse. Le résidu correspondant Figure 4-19 comporte des perturbations importantes (artefact) liées en particulier à la transition. La Figure 4-18 présente un estimateur capable de poursuivre de manière plus fidèle le signal. Le résidu Figure 4-20 est à la fois exempt de composante continue et l'effet de la transition dans le signal transmet moins de perturbations au résidu.



Une méthodologie d'évaluation des performances est proposée dans la suite.

Principe de l'évaluation qualitative du résidu et de l'estimation

La corrélation informe sur le degré de vraisemblance de 2 signaux entre eux. La proposition inspirée de la méthodologie de [[Laco09] chapitre 3] consiste à évaluer la qualité du résidu en comparant la distribution des signaux calculés à l'aide d'une variance temporelle (écart type glissant). (Figure 4-21)

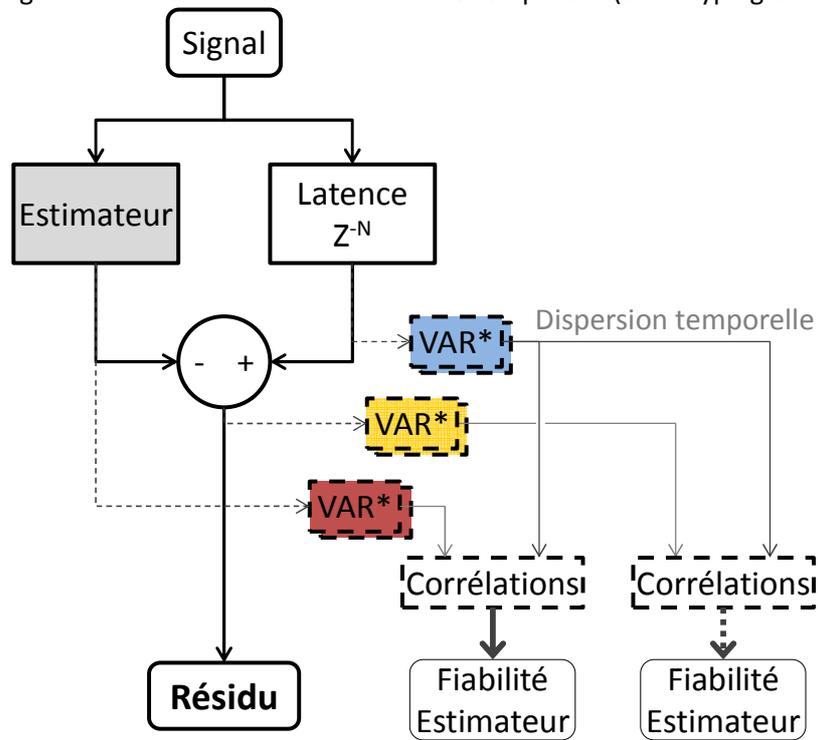


Figure 4-21 : Principe d'évaluation qualitative des estimations

La fidélité du bruit véhiculé par le résidu est doublement vérifiée en comparant la dispersion du signal sur 2 fenêtres temporelles différentes : 100 μ s et 1ms.

La corrélation de la distribution des signaux en 2 temps compare 2 niveaux de bruits :

- Les "Méso-Variations" (notion mésoscopique section 1.2.3) qui lient le signal au mouvement dynamique de l'arc sur les électrodes
- Les "Micro-Variations" potentiellement dues au mouvement (rotation) de pied d'arc (voir section 1.2.4 Effet sur la distribution des bruits électriques de l'arc. page22)

Pour exemple, les variances temporelles "méso" Figure 4-22 et "Micro" Figure 4-23 sont issue du résidu Figure 4-19. L'objectif de cette méthode est d'obtenir une variance du résidu similaire au signal d'origine et que la variance de l'estimateur soit nulle, car dénuée d'information spectrale.

La dispersion du signal original (en bleu) se retrouve dans le résidu (en jaune) alors que l'estimateur présente une distribution non négligeable sur le plan mésoscopique (Figure 4-22). Cela signifie qu'une partie de l'information "bruit" est retirée du résidu (perte d'informations).

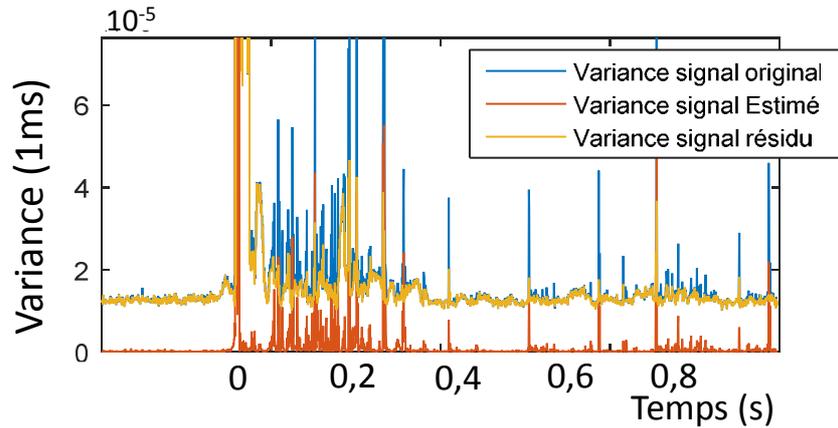


Figure 4-22 : Variance "Mésos" 1ms
(moyenne glissante T=10, W=1000)

Sur le plan "Mésos", on identifie que la distribution du signal original (courbe en **Bleue**) avoisine $1,2 \cdot 10^{-5}$ puis est comprise entre $1,5$ et $4 \cdot 10^{-5}$ environ pendant l'arc (à $t > 0s$). Le résidu (courbe **Jaune**) présente une dispersion d'amplitude similaire à celle du signal initial. Mais la dispersion du signal estimé (courbe **Orange**) qui ne reste pas proche de 0 pendant l'arc indique qu'une partie de l'information spectrale est contenue par le signal approximé de l'estimation.

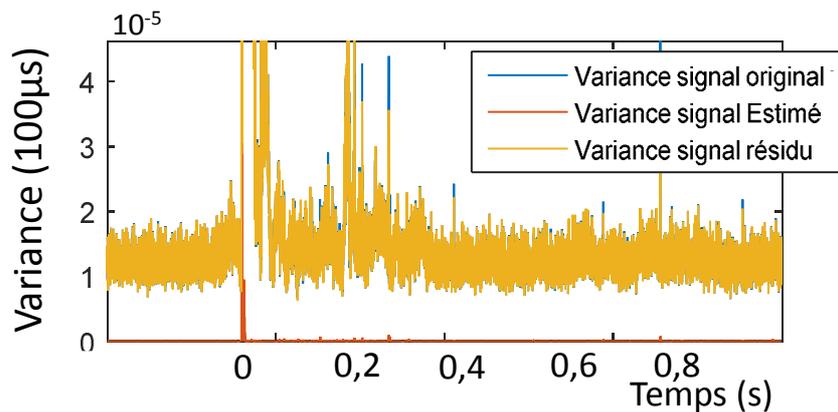


Figure 4-23 : Variance "Micro" 100µs
(moyenne glissante T=10, W=1000)

Sur le plan "micro", on identifie que la distribution du signal original (courbe en **Bleue**) et du résidu (courbe **Jaune**) se superposent. Le signal estimé (courbe **Orange**) ne présente pas beaucoup ($\cong 0$) d'information sur les variations inférieures à 100µs de fenêtre.

Par ces 2 visions, il est possible de dire que l'estimateur absorbe une partie des perturbations basse fréquence ($< 1kHz$), mais transmet au résidu les éléments de plus de 10kHz

Pour comparer les performances des différentes méthodes d'estimation, la distribution temporelle (par variance glissante) des signaux originaux, estimation, résidu, sont comparés entre eux par corrélation. Cette corrélation donne un résultat de fiabilité.

Résultats

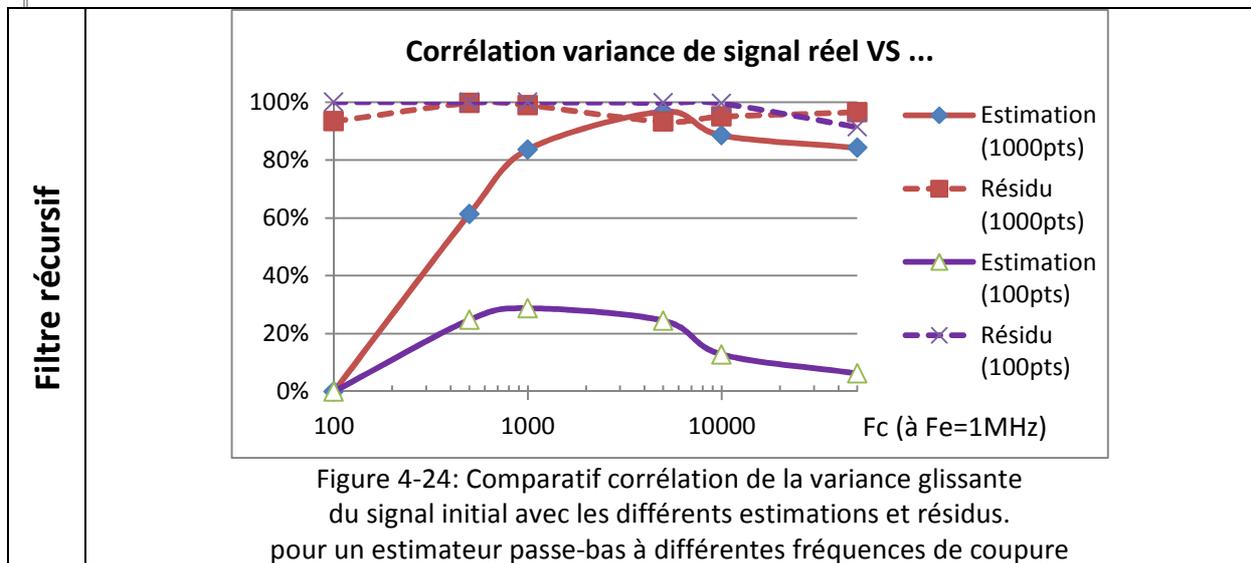
Tel que décrit Figure 4-21, la transcription du score des corrélations des dispersions (variances temporelles glissantes) se retrouve dans les indicateurs suivants. Ils expriment les performances de chaque méthode selon leurs paramétrages : Largeur de fenêtre, périodicité d'estimation, fréquence de coupure, etc. L'objectif d'un estimateur optimum est de se rapprocher d'une approximation fidèle (soit une estimation corrélée à 100% avec le signal original) et d'un résidu véhiculant l'intégralité des bruits générés par l'arc (soit 100% de corrélation entre la dispersion du résidu et celle du signal source).

Les 4 tracés (résidu méso, résidu micro, estimation méso, estimation micro) sont représentés sur une seule et même courbe comme suit :

Légende	En rouge ■ Résultat sur la dispersion méso-scopique (fenêtre glissante 1000points à 1MHz) Reflète des perturbations dynamiques produites par l'arc
	En mauve ■ Résultat sur la dispersion micro-scopique (fenêtre glissante 100points à 1MHz) Reflète des bruits produits par l'arc
Trait plein —	corrélacion de la variance glissante du signal estimé avec le signal original
Pointillés - - -	corrélacion de la variance glissante du signal résiduel avec le signal original
Signal original réalisé sous tension 270 V _{DC} , charge 60 Ohms (4.5A) par écartement d'électrodes	

Filtre récursif passe-bas Figure 4-24 :

Le filtrage présente une grande corrélation entre la dispersion du résidu et du signal (pointillés - - -), quelle que soit la durée d'observation. En revanche lorsque l'estimation est peu dynamique, par exemple à 100Hz (Figure 4-17, Figure 4-19), la fidélité de l'estimation est nulle. Alors qu'à 10kHz (Figure 4-18, Figure 4-20), le résultat à 1kpts de fenêtrage offre une dispersion de 86% de l'estimateur.



Pour le filtre récursif, de manière expérimentale, la meilleure estimation se trouve entre $F_c=1\text{kHz}$ et 50kHz . Cela s'obtient en confondant les résultats compris entre 99% et 91% pour les bruits transmis au résidu, et la corrélation de l'estimation. Ces résultats présentent une performance moindre comprise entre 83% et 96% sur la fenêtre 1000points et chutent à moins de 30% sur la dynamique de 100points.

Ce mode d'estimation ne présente donc pas une haute fidélité quant au signal estimé.

Filtre passe-bas par moyenne glissante Figure 4-25 - Figure 4-26 :

Cette estimation présente une grande fidélité ($\cong 100\%$) pour $F_c < \frac{F_e}{100}$. Au-delà, c'est le résidu qui devient fidèle et supérieur à 90% avec une moyenne glissante à chaque point.

Moyenne glissante

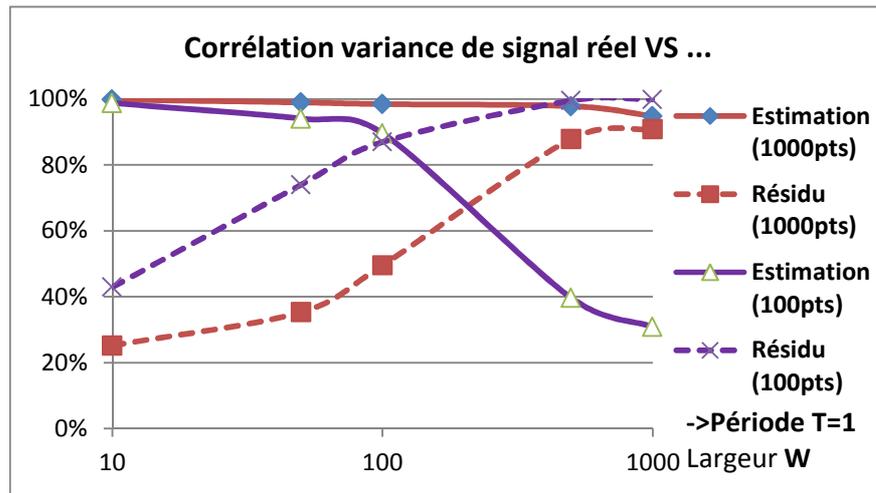


Figure 4-25 : Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. pour différentes tailles de fenêtres de périodicité T=1 point

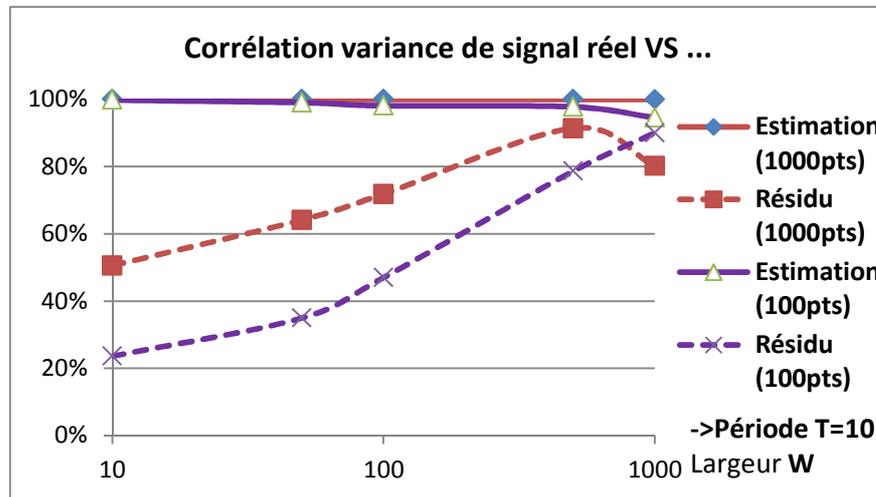


Figure 4-26 : Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes tailles de fenêtres de périodicité T=10 points

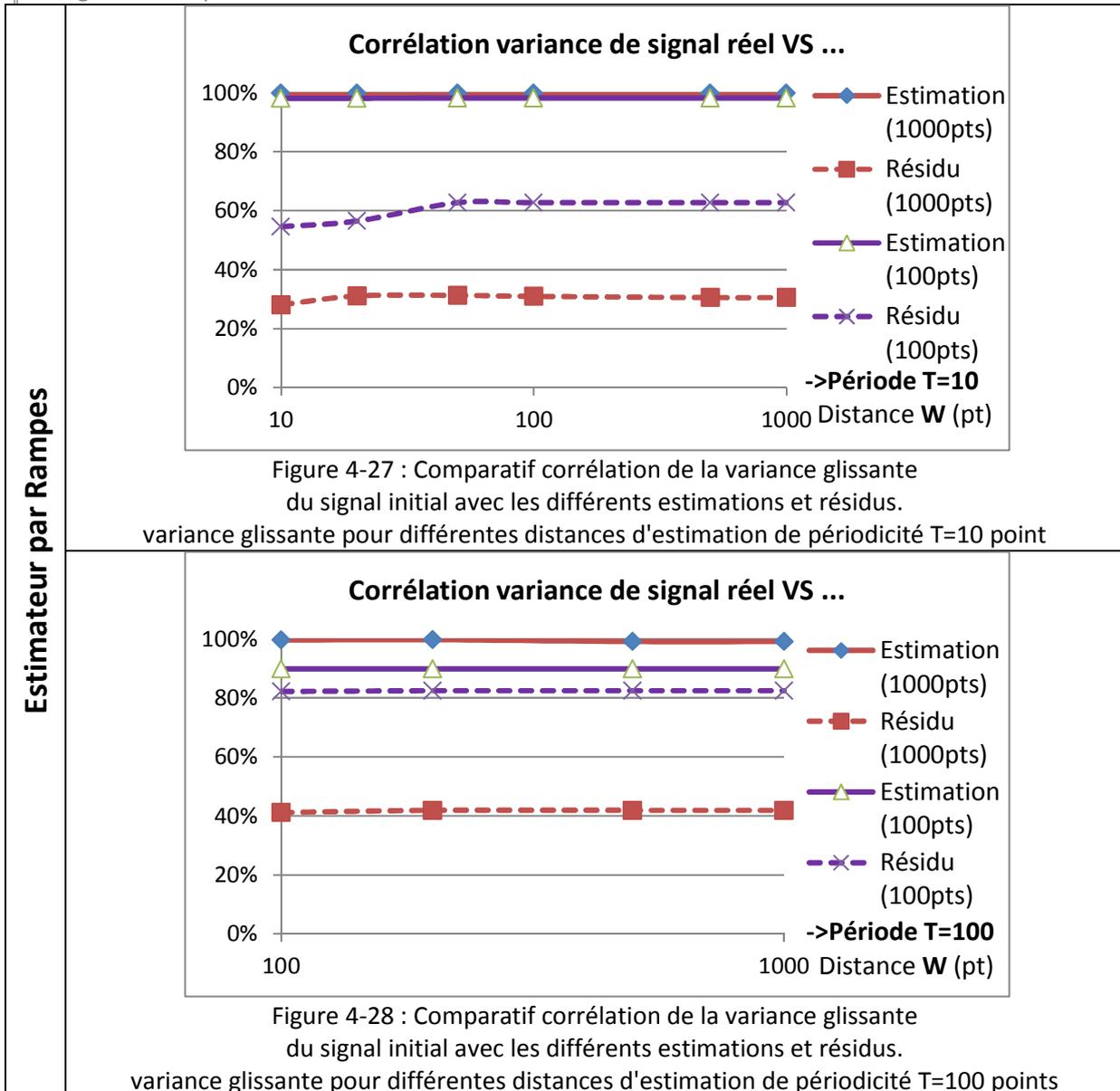
Par moyenne glissante, les meilleures performances se trouvent sur l'estimateur de périodicité 10 points, de largeur de fenêtre 500 points.

Estimation par rampes successives Figure 4-27-Figure 4-28 :

Ce mode d'estimation présente une constance de résultats pour toutes les valeurs de W.

La représentativité du résidu s'améliore lorsque la ligne de mire est évaluée avec une périodicité plus grande au détriment de la dynamique du signal estimé.

À noter que cette méthode introduit une composante non linéaire au signal à chaque changement d'angle des rampes successives.



Pour chaque périodicité T, les performances de l'estimateur par rampes successives sont sensiblement identiques, quelle que soit la largeur de fenêtre. Il est à noter que l'estimation est meilleure avec une périodicité 10pts, mais c'est à T=100pts que le résidu est le plus fidèle.

Estimation par report de pentes Figure 4-29-Figure 4-30 :

Cette technique présente les mêmes caractéristiques de dispersion que le filtrage par moyenne glissante lorsque la période d'évaluation $T=10$ pts. En revanche, son estimation est très dégradée sur la dynamique du moment où la ligne de mire n'est pas actualisée régulièrement avec une période $T \geq 10.W$ (changement de trajectoires rares et non amorties).

Estimateur par Pentés

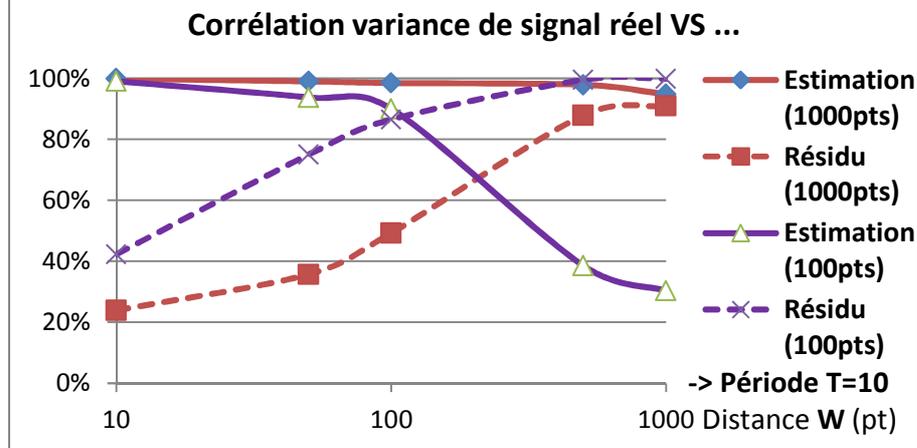


Figure 4-29: Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité $T=10$ point

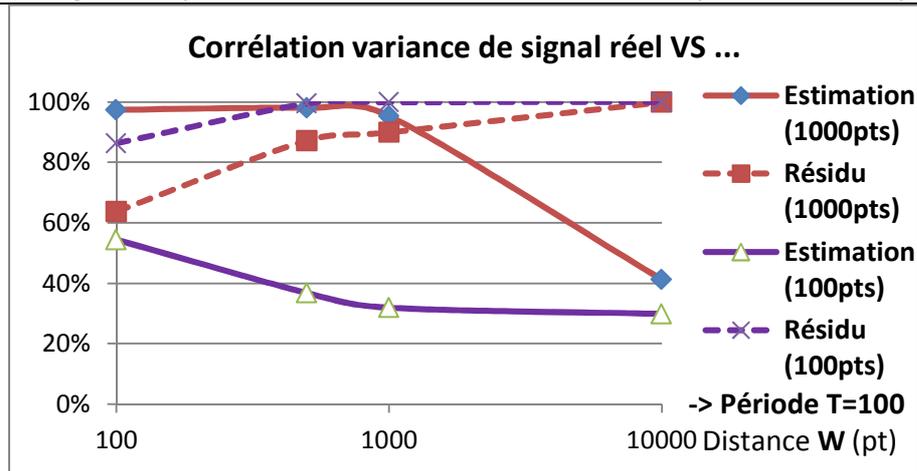


Figure 4-30: Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité $T=100$ point

De périodicité $T=10$ (Figure 4-29), l'estimation par pente présente des performances similaires à l'estimation par moyenne glissante. Dans cette configuration, le résidu qui véhicule le plus d'information se trouve à partir de $W > 500$ points bien que la fidélité de l'estimation se dégrade à partir de $W = 500$ pts..

Contrainte de complexité et Conclusion

Les méthodes proposées présentent chacune leurs propriétés qui nécessitent d'être judicieusement adaptées aux besoins de l'analyse qui se trouve après le calcul de résidu.

Ces estimateurs se résument à 2 notions :

- La dynamique
Elle s'apprécie par la réactivité de l'estimateur à produire une approximation juste lors de transitions franches.
- La fidélité d'estimation et de résidu.
Elle s'évalue par la capacité à transcrire le contenu informationnel du signal dans la plage désirée sans en altérer le contenu.
Ces caractéristiques se retrouvent par la transmission d'artefacts et composante basses fréquences lorsque l'estimateur n'est pas capable de suivre le signal et qu'il tronque l'information spectrale désirée au résidu.

En revanche, les estimateurs par pentes et rampes génèrent un signal de référence discontinu de périodicité T et peut introduire une composante spectrale parasite.

Dans l'optique d'établir un algorithme de détection pour l'embarqué (microcontrôleur temps réel), la complexité de mise en œuvre de la méthode est à évaluer. Le Tableau 10 dresse un récapitulatif de sa complexité matérielle et également en termes de dynamique d'adaptation sur le plan temporel (latence).

Tableau 10: Complexité des estimateurs 'a priori'

Opération	Additionneurs Soustracteurs	Multiplication Division	Profondeur Mémoire Buffer	Latence (dynamique)
Passe bas	4	6	3	<i>En fonction de (F_c, F_e)</i>
Moyenne glissante ($T=1$)	2	1	$W + 1$	$\frac{W}{2}$
Moyenne glissante ($T>1$)	W (ou $2.T$)	1	W (ou $W+T$)	$\frac{W}{2} \cdot T$
Rampes	2	2	W	T
Pentes	2	3	W	$(W - T)$

Pour nos travaux, l'estimateur par moyenne glissante est privilégié avec une périodicité $T=1$ et de fenêtre 125 points. Facile à implémenter sur microcontrôleur, il présente le compromis d'un résidu compris entre 50 et 87% de fidélité et une estimation similaire à 86-98%. Ce mode d'estimation est appliqué aux critères d'analyse qui sont exposés par la suite.

4.3 Critères d'analyse proposés pour la détection de défaut d'arc

La reconnaissance de défauts électriques d'arc n'est pas une tâche facile. Trompée par d'autres situations nominales, mais similaires, la détection doit être dotée de critères aptes à déceler principalement les perturbations produites par un arc en s'affranchissant des bruits normaux sur la ligne.

Pour faire cette différenciation entre défaut d'arc et bruit de ligne, 5 critères seront présentés dans la suite. Il s'agit de :

- L'analyse de l'énergie du bruit perturbateur induit par l'arc
- L'observation de la dispersion du bruit par variance (écart type) temporelle
- La vraisemblance des bruits notamment au cours des transitoires
- L'analyse fréquentielle
- L'indice de dispersion spectrale (IDS/SDI)

Chaque méthode proposée par la suite fait l'objet d'une présentation similaire qui comprend :

- Le Principe général, avec la description de la chaîne de traitement du signal proposée étape par étape selon les 2 cas témoins en situation d'arcs et sans arc (noArc)
- La méthode est ensuite éprouvée selon la population de signaux sur charge R et RL de la base de données pour en afficher le résultat (score) et aborder la notion de discrimination
- La détection est conditionnée par le choix d'un seuil performant qui présente soit le plus de détections, le moins de fausses détections ou le moins d'erreurs).
Ces performances sont présentées à la fois sous la forme de matrice de confusions et de courbes de ROC.
- La notion de seuil est abordée selon 2 principes : le seuil discriminant fixe et le seuil discriminant dépendant des conditions environnementales.

Au terme de la présentation des méthodes individuelles, une proposition et perspective de combinaison des détections est faite sous la forme d'une détection multicritères.

Remarque :

Les résultats présentés ci-après correspondent aux fruits du traitement des données acquises selon le protocole établi section 3.3 dans les mêmes conditions expérimentales (notamment alimentation Chroma). Les seuils sont donnés à titre indicatif pour les conditions expérimentales (sonde spécifique, sensibilité des équipements, vulnérabilité CEM, calibre, alimentation, charge). Pour reproduire ces expériences, une mise au point d'adaptation avec les différents équipements est requise.

4.3.1 Critère 1 : Puissance du bruit d'arc (PR : Puissance du Résidu)

La littérature regorge de propositions d'analyse du niveau de bruit du signal électrique pendant un arc [[ScNo09] [PHKB04] [JPLP11] [KePa99] (...)]. De façon générale, ces méthodes quantifient les perturbations générées par la dynamique de l'arc (valeur RMS du signal filtré sans composante continue, dispersion, etc.). → Voir section 2.3.2.1.

En raison de l'évolution des signatures d'arcs avec l'intensité du courant, ces méthodes sont fortement dépendantes des paramètres expérimentaux (intensité, bruit, SNR, etc.). C'est pourquoi les travaux présentés ici proposent une adaptation des critères aux conditions expérimentales.

4.3.1.1 Principe général

La méthode d'analyse de la puissance du bruit proposée ici se base sur le bruit résiduel, excluant les variations basses fréquences (thermique et dynamique de l'arc ou de la charge).

La qualification de ce critère réside sur une observation temporelle autour d'une transition négative pouvant être produite par un arc (#méthode expliquée en 4.1).

La durée d'observation est de 101ms dont 1ms avant l'apparition de la transition de courant provoqué par l'arc série.

Le diagramme de principe est ci-dessous Figure 4-31 :

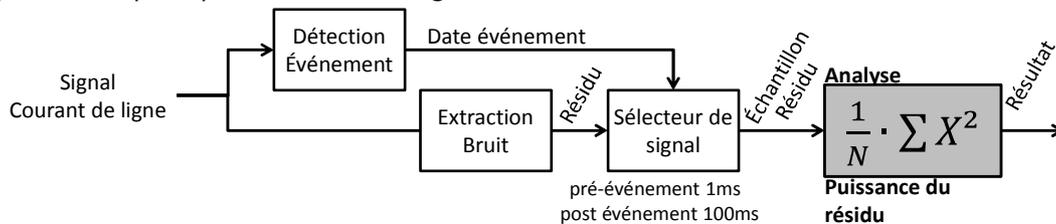


Figure 4-31 : Principe de la méthode de détection par calcul de la puissance du bruit d'arc

Après extraction du résidu, le calcul de la puissance P_r est obtenu par :

$$Pr(X) = \frac{1}{N_p} \cdot \sum_{N_p} X(n)^2 \quad (4.9.)$$

Avec :

- X Résidu du courant de ligne (Np valeurs)
- Np Nombre de points de la fenêtre = 20000+200
- P_r "Puissance" du résidu (en A / Te avec $Te=1/200kHz$)

La fenêtre d'analyse ayant une durée de 101 ms (1ms avant transition, 100ms après transition). Avec une fréquence d'échantillonnage de 200kHz pour ce cas d'étude, la fenêtre contient 20200 échantillons (N_p).

L'illustration de chaque étape de la méthode est exposée en fonctionnement normal et en présence d'arcs série Figure 4-32.

La détection d'évènement est réalisée par la méthode de détection du 'drop' proportionnel au courant évoqué en partie 4.1.3.

L'extraction du bruit est obtenue par le pseudo-estimateur à moyenne glissante cité en section 4.2.2.

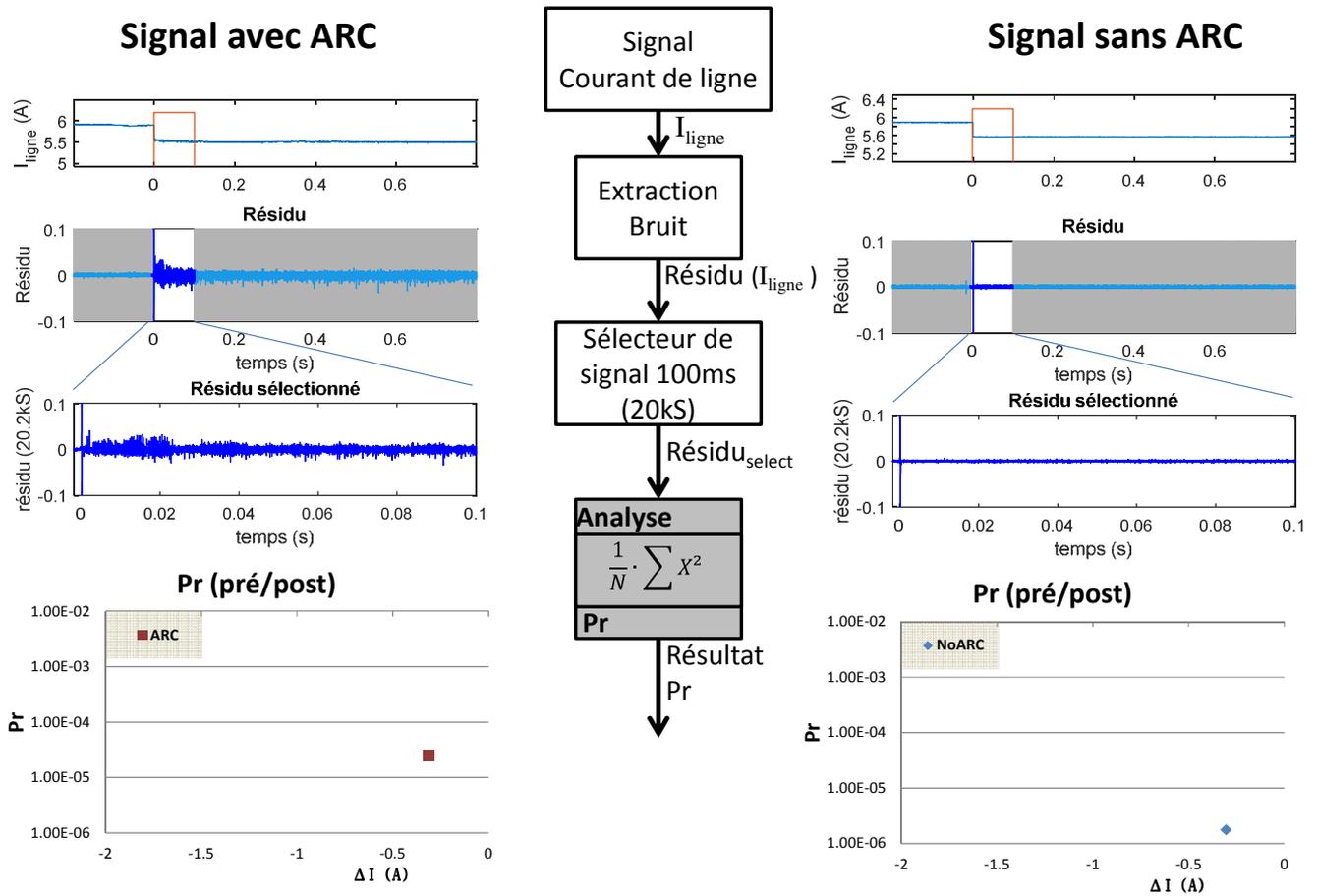


Figure 4-32 : Exemple de traitement de la puissance du résidu

Les résultats Pr sont présentés en fonction de la valeur du saut de courant observé au moment de l'apparition de l'arc ΔI . Pour un même 'drop', l'arc présente une puissance du résidu de l'ordre de 10^{-4} alors que sans arc la puissance du bruit résiduel est inférieure à 10^{-5} .

4.3.1.2 Discrimination de défaut

Les résultats de la puissance du résidu Pr sont exposés Figure 4-33 pour une population de 449 Arc sur charges R et 685 transitions sans arc (valeur maximum de comptage uniformisée). Les deux populations se distinguent : sans défaut d'arc (R+RL) les résultats sont inférieurs à $2,2 \cdot 10^{-3}$, les scores⁴ avec arc (R) s'étalent de 10^{-3} à 10^{-4} et présentent un chevauchement avec les scores sans arcs.

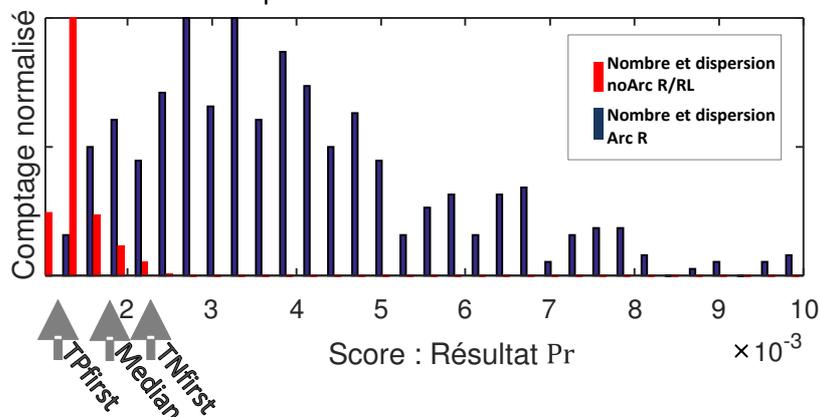


Figure 4-33 : distribution normalisée des résultats par analyse de puissance du résidu 449 Arc sur charges R : 685 transitions sans arc sur charge R(120μH) / RL(1mH→34mH)

En raison du chevauchement des 2 populations, l'utilisation de seuil discriminant aux limites de chaque population (positives ou négative) provoque de nombreuses erreurs de détection telle qu'illustre le Tableau 11 sur les charges R (449 cas d'arc R & 419 cas de transition sans arc R).

3 stratégies sont évaluées :

- TPfirst favorise la détection (au détriment des faux positifs),
- TNfirst limite les fausses détections (mais reste aveugle à une grande partie des cas positifs),
- Le seuil médian fait le compromis à l'intersection des dispersions des cas positifs et négatifs.

Tableau 11 : Résultat de détection par seuil fixe avec la méthode 1 : Puissance du résidu (sur charges d'arc résistives)

Charges R	Cas Positif (449 R)		Cas Négatif (419 R)		Justesse	seuil
	TP	FN	FP	TN		
TPfirst	449	0	157	262	81.91%	SeuilTPfirst = min(Scores Positifs) = $1.3 \cdot 10^{-3}$
Median	435	14	3	416	98.04%	SeuilMedian = $1.5 \cdot 10^{-3}$ Intersection de la distribution normale P&N à meilleure justesse (Accuracy)
TNfirst	427	22	0	419	97.47%	SeuilTNfirst = max(Scores Négatifs) = $1.7 \cdot 10^{-3}$

Le choix d'un seuil discriminant basé sur la dispersion des scores apporte des performances honorables (près de 98%) de bonnes détections (Justesse/'Accuracy'), mais parmi lesquels persistent de nombreuses erreurs de fausses détections (FP, FN).

Ces performances à partir de seuil discriminant fixe sont visualisées par la courbe de ROC présentée en Figure 4-34. Deux informations sont alors perceptibles sur cette représentation. D'une part, la méthode est très discriminante, car elle est proche de l'axe vertical (taux de fausse détection faible) et horizontal supérieur (taux de bonnes détections élevées). D'autre part, l'écartement de la courbe sur le coin supérieur gauche indique que la justesse n'est pas à 100%.

⁴ Score : Correspond à un ou plusieurs résultats des méthodes

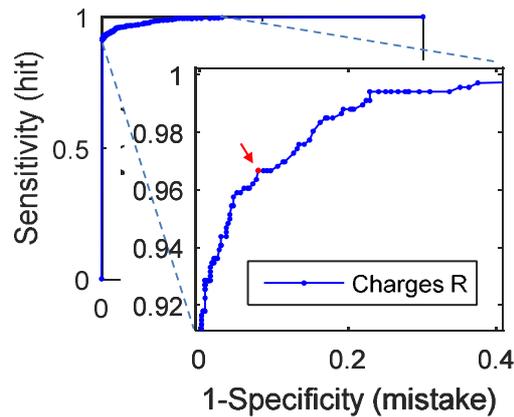


Figure 4-34 : Courbe de ROC de la méthode de la puissance du résidu

Afin de mettre en évidence l'éventuelle incidence du courant ou de la variation de courant au moment de l'arc, les Figure 4-35 présentent la distribution des scores à l'aide d'une représentation 2/3D en fonction de la charge (courant I) et de la variation d'intensité (drop $\Delta I, dI$).

Cette vue révèle une part de confusion des scores en fonction de la charge initiale (intensité I avant variation). Notamment sur les cas "sans arcs" de variations (de 1% à 15%) produites par une charge numérique variable. Celle-ci introduit de fortes perturbations et trouble le diagnostic du signal (SNR < à la normale dans le cas de fortes transitions \rightarrow Bruit).

En revanche, les scores en fonction de la variation de courant (drop, ΔI) expriment une distinction franche entre les cas d'arcs (●) et les cas sans arcs (●) sauf en présence d'inductance importante (>32mH) où l'information bruitée est lissée et ne se transmet pas au résidu pour être calculé (●).

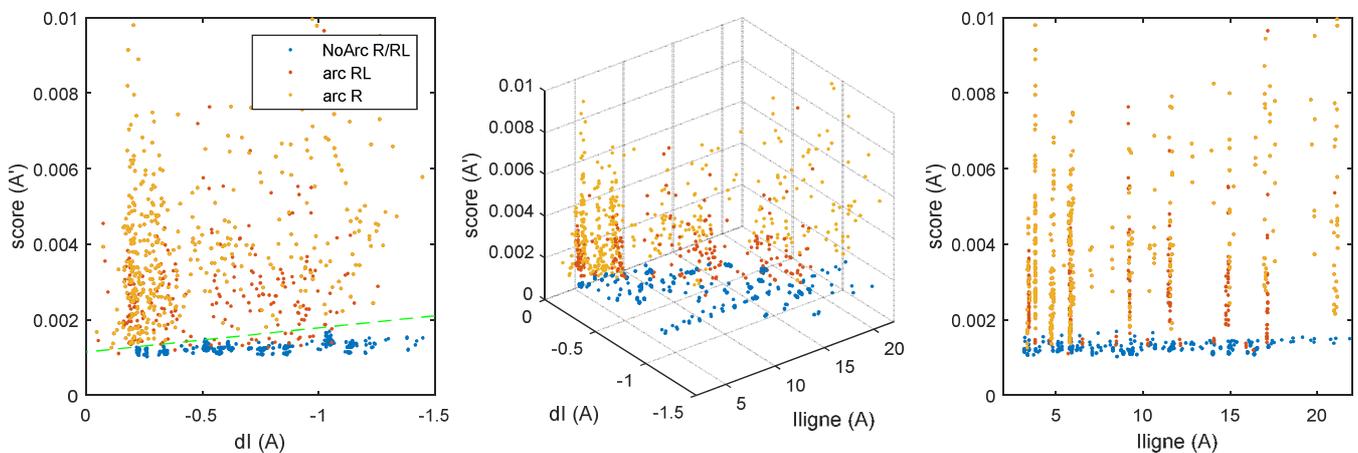


Figure 4-35 : Scores/résultats "Pr Puissance du résidu" sur 1ms+100ms d'arc selon le domaine d'étude bidirectionnel $I_{init}, \Delta I$

résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante ($F_c=8kHz$) sur un signal $F_e=200kHz$

La recherche d'un seuil idéal peut s'effectuer à l'aide de réseau de neurones ou par approximations successives. Pour cette situation, une simple pente affine de la forme $a \cdot \Delta I + b$ suffit. La recherche de seuil discriminant proportionnel à ΔI est confiée à un algorithme d'approximation. Initialement basée sur la méthode des moindres carrés à partir des points sans arcs, la recherche des coefficients a & b joue sur plusieurs tentatives de translations/rotation successives de la pente jusqu'à obtention d'une justesse maximum.

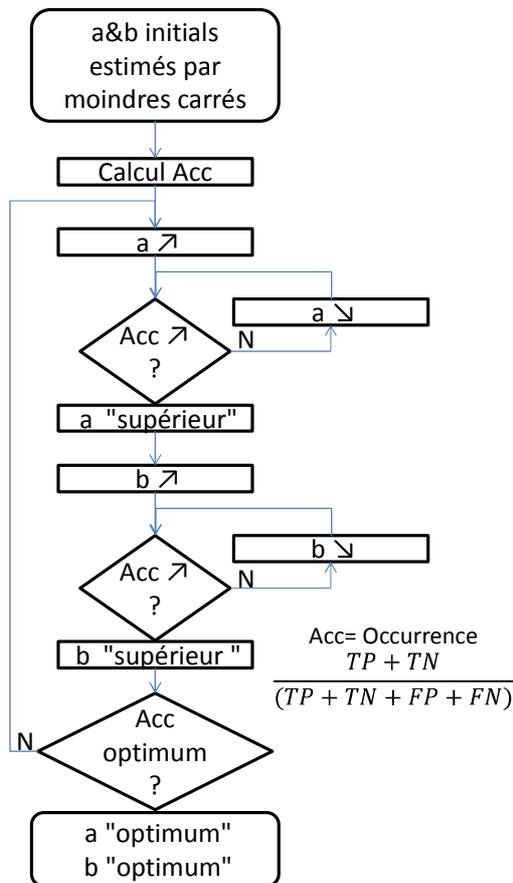


Figure 4-36 : Méthode d'approximations successives

Pour ce cas d'étude, les résultats offrent une performance sur charge d'arc résistive de 99.9% de bonne détection, avec uniquement 1 détection à tort parmi 449 Positifs (● arc R) et 419 Négatifs (● noArc R/RL).

Tableau 12 : Matrice de confusion par seuil adaptatif ΔI avec la méthode 1 : Puissance du résidu (sur charges d'arc R)

R	Positif (449)		Négatif (419)		Justesse	Seuil = $-639.98 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta I + 1.145 \cdot 10^{-3}$
	TP	FN	FP	TN		
F(Δ I)	449	0	1	418	99.91 %	

Nb : Faux positif (FP) rencontré sur une charge dynamique variable → Résonance du réseau RL 1mH lors de la commutation

L'usage d'un seuil identique pour les charges selfique (● 209 cas supplémentaires de 0.5mH à 34mH) procure les résultats de détection présentés sur le tableau suivant :

Tableau 13 : Matrice de confusion par seuil adaptatif ΔI avec la méthode 1 : Puissance du résidu (sur charges d'arc R+RL)

RL	Positif (658)		Négatif (419)		Justesse	
	TP	FN	FP	TN		
F(ΔI)	635	23	1	418	97.77%	Seuil = $-603.91 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta I + 1.1542 \cdot 10^{-3}$
Seuils fixes						
TPfirst	656	2	157	262	95.64%	SeuilTPfirst = $1.3 \cdot 10^{-3}$
Median	630	28	19	400	95.64%	SeuilMedian = $1.5 \cdot 10^{-3}$
TNfirst	600	58	0	419	94.61%	SeuilTNfirst = $1.7 \cdot 10^{-3}$

La courbe de ROC de synthèse ci-dessous montre l'efficacité de la méthode aussi bien par les seuils fixes que les seuils en fonction de ΔI .

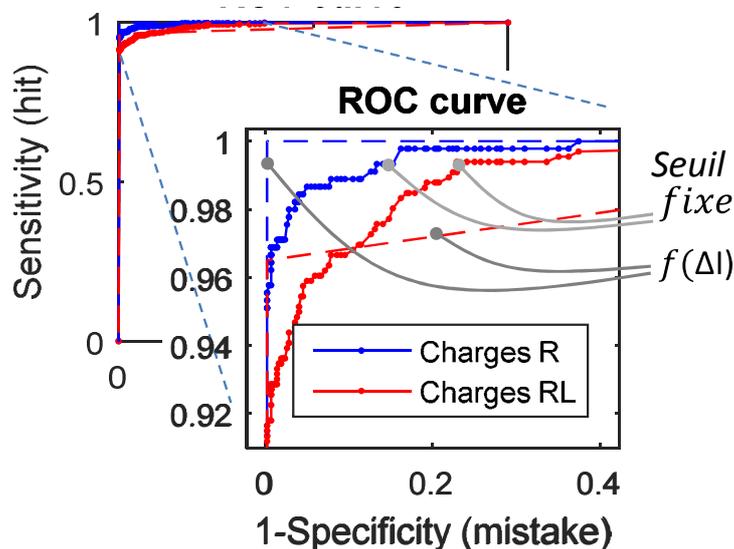


Figure 4-37 : Courbe de ROC synthèse de la méthode "Puissance du résidu"

Alors que pour les charges résistives, le seuillage fixe apporte des performances d'environ 98% de décisions justes sur les 868 signaux testés. L'utilisation de seuil proportionnel à la chute de courant de ligne (transitoire) produit 99,9% de bonnes détections avec juste 1 fausse détection sur un signal inductif qui présente peu de bruit pendant l'écartement des électrodes (arc à l'ouverture).

L'application de ces seuils aux défauts et charges inductifs offre plus de 95,6% de justesse par seuillage fixe, élevé à 97,8% à l'aide du seuil proportionnel à ΔI .

4.3.2 Critère 2 : Dispersion de l'autocorrélation du résidu (centralisation)

Les techniques de corrélation sont souvent utilisées dans l'air (vitesse de propagation moindre) pour localiser l'onde de pression d'un défaut d'arc par triangulation à l'aide de microphones [CPDS13, HaLe10]. Ces méthodes, bien que fonctionnelles sont souvent tributaires du bruit environnant. Sur les signaux électriques, la corrélation est également utilisée pour comparer le comportement d'une ligne de distribution, y déceler toutes déviations anormales et localiser la distance d'un défaut sur une grande distance [ShPZ08]. En revanche, cette méthode est délicate à mettre en place avec des longueurs plus restreintes telles que l'expose Rabla [RTSL13]. C'est pourquoi pour le réseau domestique AC, cette méthode est différemment utilisée pour comparer les similitudes entre 2 alternances successives à la manière de J.Lezama [LSTH15]. Cette méthode utilisée en application DC permet également d'identifier la similitude de phénomènes répétitifs dans un signal tels que ceux produits par un hacheur. Ici, la méthode proposée d'analyse par autocorrélation du résidu a pour objectif de repérer les phénomènes répétitifs (périodiques) et en corolaire détecter les phases instables du signal continu.

4.3.2.1 Principe général

Le calcul de corrélation est réalisé sur le signal résidu obtenu conformément au paragraphe 4.2.

Le schéma de principe est présenté Figure 4-38 :

- Sélection d'une fenêtre d'analyse de largeur Np (voir §4.1) et détermination du résidu $X(i)$ (voir §4.2).
- Calcul de l'autocorrélation sur la fenêtre de largeur Np

$$R_{xx}(n) = \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p-1} X(i) \cdot X(i-n) \quad (4.10.)$$

Avec X le segment de résidu

Puis normalisation.

$$R_{xx}norm(n) = \frac{R_{xx}(n)}{\max(R_{xx}(n))} \quad (4.11.)$$

- Détermination d'un coefficient de coïncidence. L'idée consiste à observer l'information autour du pic de corrélation « 0 ». Dans le cas d'un signal en présence de défauts d'arc des informations de corrélation apparaissent en-dehors de la raie « 0 »

$$CR_{xx}norm = \frac{\sum_{-j}^{+j} |R_{xx}norm(n)|}{\sum_{N_p} |R_{xx}norm(n)|} \quad (4.12.)$$

On choisit j autour de $1/1000$ de Np où Np est le nombre de points de la fenêtre d'analyse.

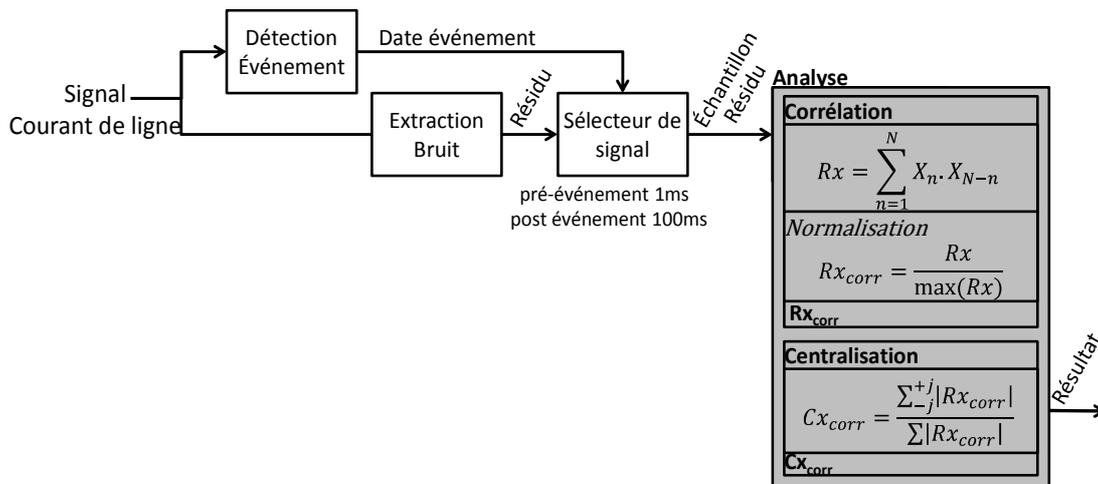


Figure 4-38 : Diagramme de principe de la méthode par centralisation de l'autocorrélation du résidu

La Figure 4-39 illustre les étapes de calcul sur deux types de signaux (avec ou sans arcs). On y voit qu'en situation de résidu perturbé par la présence d'un arc, la distribution du signal se retrouve à

travers l'autocorrélation. L'application du ratio d'amplitude de l'instant de coïncidence (pic central) avec l'ensemble du signal conforte l'observation du bruit.

Pour cette étude, le fenêtrage de référence de largeur $\pm j$ est déterminé expérimentalement à 1/1000 de . Soit un équivalent temporel de $\pm 100\mu s$ de fenêtrage sur 100ms. Les essais pour une place de 10 à 200points ont présenté une variabilité des résultats finaux Cx_{corr} inférieurs à 3%.

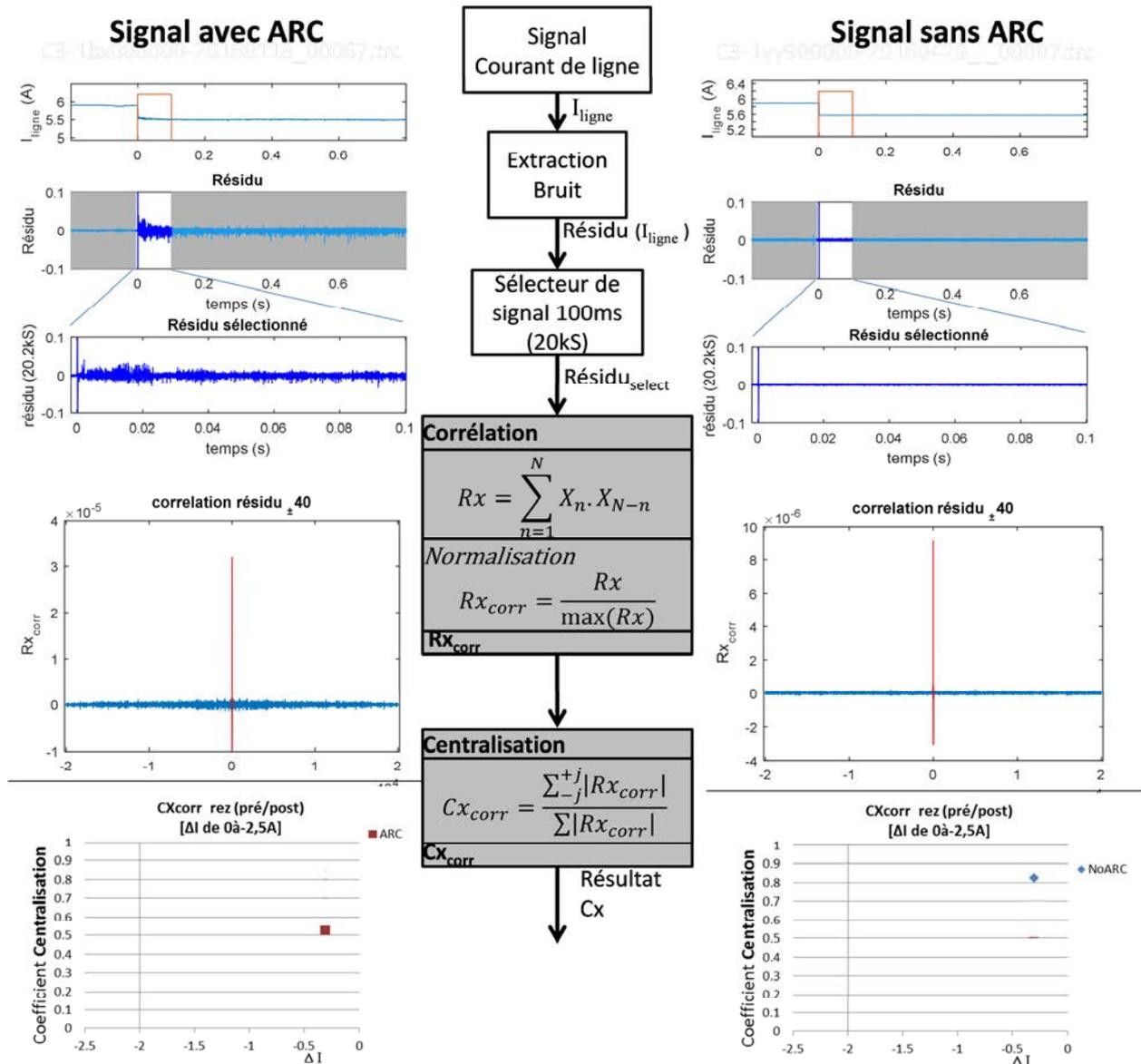


Figure 4-39 : Exemple du traitement de la méthode d'analyse par la centralisation de l'autocorrélation du résidu

4.3.2.2 Discrimination de défaut

Le résultat du score de la dispersion centrale de l'autocorrélation $C_{x_{corr}}$ est représenté par l'histogramme suivant (Figure 4-40) avec leur correspondance par loi normale.

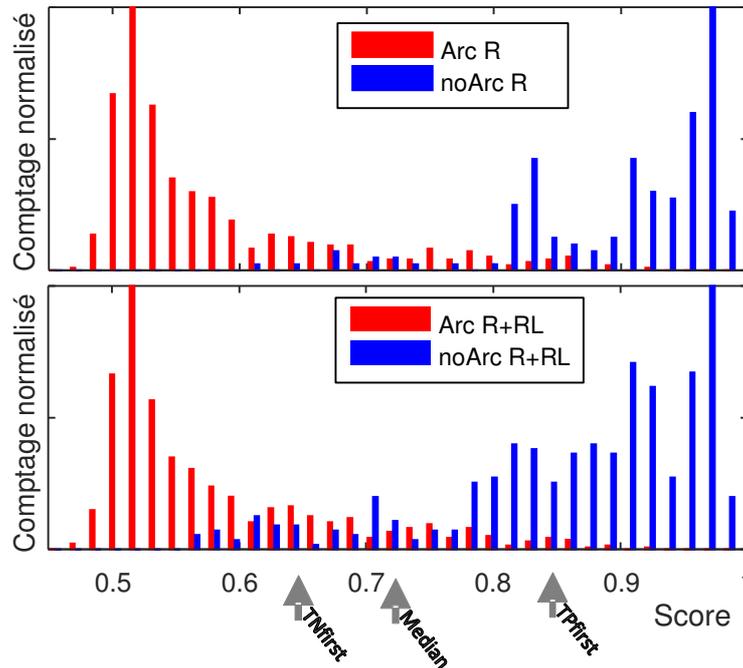


Figure 4-40 : distribution normalisée des résultats (scores) par analyse de dispersion de l'autocorrélation du résidu
449 Arcs sur charges R : 170 transitions sans arcs sur charge R(32µH à 120µH)

Une majeure partie des cas négatifs (no arc) sont situés au-delà de 0.78, mais une partie se confond avec les cas d'arcs (en rouge) jusqu'à 0.56.

La matrice de confusion ci-dessous dessine les performances de cette méthode pour différents seuils déterministes sur charges résistives (449 cas positifs R & 170 cas négatifs) :

Tableau 14 : Matrice de confusion par seuil fixe avec la méthode 2 : dispersion de l'autocorrélation (sur charges d'arc R)

Charges R	Cas Positif		Cas Négatif		Justesse	seuil
Stratégie	TP	FN	FP	TN		
TPfirst	442	7	46	124	91.4%	SeuilTPfirst = disp(P) < 10% = 0.86
Median	430	19	42	128	90.6%	SeuilMedian = 0.80 Seuil à meilleure Justesse
Median	414	35	12	158	92.0%	SeuilMedian = 0.72 Intersection de la distribution normale P&N
TNfirst	376	73	2	168	87.9%	SeuilTNfirst = disp(N) < 10% = 0.66

Nb : Le seuil déterministe est défini pour une dispersion de 10%.

Par la courbe de ROC Figure 4-41, on constate que la méthode ne présente pas de seuil déterministe idéal. En effet, soit de bonnes détections sont faites au détriment de fausse détection (1-specificity \cong 25%), soit les fausses détections sont évitées en réalisant de nombreuses non-détections (sensitivity \cong 84%).

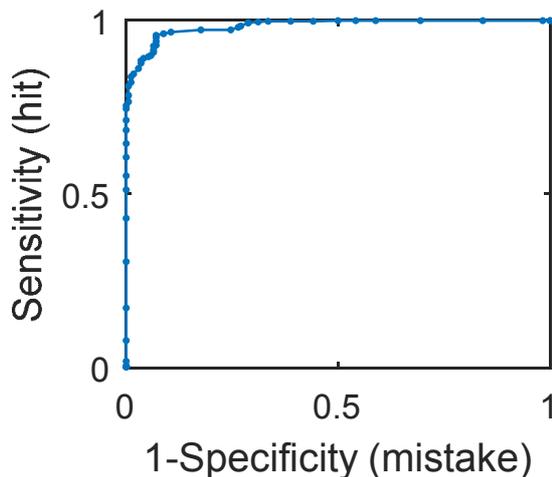


Figure 4-41 : Courbe de ROC de la méthode par dispersion de l'autocorrélation

Comme pour la méthode précédente, la visualisation (Figure 4-42) des résultats décrit une proportionnalité des résultats (scores) avec l'intensité du courant de ligne et le saut de courant (drop ΔI , dI).

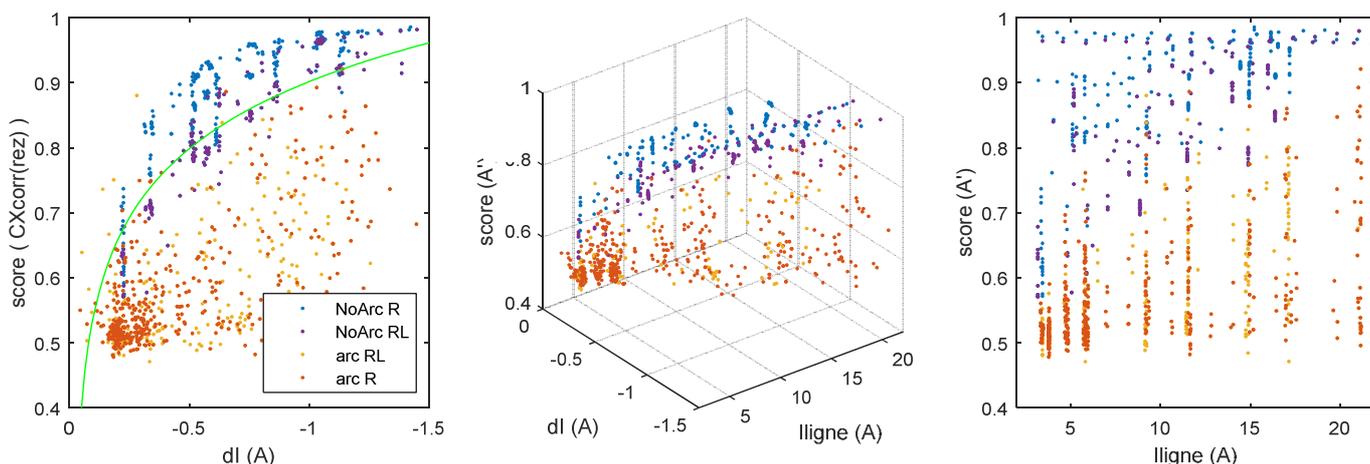


Figure 4-42 : Scores résultat "CXcorr Centralisation de l'autocorrélation du résidu" selon le domaine d'étude I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante ($F_c=8kHz$) sur un signal $F_e=200kHz$

Les points sont répartis selon leurs groupes d'après 2 nuages de points de forme logarithmique.

Le seuil discriminant : $-0.1448 * \log(|dI| - 0.01946) + 0.9046$ (courbe verte) est obtenu par approximations successives avec choix des meilleurs coefficients selon le taux de bonnes décisions (Justesse).

Par cette méthode, les performances sur charge résistive sont de 96.9% de bonne détection avec uniquement 19 décisions à tort parmi 449 Positifs (● arc R) et 170 Négatifs (● noArc R).

Charges	Positif (449)		Négatif (170)		Justesse
	TP	FN	FP	TN	
R	439	10	9	161	96.93 %

seuil= $-0.1448 * \log(|dI| - 0.01946) + 0.9046$

La courbe de ROC suivante offre une lecture des résultats obtenus pour un seuil adaptatif en fonction de ΔI . La justesse de cette méthode sur charge résistive est proche de 97% avec 19 erreurs sur 619 cas. Alors que le score atteint 92% de bonnes décisions pour un seuil de 0.72 fixe.

La justesse se dégrade sur charges légèrement selfiques avec un indicateur à 87.9% de bonnes décisions.

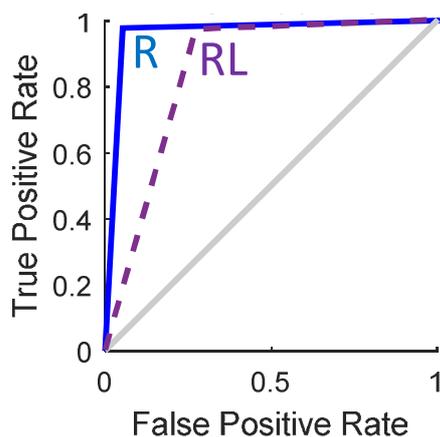


Figure 4-43 : Courbe de Roc pour le seuil $f(\Delta I)$

Cette solution n'est pas totalement déterminante de la présence d'arc et nécessite la confirmation par d'autres méthodes de détection au risque d'effectuer de mauvais choix.

4.3.3 Critère 3 : Moyenne de la variance glissante du résidu (MVG-R)

Il est couramment considéré que l'arc génère du bruit. Plus particulièrement un bruit rose, brun voir gaussien [TPSR05][UGHE12] [YHHW12] de la forme :

$$f_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.13.)$$

De ce fait, la distribution du signal traduite par l'étude de la variance sera différente avant et pendant un arc électrique. C'est cette différence qui est exploitée par cette méthode de détection. Le signal est segmenté afin d'étudier la distribution du bruit contenu dans le signal sur de petites sections temporelles.

4.3.3.1 Principe général

L'étude proposée ici consiste à calculer l'écart type moyen d'un signal lors de transitions. Pour cela le signal sélectionné est subdivisé en tronçons sur lesquels sont effectués les calculs de la variance telle une variance glissante (principe illustré par la trace Figure 4-44).

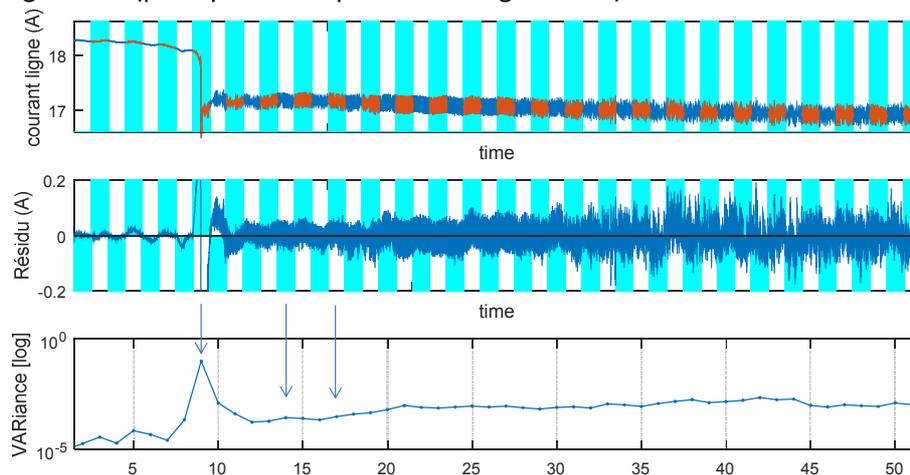


Figure 4-44 : Illustration variance temporelle du résidu. Présence d'arc à partir du segment 9.

Le calcul de la variance s'effectue après l'instant de transition pouvant être due soit à une variation de charge, soit à l'apparition d'une impédance d'arc en série. Cet instant est déterminé par la méthode expliquée en 4.1.

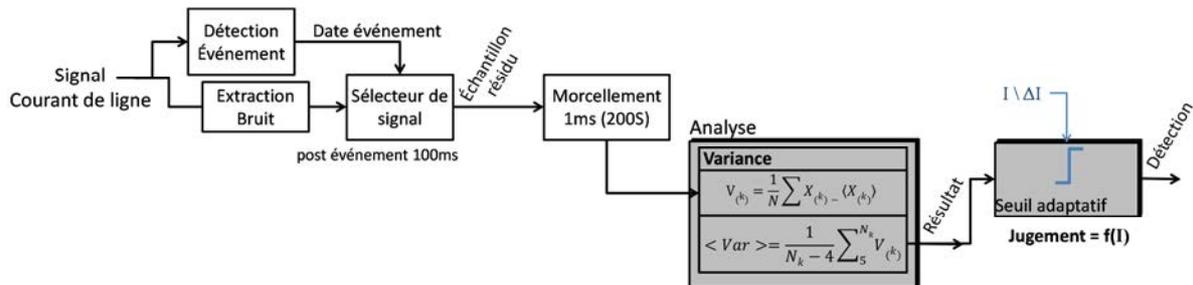


Figure 4-45 : Diagramme de principe de la méthode "moyenne de la variance glissante"

La méthode présentée ici est illustrée par la Figure 4-45. Le détail de chaque partie est détaillé étape par étape Figure 4-46. Le résultat du critère est égal à la moyenne de l'ensemble des variances (en régime établi après la transition : les 4 premières ms du signal sont négligées pour rejeter le temps d'établissement et tous effets inductifs du système) suivant l'équation suivante :

$$\overline{VAR} = \frac{1}{N_k - 4} \sum_{k=5}^{N_k} VAR_k \quad (4.14.)$$

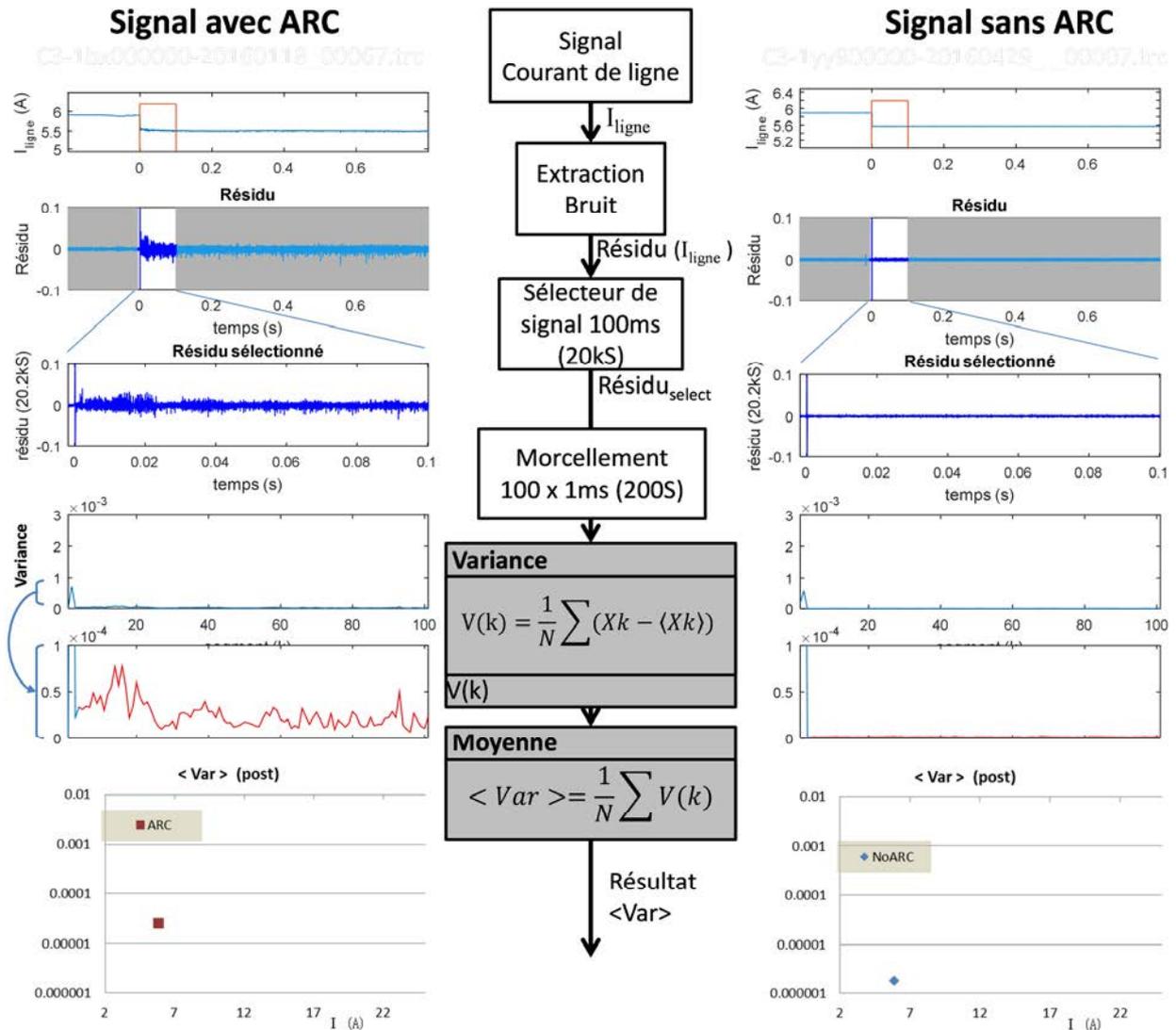


Figure 4-46 : Exemple du traitement de la méthode d'analyse de l'évolution de la variance du résidu

Le détail de la variance glissante des 2 cas présentés Figure 4-46, expose la différence entre la dispersion glissante d'un signal résidu avec arc (gauche) et sans arc (droite).

Lors d'arc (dilatation de l'échelle de variance, en rouge), la dispersion est supérieure à celle d'une transition, de plus celle-ci présente de nombreuses irrégularités.

4.3.3.2 Discrimination de défaut

Après calcul des variances moyennes pour l'échantillon de validation, il apparaît sur la Figure 4-47 que avec et sans la présence d'un arc série, deux zones bien distinctes apparaissent par la méthode de la variance moyennée. L'une est située entre $1,2 \cdot 10^{-6}$ et 10^{-3} , l'autre inférieure à $2 \cdot 10^{-6}$.

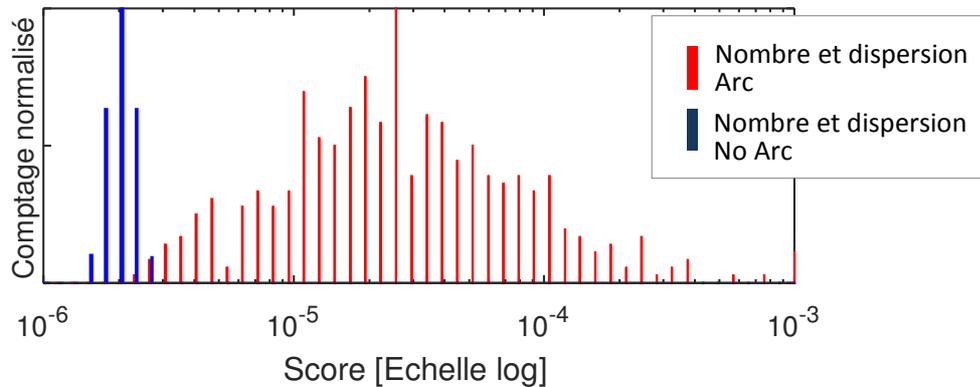


Figure 4-47 : distribution normalisée des résultats de scores par analyse de l'évolution d'une variance du résidu
450 Arc sur charges R : 315 transitions sans arc sur charge R ($L \leq 120 \mu\text{H}$)

Dans le Tableau 15 on observe qu'avec un seuil de $2,38 \cdot 10^{-6}$ sur un échantillon de 450 cas positifs & 315 cas négatifs sur charges résistives, moins de 10% (31) des cas négatifs sont faussement considéré comme arc. En choisissant un seuil de $2,78 \cdot 10^{-6}$, alors moins de 1% (3) des cas d'arcs ne sont pas détectés et aucun faux positif. Le taux de réponses justes atteint, dans le dernier cas 99,6%.

Tableau 15 : Matrice de confusion méthode variance moyenne (charges R)

Charges R	Cas Positif		Cas Négatif		Justesse	seuil
	TP	FN	FP	TN		
TPfirst	450	0	31	284	95.95%	SeuilTPfirst = $0,2384 \cdot 10^{-6}$
TNfirst	447	3	0	315	99.61%	SeuilTNfirst = $0,2782 \cdot 10^{-6}$ "Justesse" la plus élevée

La mise en relation des scores-résultats de la méthode avec l'intensité du courant et la chute de courant (ΔI) accentue peu la séparation des 2 groupes (Figure 4-48).

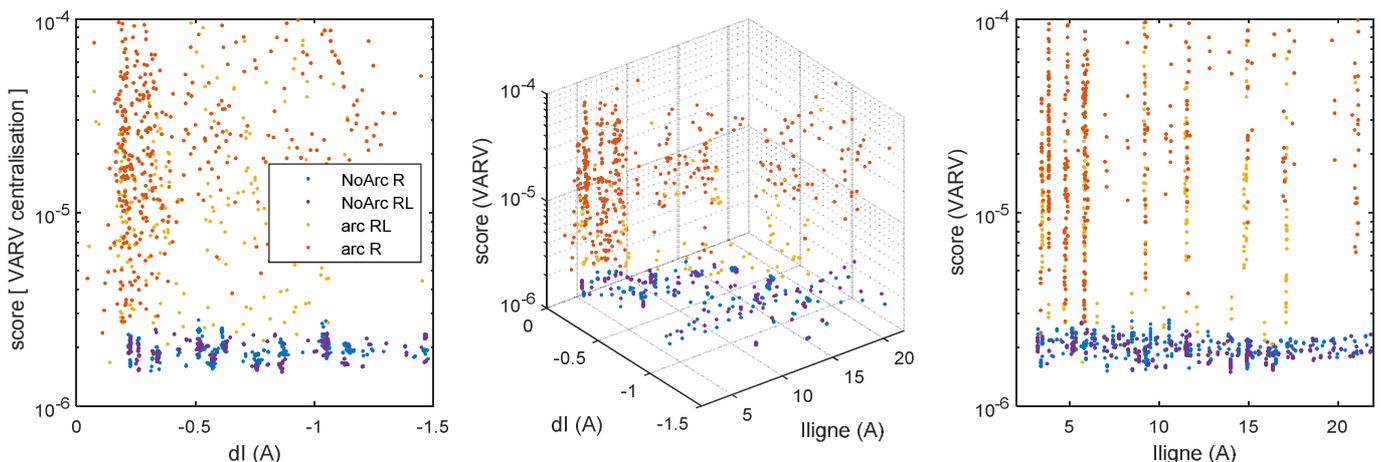


Figure 4-48 : Scores résultat "VARv : Variance moyenne" sur 96ms d'arc après transition selon le domaine d'étude I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante ($F_c=8\text{kHz}$) sur un signal $F_e=200\text{kHz}$

Les cas sans arc (●R, ●RL) ne présentent pas de sensibilité à la valeur du courant. En revanche, lors d'arcs (●R), on constate l'augmentation de la dispersion proportionnelle à l'écart énergétique de l'arc

(décrochement ΔI). Cependant, les arcs sur charges selfiques ($\bullet RL \cong 1mH$) se rapprochent du niveau de dispersion sans arc.

Pour tenter d'optimiser la discrimination et obtenir 100% de bonne décision, la matrice de confusion est représentée graphiquement par colorimétrie sur le nombre de bonnes décisions pour chaque résultat (TP, FN, TN, FP) en fonction des coefficients a & b du seuillage $Th(a, b, I) = a \cdot |I| + b$.

La Figure 4-49 présente graphiquement la matrice de confusion pour les différents coefficients a & b . Par cette représentation, il apparait que pour obtenir de bonnes détections (TP), b doit être inférieur à 10^{-5} . Alors que pour limiter le nombre de faux positifs (FP), il est nécessaire de combiner $a > 0$ et $b > 2.84 \cdot 10^{-6}$.

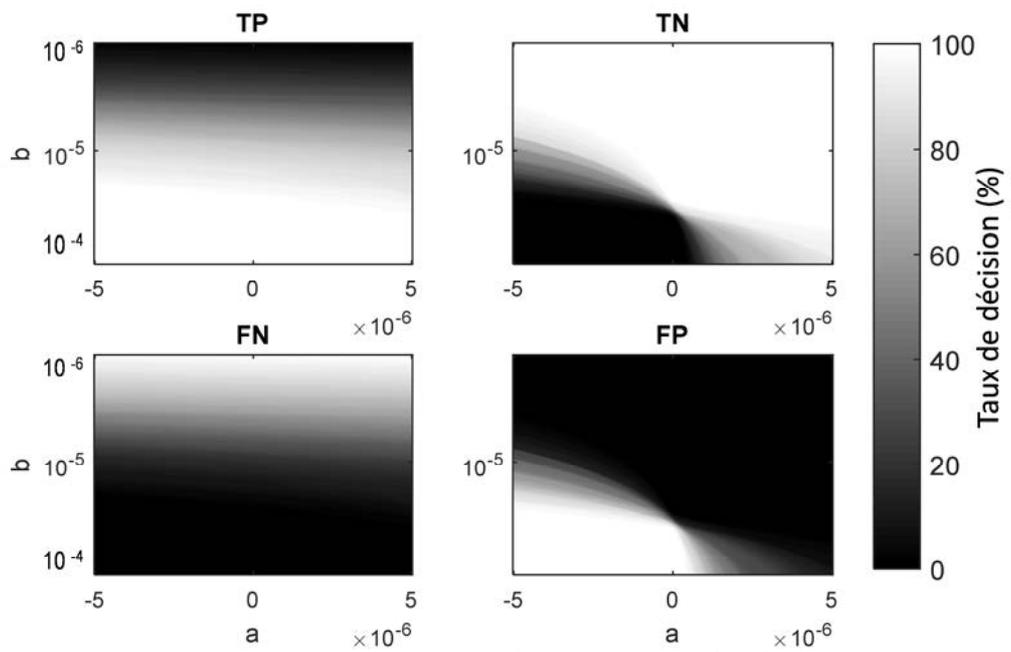


Figure 4-49 : Matrice de confusion graphique $Th(a,b,I)$

La mise en commun de ces 4 éléments de la matrice de confusion à travers la "justesse" des décisions (accuracy) permet de déterminer les coefficients optimaux pour les charges R (Figure 4-50) avec 99.9% de bonnes décisions lorsque $a \cong 3,1 \cdot 10^{-6}$ & $b \cong 5 \cdot 10^{-3}$. En revanche, ces coefficients diffèrent légèrement pour les charges RL (Figure 4-51).

Cette représentation confirme la faible dépendance du courant sur ce critère de calcul.

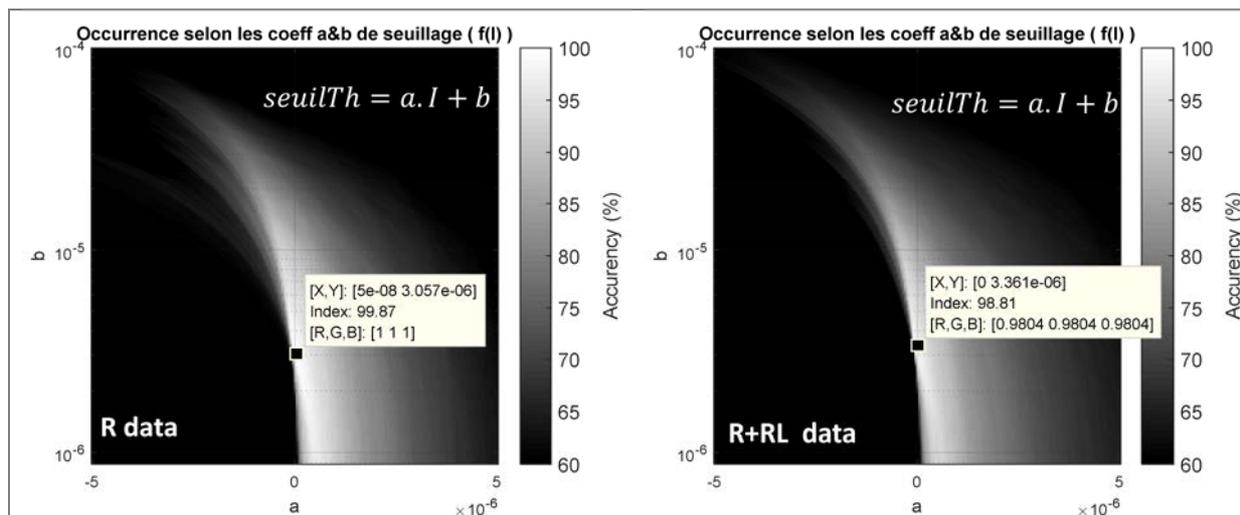


Figure 4-50 : Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de I sur charges R uniquement

Figure 4-51: Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de I sur charges R+RL

L'application d'un seuil proportionnel à ΔI offre une efficacité de 100% sur les charges R pour les valeurs de $seuilTh = 2 \cdot 10^{-6} \cdot |\Delta I| + 2.683 \cdot 10^{-6}$ (Figure 4-52) et 98.4% sur charges RL (Figure 4-53).

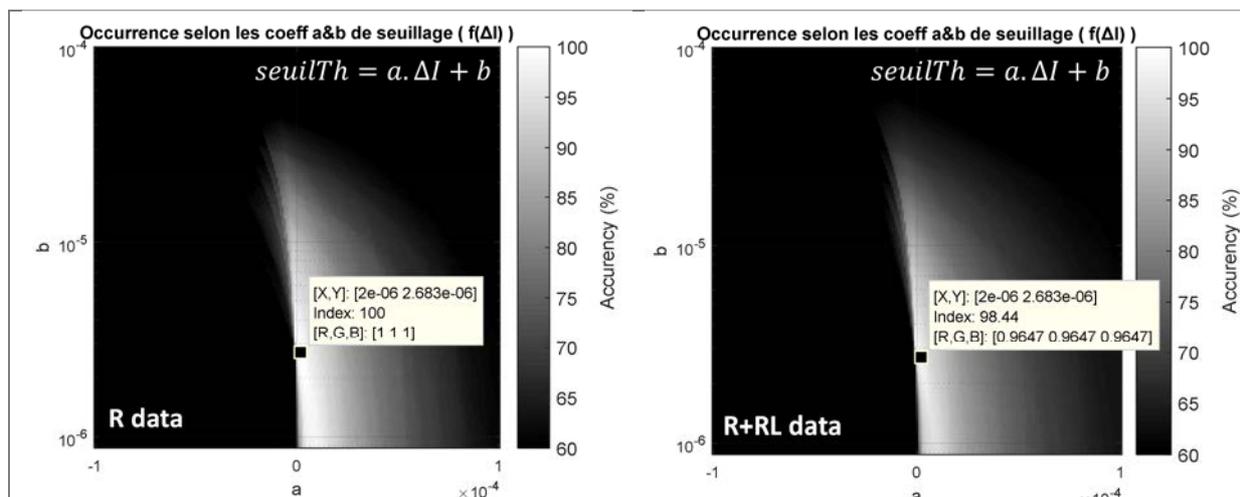


Figure 4-52 : Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de ΔI sur charges R uniquement

Figure 4-53: Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de ΔI sur charges R+RL

Par cette méthode, les performances sur charge résistive sont de 100% de bonne détection parmi 450 Positifs (● arc R) et 315 Négatifs (● noArc R).

Charges R	Positif (450)		Négatif (315)		Justesse	
	TP	FN	FP	TN		
F(ΔI)	450	0	0	315	100%	$seuilTh = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta I + 2.683 \cdot 10^{-6}$
F(I)	450	0	1	314	99.8%	$seuilTh = 5 \cdot 10^{-8} \cdot I + 3,057 \cdot 10^{-6}$

Ce même seuil discriminant sur charges selfiques (212 ● 'arcs' et 366 ● 'sans arcs' supplémentaires de 0.5mH à 125mH) procure les résultats de détection présentés sur le tableau suivant représenté par les courbes de ROC (Figure 4-54, Figure 4-55) :

Charges R+RL	Positif (662)		Négatif (681)		Justesse	
	TP	FN	FP	TN		
F(ΔI)	646	16	5	676	98.44%	$seuilTh = 2 \cdot 10^{-6} \cdot \Delta I + 2.683 \cdot 10^{-6}$
Seuils fixes						
TPfirst	656	6	36	645	96.87%	SeuilTPfirst = $0.2384 \cdot 10^{-5}$
TNfirst	644	18	0	681	98.66%	SeuilTNfirst = $0.2782 \cdot 10^{-5}$

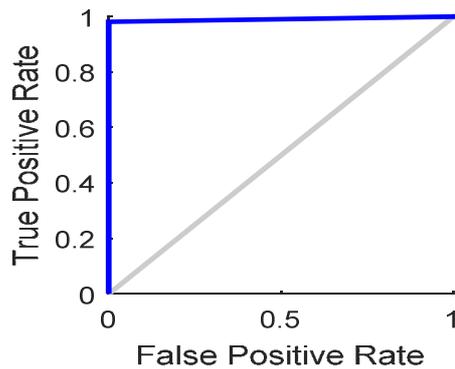


Figure 4-54 : Courbe de ROC méthode " variation de variance du résidu " sur charges R & RL par discrimination par seuil proportionnelle à ΔI

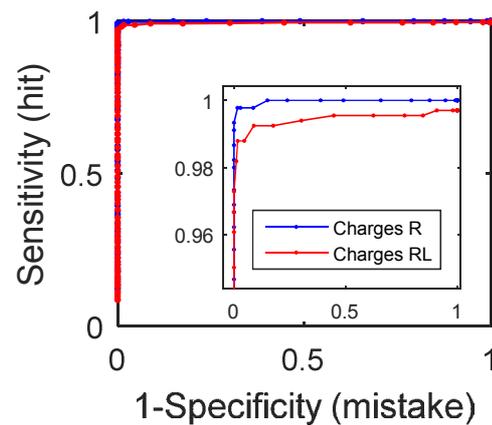


Figure 4-55 : Courbe ROC méthode "variation de variance du résidu" sur charges R & R+RL par discrimination à seuil fixe

L'application d'un seuil discriminant proportionnel à la chute de courant provoqué soit par une transition, soit par un arc ne présente guère d'avantage vis-à-vis d'un seuil fixe. Et pour cause, le courant présente peu d'influence sur la valeur moyenne de la dispersion d'un signal sans arc. C'est ce que présentent les courbes de ROC Figure 4-54 et Figure 4-55 appuyées par le nuage de points Figure 4-48.

Par ailleurs, lors d'arcs, le nuage de points montre une augmentation du bruit proportionnel à l'augmentation du courant. Ces observations concordent avec celles réalisées en section 1.2.4 qui présentent une dispersion croissante en cas d'arc selon le courant, l'écartement et également le diamètre des électrodes.

On remarque également que l'intérêt de ce critère est qu'il est très faiblement dépendant au courant de ligne.

4.3.4 Analyse fréquentielle : Critère 4 et 5

La première approche de l'analyse fréquentielle est celle basée sur les bandes de fréquences prédéfinies et en temps limité. Sa seconde analyse fréquentielle est réalisée en continu avec l'analyse temps/fréquence par STFT (ShortTime Fourier Transform).

4.3.4.1 Critère 4 : Analyse sur une bande de fréquence d'un échantillon à durée finie

De nombreux travaux exploitent et analysent les perturbations spectrales produites par l'arc électrique [SKLL15] [CCXW09] [YHWW12] [WMBJ14] [UGHE12] [WeWB14] [JPLP11](...). Ces méthodes sont principalement basées sur l'augmentation de la DSP ou du spectre pendant un arc. La discrimination se fait alors par l'observation de cette augmentation.

La méthode proposée ici s'inspire des méthodes de la littérature qui offrent une forte discrimination des cas sains/défectueux.

4.3.4.1.1 Principe général

Pour réaliser ce critère de discrimination, la technique proposée ici effectue une transformée de Fourier Discrète (DFT) sur le signal acquis. La densité spectrale d'énergie (DSE notée E Figure 4-56) dans une bande de fréquence limitée est obtenue par le cumul de la DFT (somme de f_{low} à f_{high}). Le principe est décrit sur la Figure 4-56. La suivante décrit le flot de cette méthode avec le détail des signaux de chaque étape.

La durée d'observation se limite à 100ms après apparition de l'évènement et elle inclut la transition avec 1ms de données supplémentaires avant l'ignition d'arc.

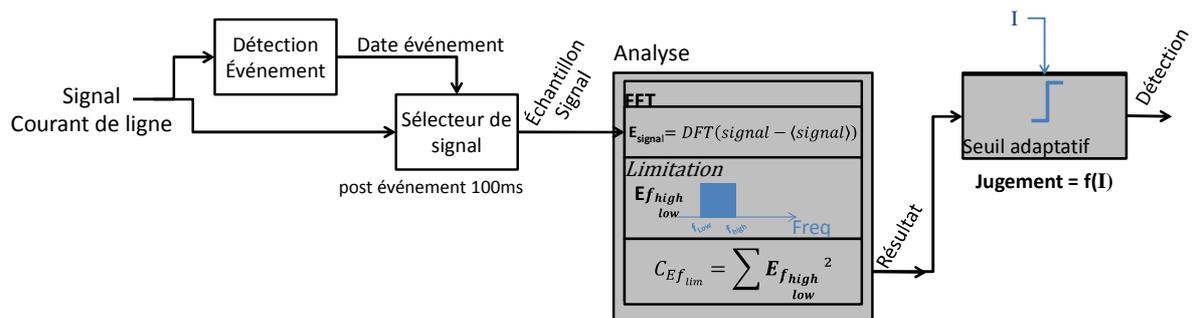


Figure 4-56 : Diagramme de principe de la méthode DES

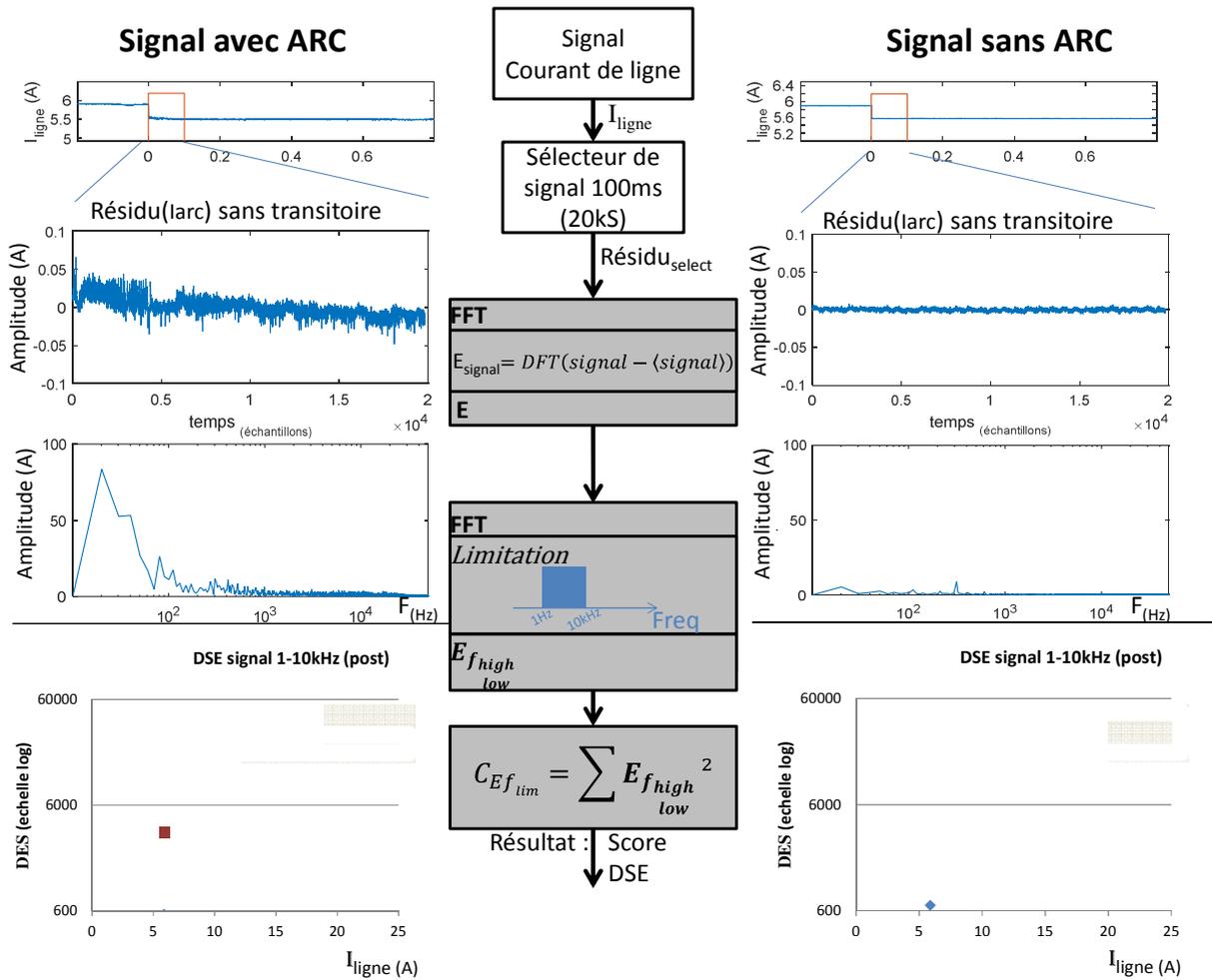


Figure 4-57 : Exemple du principe de la méthode fréquentielle

Cet algorithme analyse uniquement le signal résidu sans la transition d'amorçage d'arc.

L'énergie ($\sum E_{1-10Hz}^2$) du résidu est proportionnelle à la puissance du résidu ($\frac{1}{N} \sum E_{1-10Hz}^2$).

4.3.4.1.2 Discrimination de défaut

Dans le domaine de la détection d'arc, le choix d'une plage fréquentielle à analyser fait souvent débat. Il est à noter que ce paramètre dépend surtout du moyen de mesure et de sa bande passante. Pour cette étude, nous disposons d'un signal ayant une bande de fréquence de 1kHz à 100kHz (soit 2 décades). Pour ce travail de recherche de critères probants, nous étudions 2 bandes de fréquences : - La décade 1kHz à 10kHz –la décade et demi 1kHz à 50kHz (respectivement Figure 4-58 & Figure 4-59 pour 252 cas sans arcs et 450 arcs).

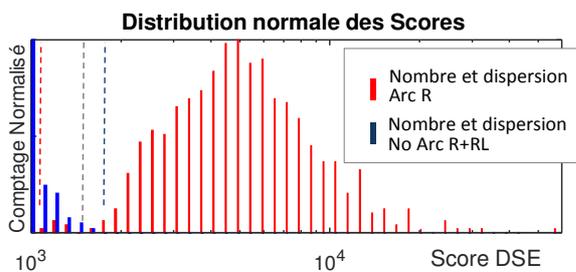


Figure 4-58 : Distribution normalisée des résultats de score pour l'analyse de densité spectrale d'énergie DSE 1-10kHz

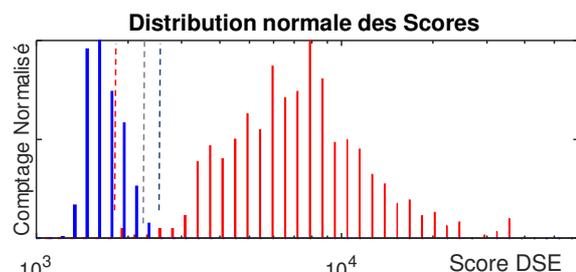


Figure 4-59 : Distribution normalisée des résultats de score pour l'analyse de densité spectrale d'énergie DSE 1-50kHz

Ce critère révèle deux populations distinctes aussi bien sur la bande 1-10kHz que 1-50kHz. À noter que sur les 2 bandes de fréquences, des cas d'arcs sont présents en dessous de la valeur maximum "noArc" et apportent une confusion dans la décision.

Le Tableau 16 résume les résultats pour 3 seuils discriminants arbitraires (2 aux limites des cas positifs/négatifs et 1 médian à la justesse maximale).

Ainsi, pour un seuil placé au minimum de la valeur-score des cas positifs, seuls 90% des décisions sont juste, car 70 cas négatifs sont considérés à tort comme des arcs. Cette erreur est due à la valeur de DSE très faible (DSE=1093) de certains cas d'arc notamment à faible intensité alors que les cas négatifs sont présents jusqu'à une DSE de 1630. Néanmoins, les performances sont supérieures à 99% avec seulement 4 cas d'arcs de valeurs inférieures à la détection lorsque le seuil est placé à l'intersection des populations (DSE=1596) ou à la limite des cas négatifs.

Tableau 16 : Résultat seuil déterministe critère DSE (1-10kHz)

Charge R	Cas Positif		Cas Négatif		Justesse	seuil
	TP	FN	FP	TN		
Stratégie						
TPfirst	450	0	70	182	90.03%	SeuilTPfirst = 1093.8 Seuil limite des cas positifs les plus bas
Median	446	4	0	252	99.43%	SeuilMedian = 1596 Seuil limite à meilleure Justesse
TNfirst	446	4	0	252	99.43%	SeuilTNfirst = 1630 Seuil limite des cas négatifs les plus bas

Ces informations sont reportées sur les courbes de ROC ci-dessous pour les charges R et RL avec la bande 1-10kHz et 1-50kHz. Ces courbes montrent toutes deux une sensibilité élevée avec un taux de fausses détections nulles (partie verticale gauche). La diminution du seuil améliore la sensibilité aux défauts (visualisable par l'augmentation en ordonnée) au détriment d'une soudaine dégradation de la spécificité (déplacement des points sur la droite en abscisse). Soit 33% de FP pour 100% de TP).

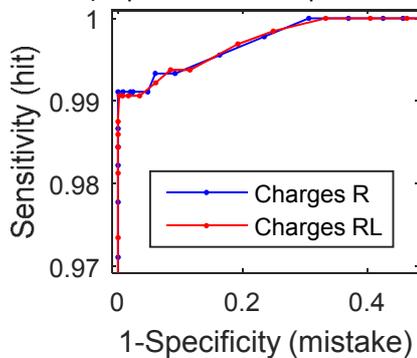


Figure 4-60 : Courbe ROC selon seuil déterministe Bande 1-10kHz

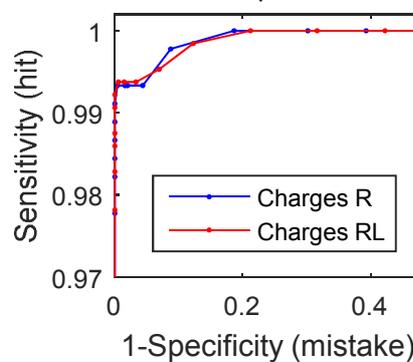


Figure 4-61 : Courbe ROC selon seuil déterministe Bande 1-50kHz

Avec 99% de bonnes décisions, cette méthode est très discriminante aussi bien pour les charges R que les charges RL. Mais elle reste vulnérable aux fausses détections au regard de la variation brutale de la courbe de ROC qui migre rapidement vers une spécificité de 33% lors du déplacement du seuil.

Par la visualisation des scores sur le plan 2D (Figure 4-62) en fonction du saut de courant (ΔI), on constate que l'application d'un seuil proportionnel au courant et à la chute de courant peut mener à une amélioration des performances.

4.3.4.1.3 Évaluation du résultat

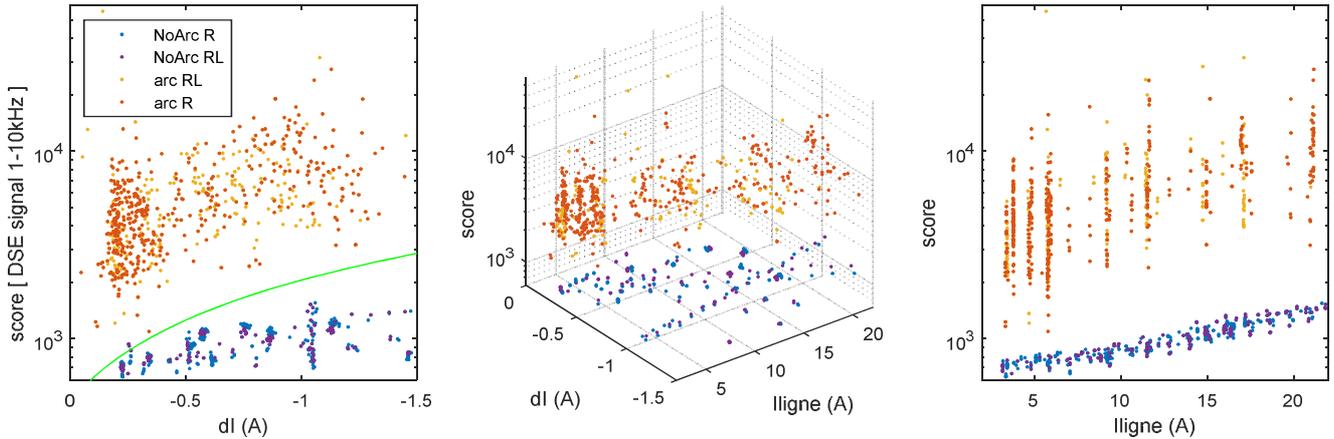


Figure 4-62 : Scores résultat "fréquentiel, DES de la bande 1-10kHz du signal" selon le domaine d'étude $I_{init}, \Delta I$
résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante ($F_c=8kHz$) sur un signal $F_e=200kHz$

Les scores illustrés Figure 4-62, sont obtenus par de nombreuses charges et variations de charges ($\Delta I = [0.25A \ 0.5A \ 1A]$ $\Delta \Omega = [0.25\Omega \ 0.5\Omega \ 1\Omega \ 2\Omega \ 3\Omega \ 4\Omega \ 6\Omega]$) à diverses intensités (de 2 à 22A). On y distingue deux populations : les cas sains sans arcs situés en partie inférieure et les cas avec défaut d'arc au-dessus de 10^3 .

Sur charges résistives, le Tableau 16 montre que selon le positionnement du seuil, une partie des diagnostics peut être erronée (entre 4 et 70 cas sur 625). Ces erreurs s'expliquent par les scores sur la plage 2-22A où les cas sains/défectueux côtoient la valeur 10^3 . On remarque que le score est proportionnel à l'intensité (droite) notamment pour les cas sans arcs. Ainsi, un seuil proportionnel au courant (I) et particulièrement à la variation du courant (ΔI) est élaboré par approximations successives (méthode présentée en 4.3.1.2 page113). Nous souhaitons ainsi réduire le taux d'erreur.

Avec le seuil proportionnel à ΔI , les performances sur charge résistive sont alors de 99.8% de bonne détection avec 1 décision à tort parmi 450 Positifs (● arc R) et 252 Négatifs (● noArc R) pour un seuil définit à $1588,14 \cdot |\Delta I| + 463$.

Tableau 17 : Résultat seuil proportionnel à ΔI sur le critère DSE (1-10kHz) avec charges R

Charges R	Positif (449)		Négatif (176)		Justesse	Seuil= $1588.14 \cdot dl + 463$
	TP	FN	FP	TN		
F(ΔI)	450	0	1	251	99.86%	

Ce même seuil discriminant sur des charges selfiques (191 ● 'arcs' et 296 ● 'sans arcs' supplémentaires de 0.5mH à 125mH) donne les résultats de détection présentés avec le tableau suivant transcrit sur la courbe de ROC Figure 4-63:

Tableau 18 : Comparaison des résultats à seuils fixes et proportionnel à ΔI sur le critère DSE (1-10kHz) avec charges R+RL

charges R+RL	Positif (641)		Négatif (547)		Justesse	
	TP	FN	FP	TN		
$F(\Delta I)$	641	0	2	545	99.83%	Seuil= $1588.14* dI +463$
Seuils fixes						
TPfirst	641	0	165	382	89.97%	SeuilTPfirst = 1093.8
Median	633	8	1	546	99.24%	SeuilMedian = 1596
TNfirst	633	8	2	545	99.16%	SeuilTNfirst = 1630

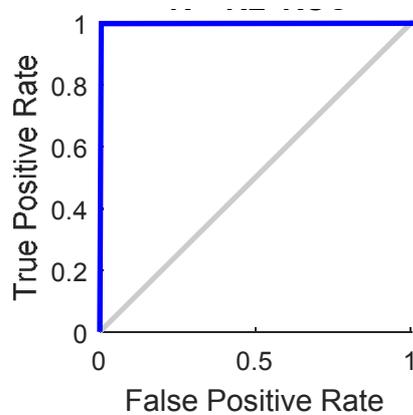


Figure 4-63 : Courbe de ROC sur charge R et RL selon une discrimination proportionnelle à ΔI

Pour des charges résistives et selfiques, cette méthode offre des performances proches de 100% (R=99.86%, R+RL=99.83% de bonnes détections). Comme en témoigne la courbe de ROC Figure 4-63, l'utilisation d'un seuil proportionnel à ΔI apporte un gain de performance minime (+0.4% sur charges inductives) par rapport au seuillage fixe (Tableau 18 ligne $F(\Delta I)$ VS $TNfirst$). Mais le seuil permet de supprimer les cas de faux négatifs. La proportionnalité assure également que les populations positives et négatives ne se confondent pas pour des signaux de plus faible et plus forte intensité (inférieur à 2A et supérieur 22A non présentées ici).

4.3.4.2 Critère 5 : Indice de Dispersion Spectrale (IDS)

La pollution spectrale générée par les arcs électriques est largement exploitée par les méthodes de la littérature au travers la mesure de DSP et également lors du calcul d'une valeur RMS du bruit produit par l'arc. Mais ces méthodes ne tiennent pas compte de l'étendue spectrale occupée par l'arc électrique et peuvent être leurrées par une charge à forte pollution harmonique. De plus, ces méthodes sont dépendantes des caractéristiques d'acquisitions. Ainsi, dans cette partie il est proposé d'étudier les contraintes liées à la configuration du système, car l'intégralité de la chaîne d'acquisition (charge, mesure, échantillonnage, etc.) impacte la mise en forme des scores à discriminer.

4.3.4.2.1 Introduction sur les méthodes de détection par analyse spectrale

Comme pour la méthode précédente, le choix de la bande de fréquence à observer lors de la production d'un arc se pose pour cette analyse. Plusieurs travaux ont étudié le contenu spectral du courant de ligne durant les phases de "pre-arcing", "arc-ignition" et "arc-sustain". Yang Cao [CLSC13] utilise la bande de fréquence [0 – 4 kHz] pour la détection sur des charges résistives ($f_{\text{sampling}} = 100$ kHz). Alors que Rabla [RTSL13] présente (Figure 4-64) les résultats obtenus lors de ces trois phases pour une charge résistive jusqu'à 500kHz ($f_{\text{sampling}} = 1$ MHz). Avec ses équipements, il en conclut que la majorité des informations sont contenues en dessous de 100kHz. Il attribue ce comportement chaotique de basse fréquence aux déplacements du pied d'arc sur les électrodes et aux changements morphologiques des électrodes (chemin carboné).

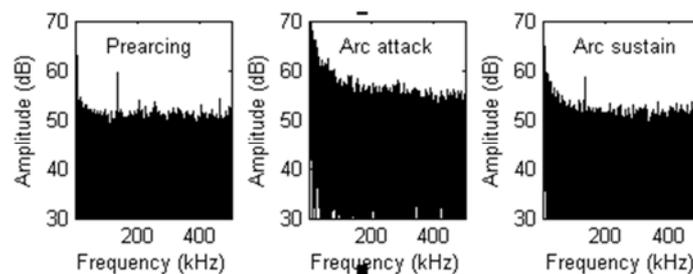


Figure 4-64 : caractéristiques spectrales sur plusieurs phases d'apparition d'arc [RTSL13]

Pour poursuivre ces descriptions du domaine fréquentiel, Wendl [WeWB14] étudie l'atténuation des bruits générés par l'arc. Il en propose un découpage du spectre des arcs de faible intensité (<20A) en 4 états selon l'intensité et l'instant d'acquisition (Figure 4-65 avec état1=nominal, état2: $I=2-3A$; état 3= $I<7A$, état4= $I>12A$). Ainsi, il montre que le spectre varie en fonction de l'élévation en température du gaz lors du passage du courant dans les électrodes (-40dB à 1kHz en state 3). Ce bruit se stabilise après un échauffement de l'arc correspondant au passage de 12A-17A (state4) à -50dB et -10dB/décade (spécifique à son 'setup').

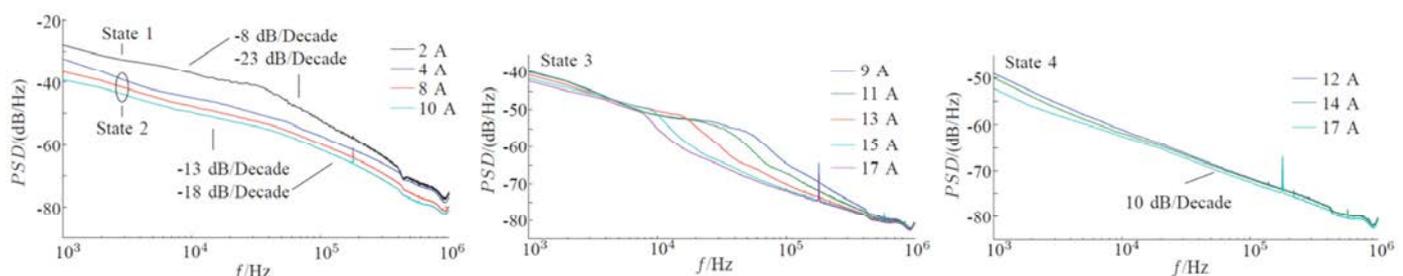


Figure 4-65 : DSP d'arc à différentes intensités (Wendl 2014)

Wendl exploite cette perturbation spectrale en proposant une détection temporelle (segment de 33ms) et fréquentielle sur 3 bandes de fréquences spécifiques [1-10 kHz, 4-40 kHz et 40-400 kHz] équivalent au calcul d'une DSP de bande de fréquence d'un échantillon fini dans le temps. Cette méthode permet selon lui d'atténuer l'effet des charges qui présentent un contenu harmonique susceptible d'augmenter localement le spectre.

En effet, l'exploitation du spectrogramme se complexifie lors d'usage d'éléments à découpage qui ont un taux de dispersion harmonique élevé (convertisseur, onduleur, découpage).

Le domaine photovoltaïque est particulièrement concerné par l'utilisation de convertisseur d'énergie et d'onduleurs. Dans ces travaux au sein du laboratoire SANDIA, Johnson [JOMF12] présente les effets d'un arc sur le spectre d'un convertisseur. Ces résultats sont reportés Figure 4-66. On y voit un bruit sur un large spectre qui s'ajoute à l'ensemble du spectre du convertisseur (courant de ligne) et rehausse la DSP du signal.

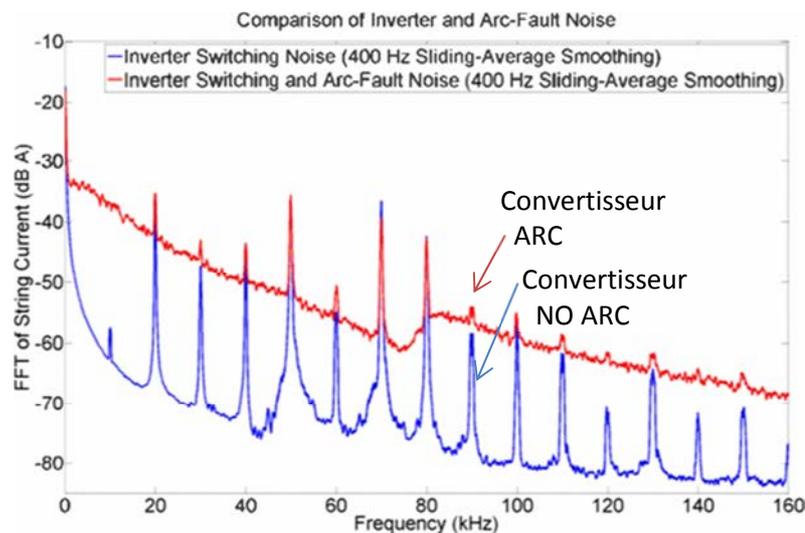


Figure 4-66 : FFT convertisseur avec/sans arc
Signal lissé 400Hz (Johnson et al. 2012)

Pour la détection, l'utilisation de la DSP de la transformée de Fourier peut être trompeuse. En effet, lorsque les conditions expérimentales changent (ajout de charges, harmoniques, configuration, etc.), l'application d'un seuillage provoque des fausses détections.

La Figure 4-67 expose les 2 principales problématiques susceptibles de provoquer de mauvais diagnostics avec un algorithme de détection basé sur une DSP simple dans la bande 0-100kHz (Fsampling 1MHz, Fenêtre 2048pts) :

- Le changement de sensibilité lié au moyen de mesure. Ainsi 3 sondes sont utilisées ici (CP30 [x, o, *], AP15 [+], et un shunt monté en différentiel [·]). Pour les charges passives (R), 3 modes de mesure proposent une différenciation importante des cas d'arcs ($>2 \cdot 10^3$) et des cas noArcs ($<2 \cdot 10^3$). En revanche, si le seuillage est déterminé par la valeur médiane obtenue avec la sonde CP30 ($\cong 1,2 \cdot 10^3$), alors les mesures par shunt [·] seront considérées comme à tort comme "arc".
- Les charges à découpage (onduleurs, convertisseurs, etc.) perturbent le spectre de fréquence et peuvent faussement être perçues comme un défaut. En effet, pour ces charges sans défaut, la DSP augmente au-delà de la valeur d'une charge passive avec arc ($>10^4$). Ainsi dans un réseau complexe qui composé plusieurs charges (passives et/ou à découpage), l'activation d'une des charges peut déclencher une fausse détection.

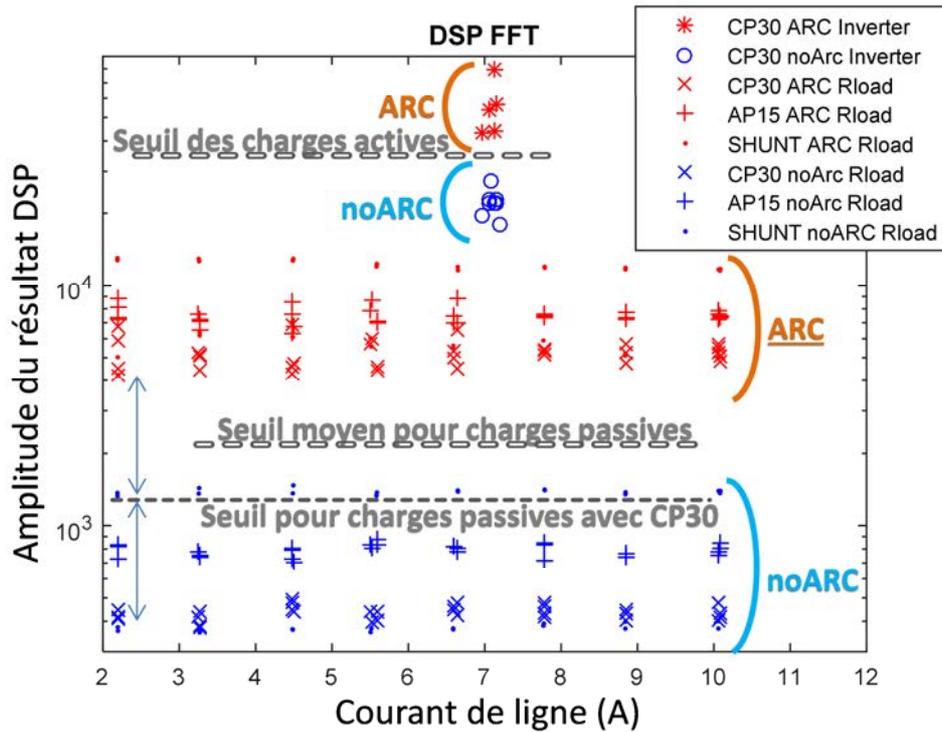


Figure 4-67 : Résultat de DSP pour différente charge avec Arc et sans Arc

La présence d'arc augmente la DSP du signal et son spectre sur charge résistive comme sur charge à découpage. C'est ce que le montrent les spectrogrammes d'arcs en Figure 4-68 sur charge résistive et Figure 4-69 sur charge à découpage.

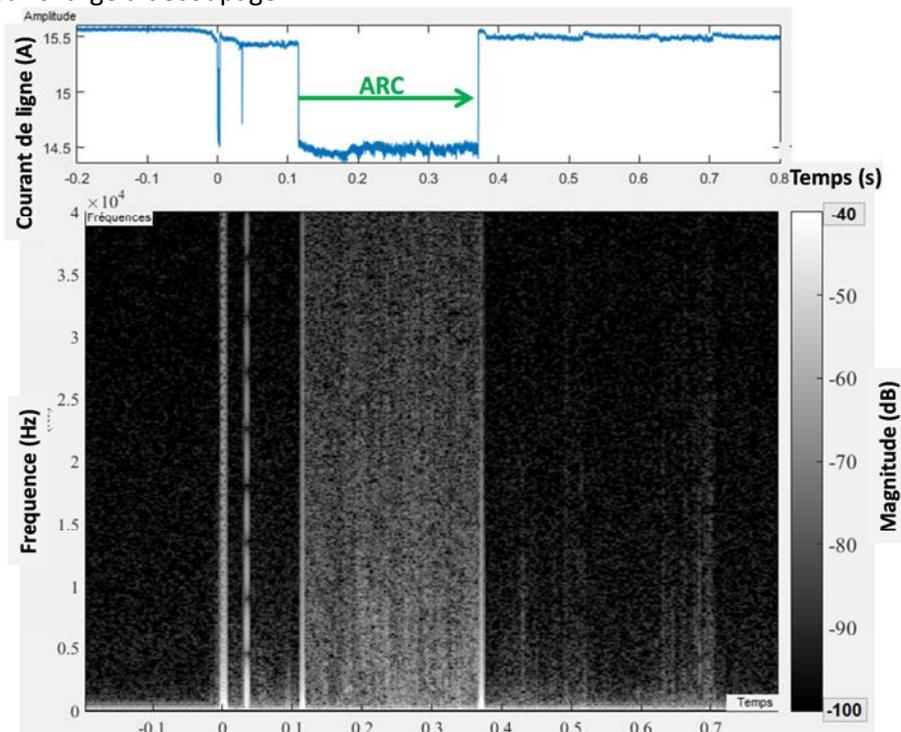


Figure 4-68 : Spectrogramme d'une charge résistive simple alimenté en 270VDC par écartement d'électrodes cuivre (Taille de fenêtre 10kS, espacement 1kS. Résolution spectrale 100Hz)

Figure 4-68 : Le maintien d'un arc série à partir de $t > 0,1s$ engendre une augmentation de la résistance totale du système ($R_{load} + R_{arc}$). Cette augmentation de l'impédance du système a pour effet de diminuer le courant de ligne par un saut (drop). Le spectrogramme présente peu

d'information spectrale avant l'apparition d'arc ($< -40\text{dB}$). À $t=0\text{s}$, deux brefs arcs sont produits par la mise en mouvement des électrodes (faux contacts). Le maintien de l'arc opère à partir $t>0,11\text{s}$ jusqu'à $t=0,38\text{s}$ et provoque un bruit aléatoire largement dispersé dans le spectre.

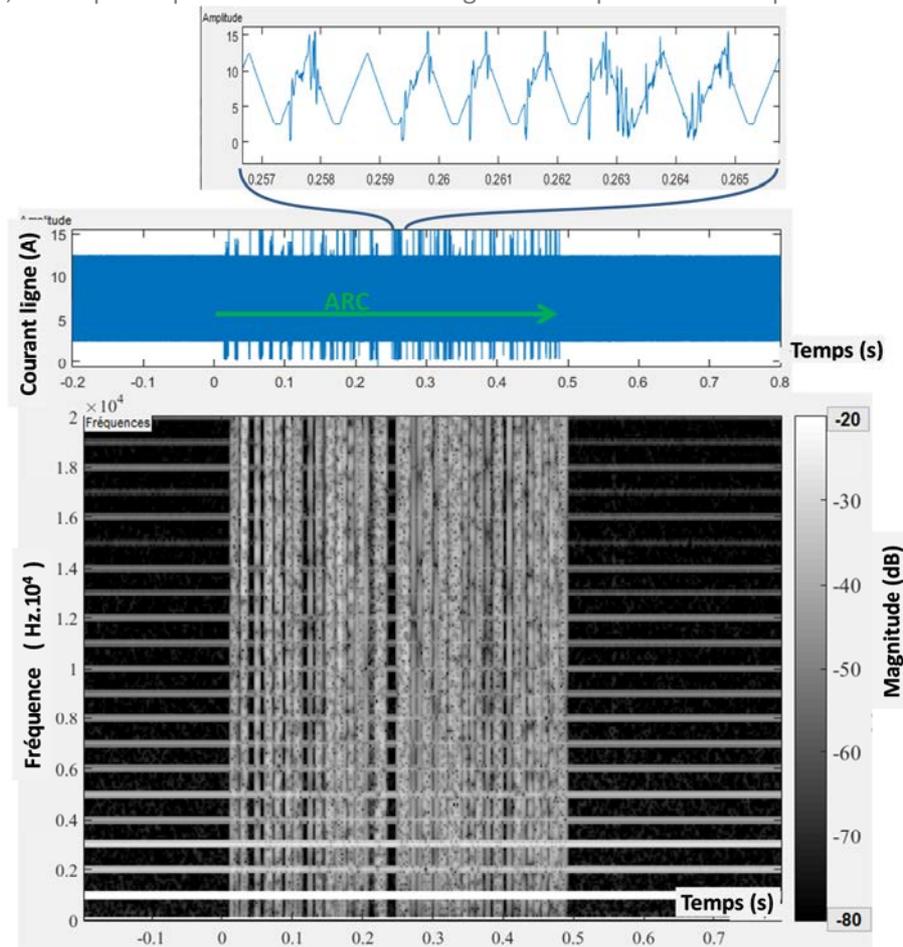


Figure 4-69 : Spectrogramme signal triangle (simili onduleur 0-10A) avec arc (charge minimale résistive 2.4A) sur 270VDC (taille de fenêtre 10kS, espacement 1kS. Résolution spectrale 100Hz)

La Figure 4-69 représente le courant de ligne et son spectre associé produit par une charge à découpage pilotée de type onduleur (Arc généré entre $t=0\text{s}$ et $t\cong 0.5$). En absence d'arc, le spectre est composé d'un ensemble de raies (fréquence fondamentale à 1kHz et harmoniques majoritairement impaires). En présence d'arc, les perturbations de l'arc s'ajoutent au spectre initial piloté par asservissement. Le spectre subit un large étalement spectral pendant le phénomène d'apparition d'arc.

Comme exposé précédemment, les charges à commutation disposent d'une étendue spectrale spécifique de DSP importante. L'arc crée une perturbation spectrale sur le même spectre. Pour pallier cela, la méthode proposée dans cette partie ne se base pas sur la densité de puissance, mais sur l'étalement spectral. Nous suggérons une approche temps-fréquence à partir de transformées de Fourier Discrète Fenêtrées (Short Time Fourier Transform : STFT). À partir de ce spectrogramme, plusieurs traitements sont proposés pour obtenir une détection robuste à l'apparition de charges à découpages ou lorsque les conditions expérimentales évoluent. Mais avant de poursuivre le traitement du spectrogramme en vue d'une détection, la STFT est adaptée aux besoins de la méthode.

En effet, les paramètres tels que la largeur de fenêtre, le type de fenêtrage, la fréquence d'échantillonnage et le taux de recouvrement des fenêtres peuvent influencer la qualité du spectrogramme. C'est pourquoi, afin de réaliser la STFT, le fenêtrage est adapté au type de bruit à observer. Les études antérieures tendent à montrer qu'un arc électrique s'apparente à un bruit blanc gaussien [YaHW15] ou bruit rose [Blad98, Rest07]. De ce fait, le fenêtrage de type Hamming (Figure

4-70) est privilégié afin de limiter les effets de repliement spectral. Sa largeur N détermine la résolution fréquentielle par $\Delta f = \frac{Fe}{N}$. Pour déterminer la répétition et le taux de recouvrement des fenêtres successives, Detombe [Deto14] définit un minimum d'une demi-fenêtre pour transcrire toutes informations impulsionnelles. Soit pour une fenêtre de largeur N un glissement au maximum de $\sigma = \frac{N}{2}$ points.

Le spectrogramme $X(n, k)$ d'indice temporel k s'exprime donc :

$$X(n, k) = \sum_{i=k-\sigma}^{k+\sigma-1} x_i \cdot w_{i-k\cdot\sigma} \cdot W_N^{n\cdot i} \quad (4.15.)$$

Où

w_N représente la fenêtre de pondération limitée à N termes

x_i le signal discrétisé et fenêtre normalisée $[-1 : 1]$ (Illustré Figure 4-70)

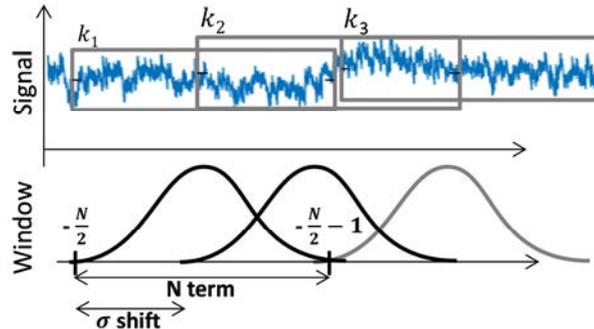


Figure 4-70 : Aspect du fenêtrage de type hamming et normalisé selon la variation min/max du signal fenêtré $X_{(n,k)}$ la composante fréquentielle d'indice k

4.3.4.2.2 Détection d'arc par IDS (Indice de Densité Spectrale)

Les différentes étapes de l'algorithme de détection basé sur l'analyse fréquentielle du courant de ligne sont résumées sur la Figure 4-71.

La première étape porte sur le calcul du spectrogramme du courant de ligne. D'après un seuil de bruit estimé en temps réel, l'indice de densité spectrale peut être ensuite calculé à partir du spectrogramme binarisé. La bloc de décision en dernière étape du processus permet de confirmer la présence d'un arc électrique dans le circuit (10ms de présence d'arc sur une durée de 100 ms [Assa00]) et également d'éliminer les transitoires qui pourraient entraîner de fausses détections.

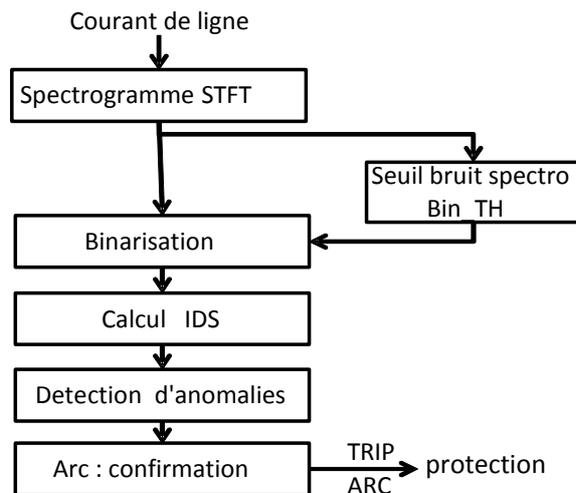


Figure 4-71 : Phases de la méthode de détection

L'acquisition du courant de ligne est opérée à une fréquence d'échantillonnage $F_e=1\text{MHz}$. Le calcul du spectrogramme du courant est réalisé avec une fenêtre de type hamming de 4096 points et répété toutes les 1024 points. La bande de fréquence observée est limitée à la plage 10kHz à 100kHz. En effet, les performances de la sonde se dégradent au-delà de 100 kHz. Les perturbations des alimentations essentiellement présentes aux fréquences inférieures à 10kHz sont également éliminées.

Afin de quantifier l'étalement spectral induit par l'apparition de l'arc dans le circuit, le spectrogramme $X(n,k)$ obtenu est dans un premier temps binarisé suivant la relation suivante :

$$bin(n,k) = \begin{cases} '1' & \text{si } X(n,k) \geq S \\ '0' & \text{si } X(n,k) < S \end{cases} \quad (4.16.)$$

Où

S représente le seuil de binarisation

$X(n,k)$ est l'amplitude du spectre calculé à partir de l'équation 1.

La Figure 4-72 montre les différents résultats obtenus à chaque étape de binarisation et calcul du IDS. Le courant de ligne est identique à celui représenté Figure 4-68 obtenu pour une charge $R=18\Omega$. Ici, le seuil de binarisation fixe est défini à -60dB .

L'indice de densité spectrale (IDS) est ensuite calculé suivant l'équation ci-dessous. Il évalue le taux d'occupation spectrale à partir du nombre de segments fréquentiels supérieurs au seuil de binarisation sur la plage d'étude entière.

$$IDS(k) = \frac{1}{N} \sum bin(k,f) \quad (4.17.)$$

N : nombre de points de la bande de fréquence sélectionnée f pour un instant k .

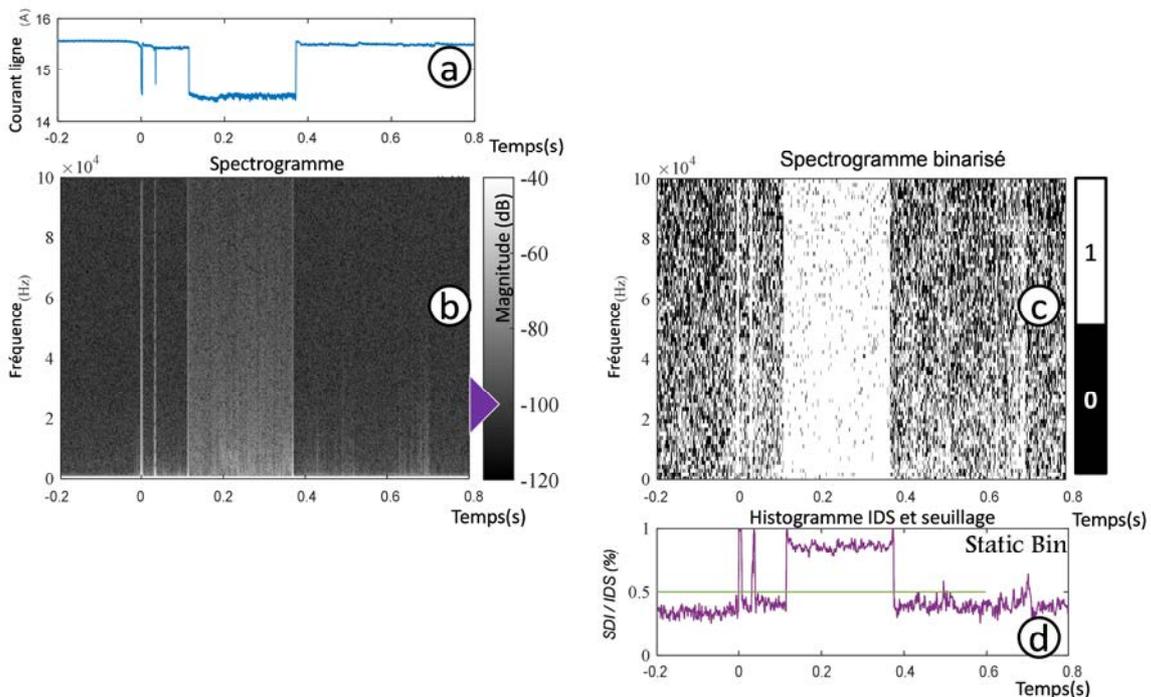


Figure 4-72 : Signal, Spectrogramme, binarisation selon un seuil -100dB et IDS correspondants (défaut permanent de 0.12s à 0.38s) FFT 4096pt/T=1024pt, $F_s=1\text{MHz}$

Le tracé Figure 4-72 montre le spectrogramme (b) du signal du courant de ligne (a). La binarisation du spectre (c) selon un seuil fixe de -100dB donne le calcul de l'IDS dans le temps sur la bande 10-100kHz. En présence d'un arc électrique, le SDI (d) est compris entre 0.8 et 0.9, mais reste inférieur à 0.5 en l'absence d'arc (À $t=0.2\text{s}$, les deux pics (glitch) correspondent à de brefs faux contacts lors de

l'ouverture mécanique de circuit avant l'introduction d'un défaut d'arc série dans le circuit électrique).

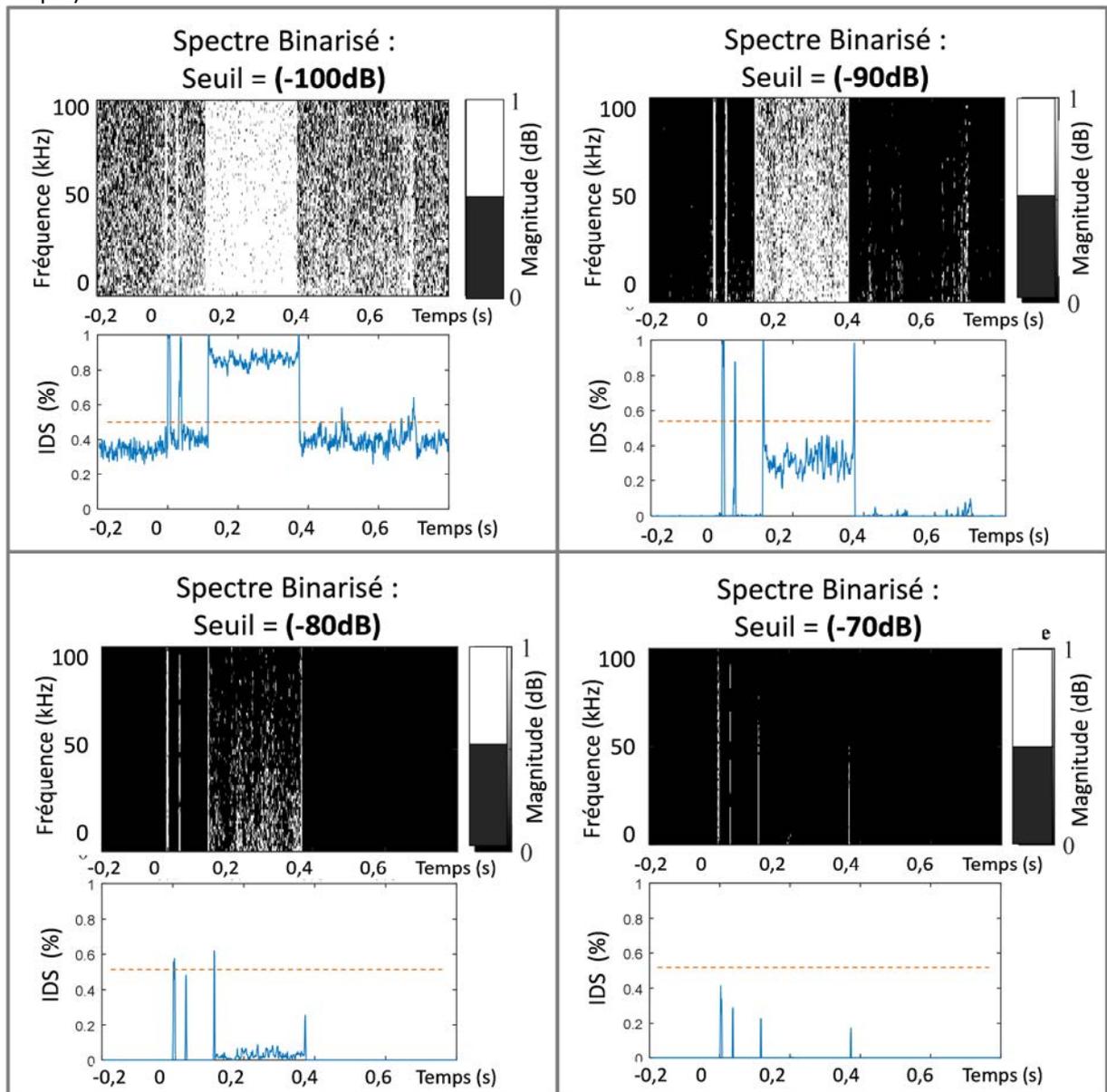


Figure 4-73 : Comparatif seuils fixes de binarisation (-70dB, -80dB, -90dB, -100dB)

Les Figure 4-73 présentent le tracé de l'index de densité spectrale (IDS) obtenu pour 4 seuils de binarisation statique différents : -100 / -90 / -80 / -70dB.

On y constate que au-dessus de -90dB, la binarisation caractérise moins de 40% de fréquences supérieures au seuil pendant l'arc. Et à partir du seuil -80dB, la sensibilité de la méthode ne décèle que les transitions abruptes.

Ainsi, pour un seuil de binarisation compris entre -100 et -90dB, la distinction entre les phases d'arc et sans arc est aisée. En revanche, lorsque la binarisation opère au-dessus de -80dB, la distinction d'arc est impossible, seules les variations abruptes sont perceptibles.

Il est donc important d'adapter le seuil aux conditions expérimentales (intensité, niveau de bruit du seuil, etc.). C'est pourquoi par la suite nous avons étudié l'impact des charges sur le comportement de l'IDS ainsi qu'une méthode permettant de positionner un seuil déterministe.

a) Définition du Seuil de binarisation (Bin_TH)

Le choix du seuil de binarisation est déterminant pour cette méthode. La Figure 4-74 représente les extremums (min-max) de l'IDS obtenus avec un seuillage fixe (-100dB) sur la plage de courant 3.3A-22A. Le graphique en chandelier représente également les valeurs moyennes de chaque échantillon en situation d'arc et sans arc sur charges résistives en régime établi.

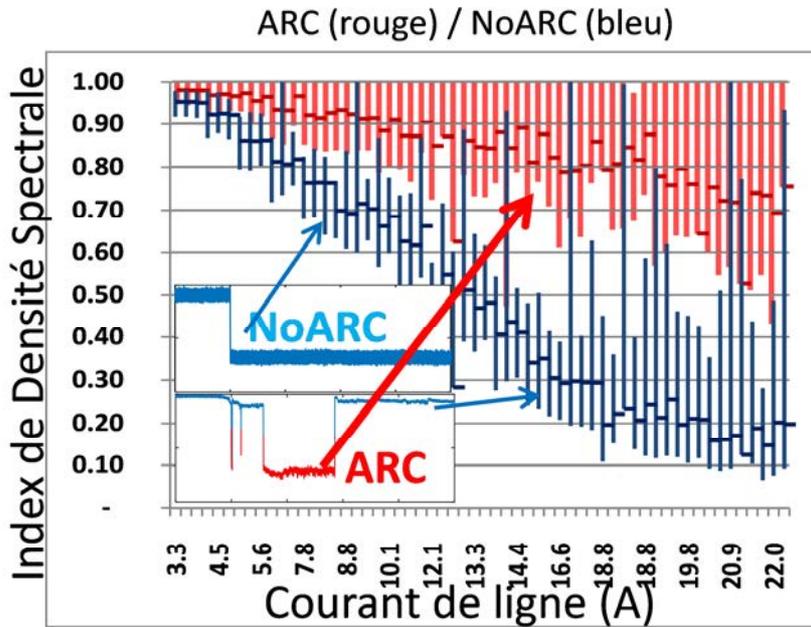


Figure 4-74 : chandelier IDS min-max-moyen (Seuil statique -100dB)

Dans la plage 3.3A à 17A, le seuil séparant les cas sains (noARC) et les cas d'arc (ARC) n'est pas constant.

Le bruit de fond (caractéristique sans arc) prédomine à faible intensité avec une valeur de l'IDS proche de 1. Plus le courant est faible, plus les valeurs moyennes du SDI obtenues avec et sans arc sont proches.

Les résultats de l'IDS en Figure 4-74 donnent des résultats non linéaires et sans proportionnalité avec le courant de ligne. Ils dépendent à la fois des courants et des conditions expérimentales. Afin de s'affranchir de ces inconvénients, le seuil de binarisation est calculé régulièrement sur une fenêtre selon une moyenne glissante des amplitudes du spectre sur une plage Temps/Fréquence ($Nd - \Delta(F)$) prédéfinie (illustration Figure 4-75). L'objectif de cette étape est de s'affranchir de la non-linéarité de l'IDS en fonction du courant et des conditions expérimentales (capteurs, charges, bruit de fond, fréquences de découpages, etc.).

Le seuil de binarisation de l'instant ' k ' est évalué à partir de Nd spectrogramme ayant dT périodes d'antériorité comme le décrit l'illustration Figure 4-75 pour l'équation :

$$d(k) = \frac{1}{(N_d) \cdot (f_H - f_l)} \sum_{k=0}^{-N_d} \sum_{f=f_l}^{f_H} Mstft(k - dT, f) + \Delta_{err} \quad (4.18.)$$

Avec :

Nd , le nombre de fenêtre d'estimation

$f_H - f_l$, la plage de fréquences prise en compte

dT , le retard avec l'instant ' k '

k , l'instant d'estimation

Δ_{err} , tolérance de l'estimateur

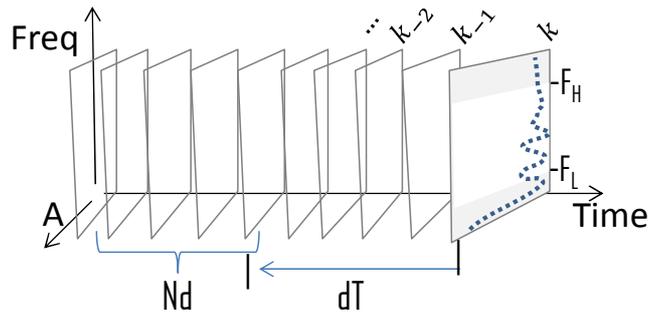


Figure 4-75 : Illustration du mode de calcul du seuil de binarisation dynamique avec latence par fenêtres glissantes

L'évolution du niveau de bruit qui donne le seuil de binarisation dynamique et latent s'observe Figure 4-76 avec une fenêtre $N_d=10\text{ms}$ et une latence $dT=100\text{ms}$. Pour cet exemple, le signal (similaire Figure 4-72) présente un niveau de bruit inférieur à -100dB hors arc et est compris entre -90dB et -95dB pendant l'arc ou les transitions abruptes avec une latence de 100ms .

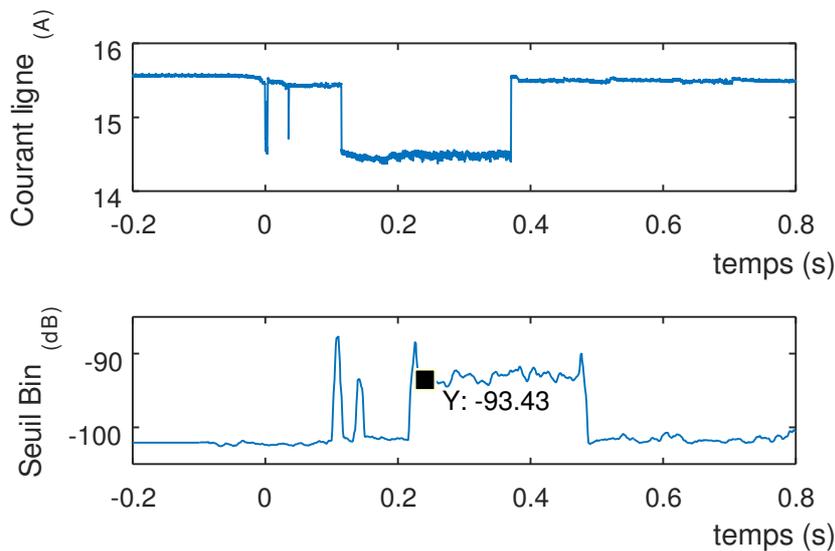


Figure 4-76 : Évolution du bruit pour l'élaboration du seuil de binarisation dynamique

b) Niveaux d'IDS pour les charges résistives avec seuil de binarisation dynamique

La Figure 4-77 représente les résultats du calcul des niveaux d'IDS sur des charges résistives en utilisant le seuillage adaptatif.

Dans le cas d'un seuil de binarisation fixe (Figure 4-74), il est difficile d'établir un seul seuil discriminant identique à toutes les charges. Avec un seuil de binarisation dynamique, pour l'ensemble des valeurs du courant comprises entre 3.3 et 22 A, les valeurs des IDS moyens Arc/noArc sont bien séparées et sont comprises entre 0.3 et 0.4 en cas d'absence d'arc et entre 0.6 et 0.9 en présence d'un défaut série dans le circuit.

Un seuil de décision identique pour l'ensemble des valeurs du courant entre les zones Arc et NoArc peut ainsi être choisi dans la plage de valeur de l'IDS entre $[0.4 ; 0.6]$.

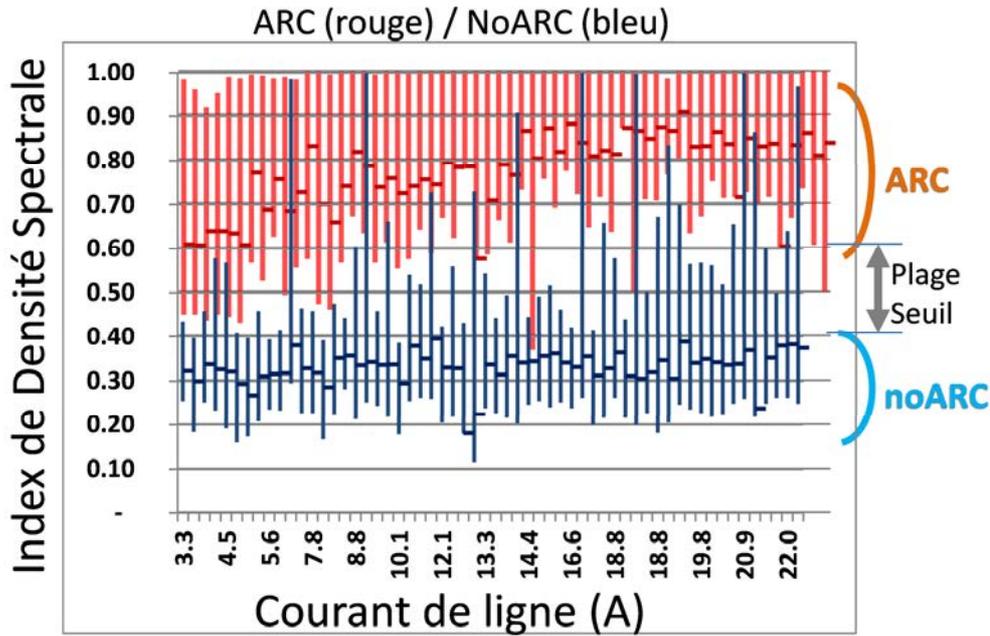


Figure 4-77 : résultats statistiques min-max-mean de l'IDS (par seuil de binarisation Autoadaptatif) Nd=10ms; dT=-100ms

Les performances de détection sont calculées pour 3 valeurs de seuil de décision sur un échantillon de la base de données (270 cas sans arcs et 128 cas avec arc). Les performances sont exprimées par les courbes de ROC (Figure 4-83) et matrices de confusions (Tableau 19) en fonction du taux de détections erronées (specificity), du taux de bonnes détections (sensitivity) et du taux global de bonnes détections (Accuracy) tel que décrit en section 3.3 (page 78).

L'objectif d'une bonne détection est d'avoir une valeur de spécificité (specificity) faible et une valeur de sensibilité (sensitivity) élevée avec un taux de diagnostic juste (accuracy) maximum.

Tableau 19 : Performance suivant le seuil de détection "h"

	<i>h</i>	0.4	0.5	0.6
Specificity(%)		26	28	36
Sensitivity(%)		100	100	98
Accuracy(%)		50	51	56

Pour ces seuils de détection d'anomalie ($h=0.4, 0.5, 0.6$), le taux de détection (sensitivity) est proche de 100%. En revanche, de nombreuses détections erronées (faible spécificité respectivement de 26%, 28%, 36% pour différentes valeurs de h) et font chuter l'exactitude (accuracy) à moins de 56%.

Une bonne détection est obtenue lorsque la valeur de la spécificité est faible et la sensibilité est forte. Bien que le nombre de fausses détections soit important, celles-ci apparaissent essentiellement lors des transitions de charges ou de transitoires (voir l'IDS avant filtrage de confirmation Figure 4-84-B).

c) Niveaux d'IDS pour des charges non linéaires.

La Figure 4-78 présente les valeurs de l'IDS obtenues en présence et sans arc pour différentes charges. Les valeurs moyennes de l'IDS sont bien distinctes pour la majorité des charges (onduleur, régulateur de puissance dynamique, charge active résistive, PWM et Résistance). Toutefois, pour l'onduleur et le régulateur de puissance, les valeurs extrêmes se chevauchent et peuvent conduire à de fausses détections.

En revanche, en présence de charges fortement inductives, la valeur moyenne des IDS obtenus *avec* ou *sans arc* électrique dans la ligne a des valeurs basses (<0.6 en moyenne) et proches, voire

superposées. Dans ce cas, il est prévisible que le seuil de séparation entre les deux états (avec et sans arc) sera difficile à positionner pour une détection optimale.

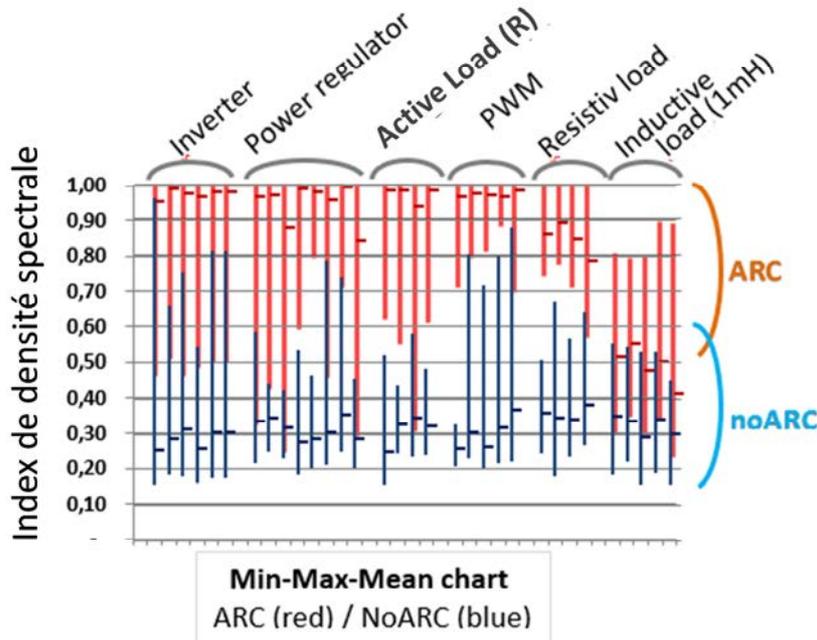


Figure 4-78 : IDS de différentes charges

À partir du suivi de la courbe de l'IDS, nous mettons en place une logique de décision de la présence d'un arc électrique qui minimise le taux de fausses détections à l'aide d'une méthode de confirmation du maintien des perturbations anormales.

d) Étape de confirmation/décision

Le seuillage de l'IDS (seuil fixe d'occupation spectrale d'environ 0.5 déterminé statistiquement lors du Tableau 19) permet d'obtenir un signal binaire de détection (booléen) noté :

$$\text{Detection anomalie } (k) = \begin{cases} '1' & \text{si } d(k) \geq h \\ '0' & \text{si } d(k) < h \end{cases} \quad (4.19.)$$

L'exécution de ce seuillage est illustrée par la Figure 4-80 selon différentes stratégies.

La démarche suivie dans le bloc de confirmation de la mise en protection (TRIP) s'apparente au processus proposé pour la détection d'anomalies dans les bus de communication série temps réel (LIN,CAN,VAN,FLEXRAY). L'analyse portant sur l'IDS seuillé est résumée sur le graphe de la Figure 4-79. Dans cette application, l'objectif de détection est fixé à 10 ms cumulatives de présence d'arc sur une durée totale de 100 ms d'observation. Ce délai doit conduire à l'activation de l'indicateur de présence d'un défaut d'arc (Trip) dans le circuit. Le principe de fonctionnement de la machine à état est le suivant. Sans défaut dans le circuit (State 0), l'indicateur Trip est à zéro. L'indicateur noté 'count' s'apparente à un compteur. Dès qu'une anomalie (détection d'anomalies : $IDS > h_threshold$) est présente, le compteur est incrémenté d'une valeur a , et ainsi de suite après chaque cycle d'analyse (DFT reset). Dans le cas contraire, le compteur est décrémenté d'une valeur b à chaque itération. Dès que la valeur du compteur dépasse celle du seuil fixé à $L1$, l'indicateur de présence de l'arc (Trip) est activé.

Sur la Figure 4-80, $L1$ est fixé à 100 et les coefficients a & b sont exprimés en pourcentages de $L1$.

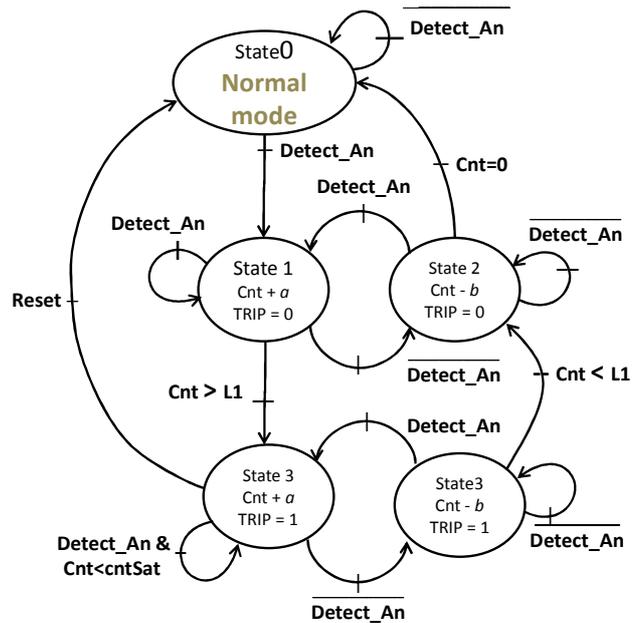


Figure 4-79 : Machine à états de la partie décision

La Figure 4-80 illustre le mode de fonctionnement de l'étape de confirmation d'arc après détection (selon différentes valeurs de a, b).

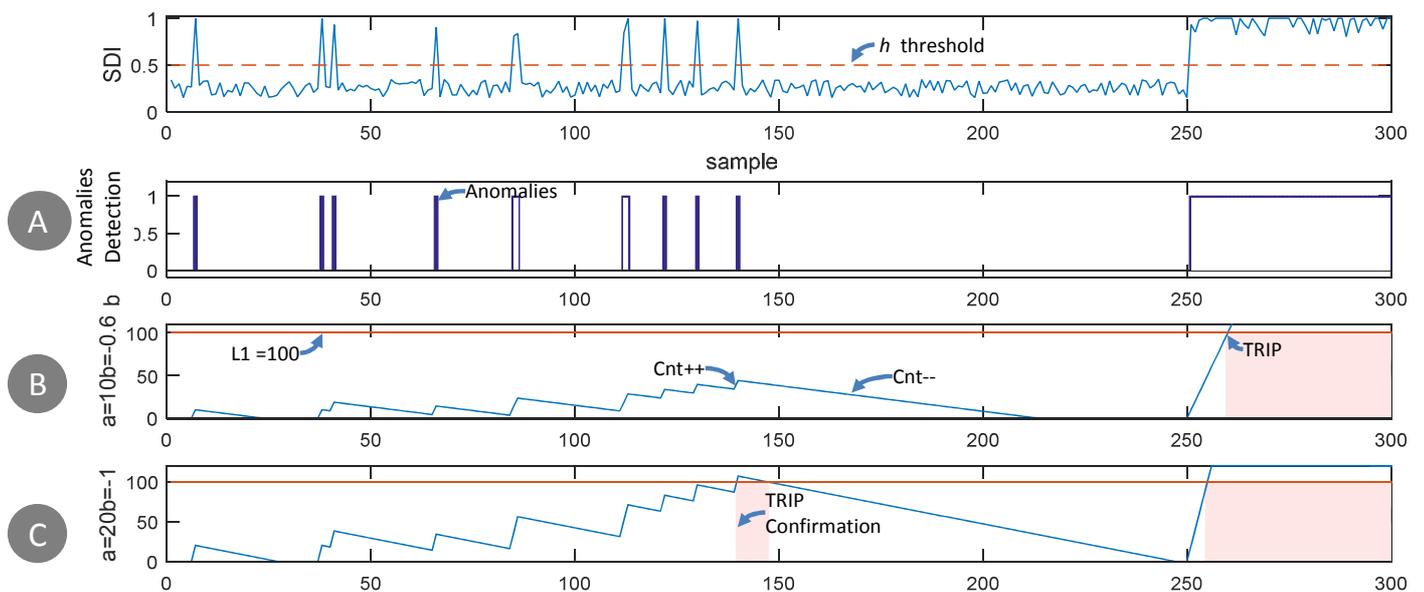


Figure 4-80 : Résultat du bloc de confirmation

La Figure 4-80-A correspond au tracé de détection d'anomalies lorsque les défauts d'arcs ne sont pas entretenus (entre 0 et 150 ms). 11 défauts ont été détectés. L'arc apparaît de manière irrégulière dans le circuit. Au-delà de 250 ms, la détection d'anomalie est maintenue au niveau 1 indiquant la présence d'une perturbation permanente.

Sur la Figure 4-80-B, avec le réglage des paramètres $a = +10\%$, $b = -0.6\%$, les défauts d'arcs qui apparaissent de manière aléatoires et de courtes durées ne sont pas pris en compte. Entre 0 et 150 ms, l'indicateur Trip n'est ainsi jamais activé. Par contre dès qu'un défaut entretenu (ou quasi entretenu) apparaît, la détection est opérationnelle et l'indicateur Trip est activé à "1" en 10ms.

Pour un second réglage des paramètres ($a = +20\%$ & $b = -1\%$) Figure 4-80-C., après une durée de 100 ms pendant laquelle plus de 10 ms de présence d'arc cumulée a été détecté, l'indicateur Trip est déclenché. Pour la répétabilité expérimentale des "TRIP", l'indicateur Trip est repositionné

à l'état 0 après un délai sans défaut. Il est ensuite activé lors de la détection d'une perturbation maintenue de moins de 10ms.

Le tracé de la Figure 4-81-A représente le courant de ligne obtenu en présence d'un défaut d'arc par le test du plot vibrant (charge résistive). Ces phénomènes d'apparition d'arcs prompts et inattendus correspondent à de faux contacts de fréquences et de durées variables. Sur la courbe B sont représentés l'indicateur Trip (barres bleues) et le tracé du compteur (en vert). Par la répétition d'impulsions fugitives, le compteur s'incrémente jusqu'à déclencher la protection TRIP.

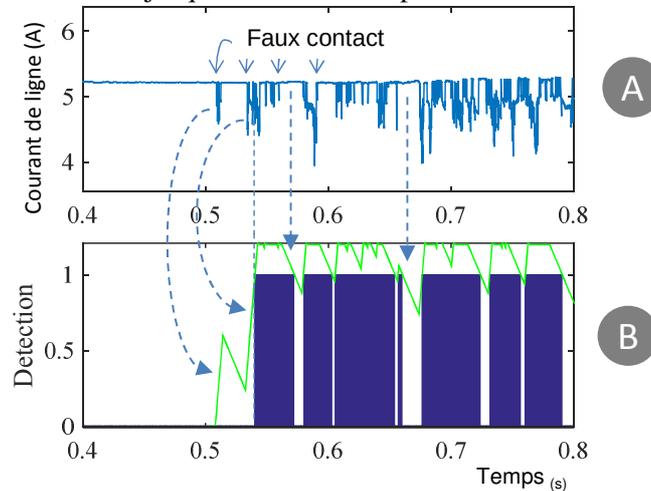


Figure 4-81 : résultat du test par plot vibrant

La courbe Figure 4-82 trace la durée cumulée d'apparition d'un arc (selon la tension de contacts mesurée). Après 10ms de présence d'une anomalie, la protection est activée telle que le présente la Figure 4-81-B.

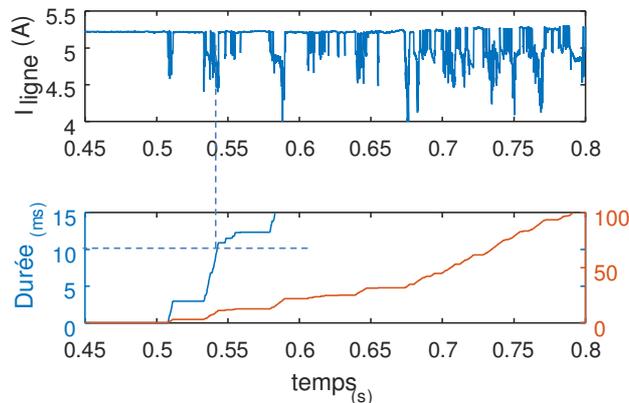


Figure 4-82 : Durée d'arc (Dilatation d'ordonnée en bleu)

L'utilisation du compteur permet de gérer numériquement et mémoriser la présence de défauts fugitifs (cpt en décroissance >0) pour déclencher plus rapidement lorsqu'un nouveau défaut bref réapparaît.

4.3.4.2.3 Résultats

La Figure 4-83 est une courbe de ROC sur laquelle est tracée la sensibilité en fonction de la spécificité pour l'ensemble des charges résistives du panel avec et sans le bloc de confirmation. Les valeurs du seuil de détection IDS de 'h' évoluant de 0.1 à 0.9 pour un coefficient de confirmation de $a = 10$ et $b = -1$.

La lecture d'une courbe de ROC permet de déterminer graphiquement le seuil optimum permettant d'obtenir la meilleure détection possible soit une $sensitivity=100\%$ et $1-specificity=0\%$ de non-protection de cas sain ($specificity = 100\%$). Ces résultats sont obtenus pour $h=0.5$ (partie supérieure gauche de la courbe).

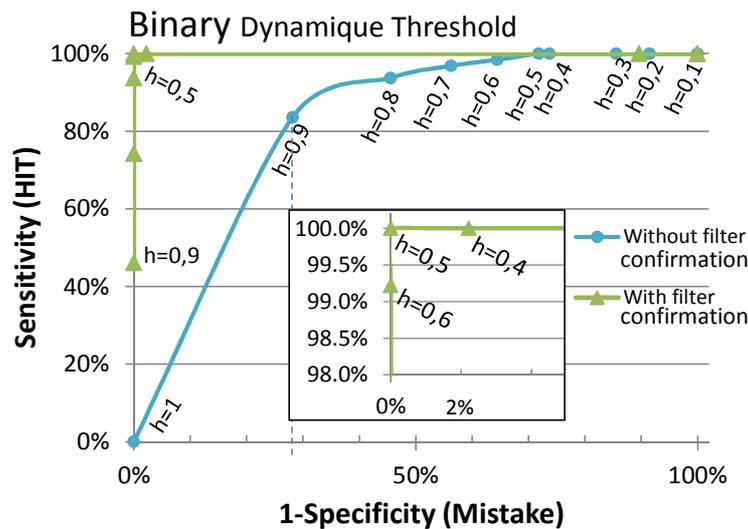


Figure 4-83 : Courbe de Roc (1- Specificity) / Sensitivity sur charge R

Sans le dispositif de confirmation, la meilleure performance est obtenue graphiquement pour $h = 0.9$ (le point le plus proche de l'angle supérieur gauche). Dans ce cas, les performances sont de seulement 72% de spécificité (soit 28% d'erreurs sur cas sains) et 84% de bonnes détections. Pour atteindre une sensibilité aux défauts de 100%, $h=0.5$. Toutefois, dans ce cas, le taux de fausses détections atteint 75%.

Le bloc de décision permet d'obtenir de meilleures performances comme le montre la seconde courbe de ROC de la Figure 4-83 avec 100% de bonne décision lorsque le seuil de l'IDS $h=0.5$ est associé à l'algorithme de confirmation.

Les coefficients a & b sont alors à valider pour détecter les arcs dans la fenêtre temporelle proposée par la norme AS6087-270V-HVDC de 10ms d'arc parmi 100ms

Tableau 20 : Justesse (Accuracy) des scores, avec différent coefficient a&b

Seuil de l'IDS	a rate	b rate						
		1%	2%	5%	10%	20%	50%	100%
h=0.5	1%	92%	91%	90%	90%	90%	90%	90%
	2%	99%	98%	98%	98%	97%	97%	97%
	5%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	10%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	20%	92%	96%	99%	99%	100%	100%	100%
	50%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
	100%	39%	39%	39%	39%	39%	39%	39%

Pour un seuillage h fixé à 0.5, le taux de bonnes décisions est donné dans le Tableau 20 pour différentes valeurs des coefficients a & b sur l'ensemble de nos charges résistives.

Les meilleurs résultats sont obtenus pour a compris entre 5% et 20% et se dégradent lorsque a augmente. Étant donné que la base de données est principalement composée de signaux d'arcs maintenus (peu d'arcs fugitifs, de courtes durées), l'influence des valeurs de b a peu d'influence.

Cette méthode est ensuite testée pour d'autres signatures du courant de ligne avec des charges variées (R, RL, Convertisseur, onduleur, régulateur, etc.). Les résultats de détection avec le bloc de décision/confirmation sont présentés dans le Tableau 21.

Tableau 21 : Matrice de confusion pour différentes charges

	TP	TN	FP	FN	TPR	TNR	ACC
resistiv load	128	270	0	0	100%	100%	100%
Regul inverter	8	3	0	2	80%	100%	80%
Regul Power	10	∅	∅	0	100%	∅	100%
Regul Resistive	13	∅	∅	1	93%	∅	87%

' ∅ ' données non acquises

Ces statistiques présentent une bonne couverture des cas d'arcs, quelle que soit la charge. La stratégie de non-détection (FN) est privilégiée plutôt que celle qui consiste à détecter à tort des cas sains (FP=0). En effet, tout déclenchement intempestif a pour conséquence de mettre hors service la distribution d'énergie pourtant nominale.

Le taux de bonne détection est donc de 100% pour les charges résistives et des charges à régulation de puissance. Mais ce taux se dégrade pour atteindre 93 et 80% respectivement pour l'onduleur et la régulation d'impédance sans pour autant créer de faux déclenchements.

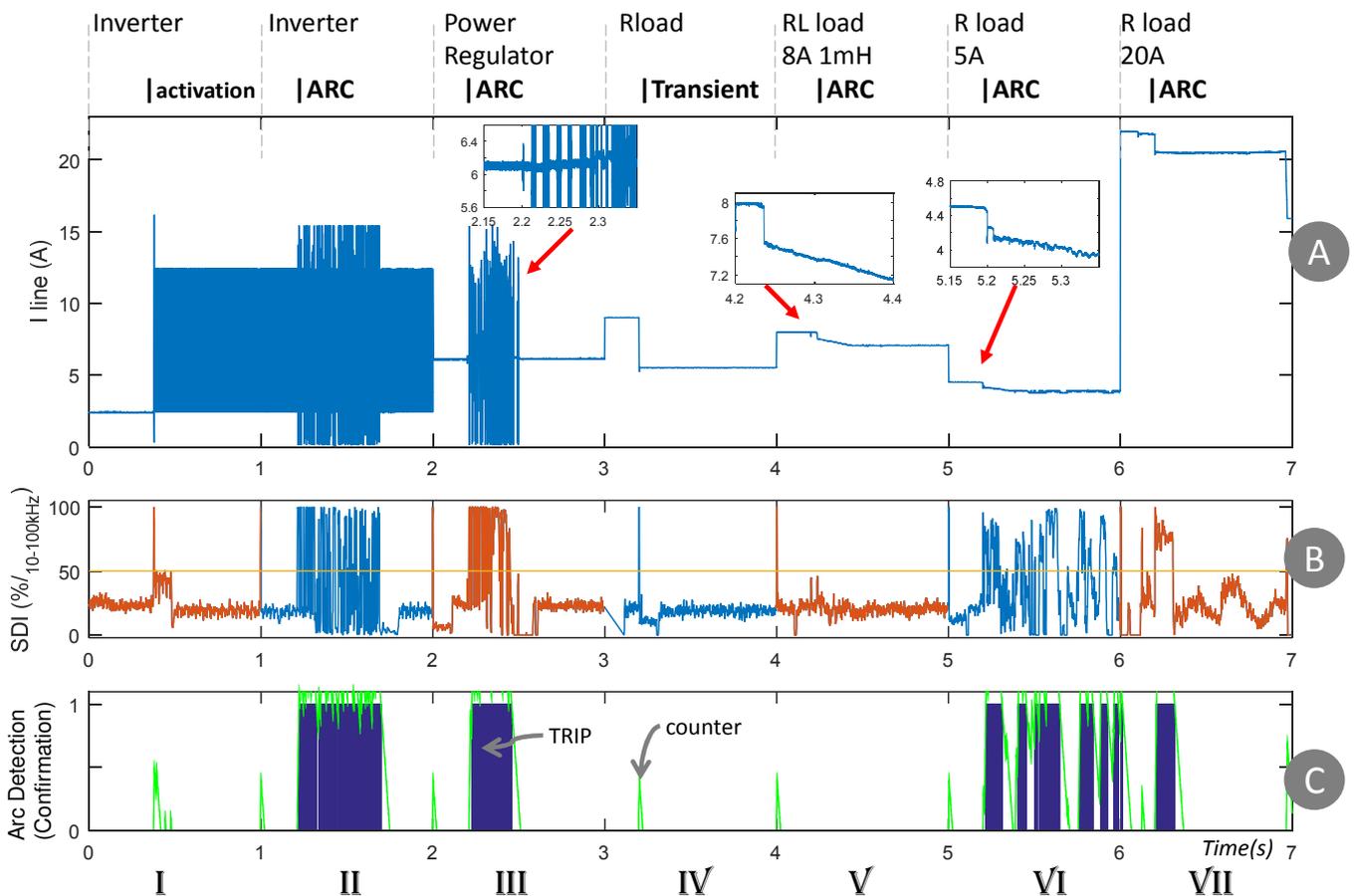


Figure 4-84 : Performance de détection pour 6 charges différentes

Le courant de ligne de la Figure 4-84-A a été construit en associant bout à bout 6 signatures de courant obtenues pour 6 charges différentes.

- Pour une charge résistive (segment VI, VII), l'apparition d'un arc se traduit par une chute de courant. Une forte variation du contenu spectral lié à la présence de l'arc électrique se traduit par une variation importante de l'IDS. La détection de la présence d'un arc séries dans les résistances (5 A et 20 A) est assurée (Trip=1 Figure 4-84-C).

- Si la charge devient inductive (Segment V : $L=1\text{mH}$ et $I=8\text{A}$), les perturbations du courant liées à l'arc électrique sont fortement atténuées (lissage du courant par effet selfique). Les fluctuations de l'IDS deviennent négligeables (Figure 4-84-B). La détection de la présence d'un arc électrique n'est pas réalisée (Figure 4-84-C).

- Dans le cas d'une variation de résistance (segment IV), qui se traduit par un courant passant de 20 A à 5 A, le dispositif n'a pas détecté de défaut, Trip reste à l'état bas (aucune fausse détection).

- Pour une charge de type inverter (segment I et II), la présence de fréquences de hachage n'entraîne pas de fausse détection.

En fonctionnement sans défaut, l'indicateur Trip reste à l'état bas. Par contre en présence de défauts d'arc, des perturbations viennent se superposer au courant du 'inverter' (le SDI reste à une valeur faible, Figure 4-84-B). Ces perturbations sont détectées par le dispositif et la détection du défaut d'arc est assurée (Figure 4-84-C).

- Dans le cas d'une charge de type 'power regulator' (segment III), la détection est parfaitement assurée également (Figure 4-84-C). Chaque transition de charge sur la figure 16 se traduit par un pic dans le SDI (Figure 4-84-B). Toutefois de durée très faible, cette perturbation n'entraîne dans aucun des cas la détection. En effet, lors de transition ou variation du bruit, le seuil de binarisation (bin_Th) s'adapte dans un délai de dT .

4.3.4.2.4 Limites

Cette méthode présente l'avantage d'une détection sûre et adaptée aux conditions expérimentales. Étant basées sur l'observation du bruit dans le signal, en revanche les performances baissent lorsque le bruit produit par un arc électrique est atténué (soit par un filtrage selfique du courant de ligne, soit par la stabilisation de la décharge).

C'est le cas particulier présenté Figure 4-85 où l'arc est produit entre deux électrodes carbone. Ici, l'arc s'est stabilisé et génère un comportement périodique qui se traduit par des raies harmoniques sur le spectrogramme et paralyse la détection par l'IDS.

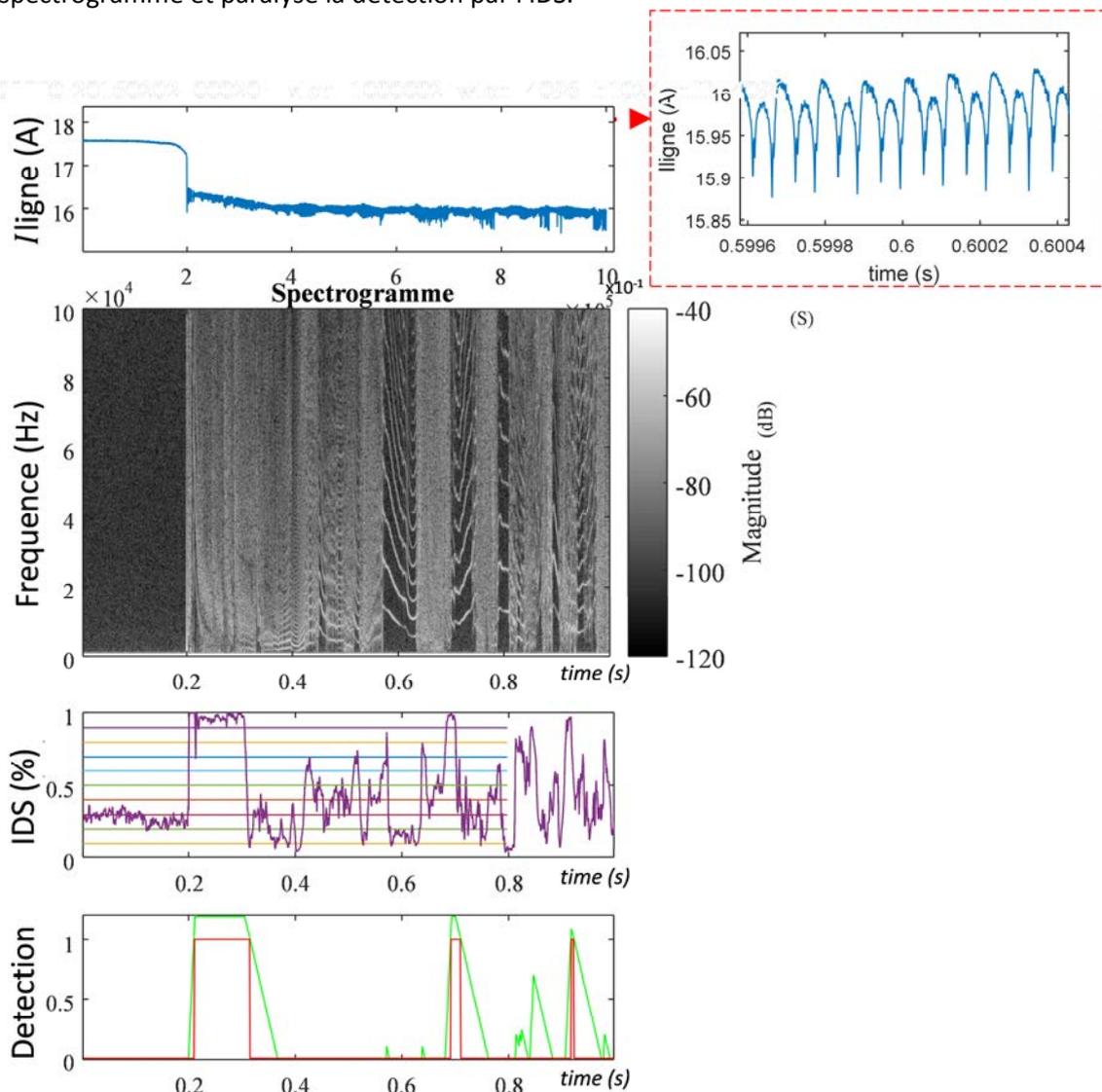


Figure 4-85 : Spectrogramme et résultat de détection à partir de l'IDS sur arc carbone (ouverture)
 $R=15.5\Omega$, $L=35\mu H$, alimentation $270V_{DC}$

4.3.5 Conclusion sur les critères

La problématique de la détermination d'un seuil est difficile à résoudre. Nous avons proposé une nouvelle méthode d'évaluation des résultats de chacun des 5 critères élaborés au cours de ce chapitre à partir de la variation de charge ou de l'intensité du courant qui traverse le défaut d'arc. Ces résultats permettent de s'accorder avec l'objectif de réduire au maximum le taux de fausse détection faites à bord d'un avion afin de ne pas troubler les pilotes avec de fausses alertes ou la perte un équipement vital à la navigation.

Tableau 22 : Récapitulatif des performances (justesse : accuracy) de chaque méthode

Méthode	Charge R	Charge R+RL
1- Puissance du résidu (bruit)	99.9%	97.7%
2- Centralisation autoCorrélation	96.9%	87.9%
3- Moyenne variance glissante	100%	98.4%
4- Critère fréquentiel	99.8%	99.2%
5- Fréquentiel par IDS	100%	-

Comme le rappel le récapitulatif Tableau 22, parmi les 5 méthodes de détection originales présentées au cours de ce chapitre, l'analyse temporelle de la puissance du résidu offre une performance d'environ 99.9% de bonnes décisions sur charges R. Les rares cas de non-détection sont produits par l'absence de bruit lors de l'apparition de l'arc (électrode en laiton à basse pression). Pour les charges inductives, cette méthode est sensible en fausse détection lorsque la transition de charge saine RL est très rapide ($1A/\mu s$). La réaction de résonance RLC du système entraîne alors quelques cas de détection à tort. Mais le seuillage proportionnel à ΔI compense une partie des risques de fausse/non-détection. Bien que performant (97% de bonnes décisions), le critère de la dispersion de l'autocorrélation est confus sur certains cas de variation de charge et notamment sur les charges selfiques. La méthode temporelle d'évaluation par variation de variance montre une dispersion des résultats proportionnels à l'intensité du courant ou de l'écartement. Ces observations concordent avec les constatations faites sur l'analyse phénoménologique du chapitre 1. De fait, cette méthode présente l'avantage de ne pas dépendre du courant de ligne dans le positionnement d'un seuil discriminant, ce qui lui confère 100% d'efficacité sur les charges résistives.

Les méthodes basées sur l'analyse fréquentielle présentent un haut niveau d'efficacité. Avec plus de 99% de bonnes décisions sur charges RL, la méthode par bande de fréquence 1kHz à 10kHz est la plus robuste sur les charges légèrement inductives. Mais sa faiblesse réside dans sa vulnérabilité aux charges qui possèdent un courant de forme périodique dans cette plage de fréquence tels que les onduleurs ou hacheurs. C'est pourquoi nous avons développé la technique de détection par IDS afin de contourner les fausses détections sur charges à découpage nominales ayant un contenu harmonique réparti dans le spectre.

Ces méthodes peuvent être utilisées individuellement ou en association pour confirmer la détection et éviter les fausses détections (déclenchement intempestif). L'étude de cette association est proposée par la suite en partie 5.1.

Chapitre 5 :

INTÉGRATION DES MÉTHODES PROPOSÉES EN DETECTION MULTICRITERES

- 5.1 ASSOCIATION DE MULTIPLES CRITÈRES
- 5.2 PERSPECTIVES ET ÉVOLUTIONS
- 5.3 INTÉGRATION DES ALGORITHMES EN DÉMONSTRATEUR

5 Méthode proposée et démonstrateur

Le chapitre précédent a fait l'objet de l'analyse de différents critères séparément. Chacun de ces critères aboutit à des résultats encourageants. L'idée de ce chapitre est de mettre en place un système exploitant l'analyse des signaux selon différents critères en parallèle et un dispositif de décision qui a pour but d'exploiter l'ensemble des résultats pour confirmer la décision. Plusieurs méthodes de décision sont proposées dans la littérature. Notre approche consiste dans un premier temps à analyser la combinaison de plusieurs critères et identifier si une logique simple de décision peut être déduite. La deuxième partie du chapitre est consacrée à l'étude d'un démonstrateur pour finir par la présentation des résultats avec ce démonstrateur.

5.1 Association de multiples critères

5.1.1 Constitution d'un détecteur combiné [détection d'évènement, analyse, décision]

Dans les conditions d'un cœur de distribution d'énergie, l'élaboration d'un algorithme de détection se base sur l'analyse multicritères (voir section bibliographique dédiée en 2.3.3 page 64) du signal d'intensité du courant. Tel que vu par la bibliographie, l'arc présente une variation d'ordre aléatoire influençant l'impédance de ligne chargée. Cette variation de conductivité est aisée à mesurer par la charge lorsque la tension d'alimentation varie. En revanche, seule la signature du courant (ou puissance) consommée par les charges est visible du point de vue du cœur de distribution. Ce sont ces anomalies que décèle l'algorithme proposé.

La structure élaborée au cours de ces travaux se décompose en 3 parties transcrites Figure 5-1 :

- Pré-Détection d'une discontinuité du courant de ligne pouvant être dû à un arc (évènement de claquage d'isolant, "drop" à l'ouverture d'un contact, etc.)
- Analyse critère par critère avec décision individuelle
Ces critères sont décrits en section 4.3 et étudie l'influence du comportement de l'arc sur le domaine temporel, fréquentiel, temps-fréquence, dispersif et chaotique du signal brut ou du "pseudo-résidu".
- Décision globale basée sur l'ensemble des critères.
Cette logique de discrimination est décrite ci-après.

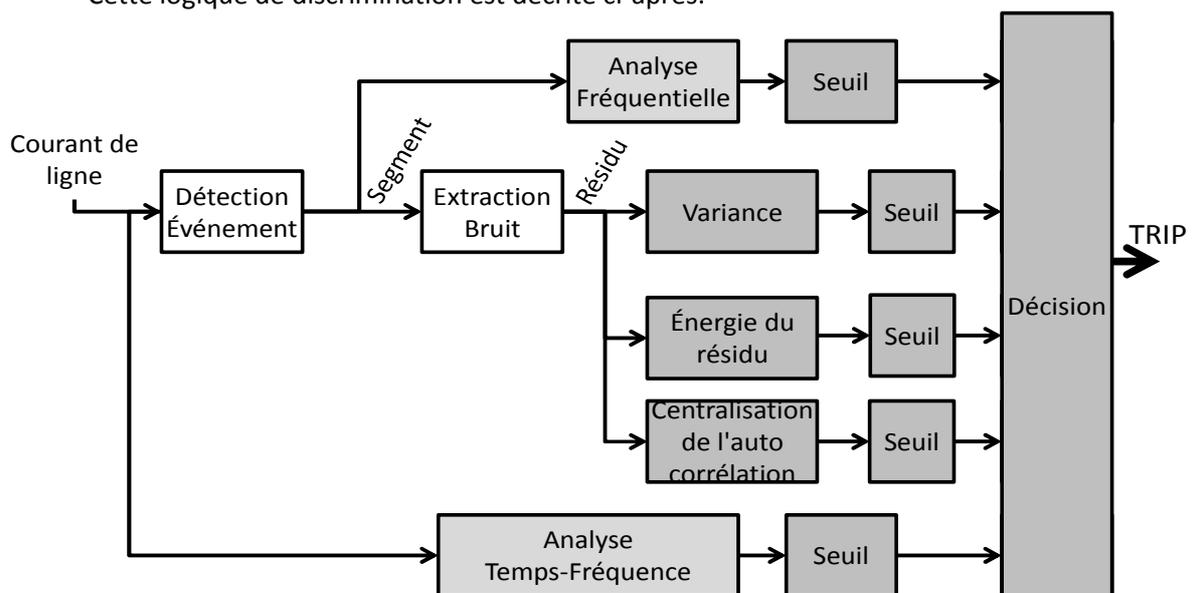


Figure 5-1 : Algorithme de discrimination d'arc selon les 5 critères sélectionnés

La logique de discrimination abordée pour la décision finale consiste à apprécier les 5 critères ensemble afin d'optimiser la détection et éviter les fausses détections de cas nominaux tout en renforçant le taux de détection.

Résultats

La validation finale des 5 critères étudiés est réalisée sur un panel de signaux réels (commun aux 5 résultats) composés de 610 cas sur charges résistives, dont 75% d'arc; et 383 cas de charges légèrement inductives (de 250µH à 1mH et 5 cas à 34mH) dont 50% d'arc.

Sur ce panel de signaux, la Figure 5-2 issue du Tableau 23 décrit le taux de bonnes et mauvaises détections de chaque critère pour les charges R et RL. On y constate que sur les charges R, le critère 5 qui est la méthode fréquentielle par IDS présente 8 mauvais diagnostics (Figure 8-17 à Figure 8-19 en annexe). Ceux-ci sont surtout réalisés sur une série de mesures faite à partir d'électrodes Laiton (6/8) avec un écartement compris entre 0,5mm et 1.7mm à basse pression (100hPa). Le spectrogramme de ces signaux est peu pollué par la présence d'arc.

Pour les charges inductives, les critères 1 (Puissance du résidu) et 5 (IDS) ont les mauvaises décisions en commun et partagent ces erreurs avec les critères 3 (variation de variance) et 4 (Centralisation de la corrélation). Seul le critère 4 d'analyse fréquentielle sur la place 1kHz-10kHz est très réactif pour les charges RL avec seulement 2 erreurs (<1%) sur l'ensemble des 993 signaux. En revanche, le critère 4 considère par erreur la commutation rapide ($\cong \mu s$) sur une charge (noArc) RL comme un arc en raison de la résonance RLC du système que le critère a faussement confondu avec un arc. Le critère 4 (fréquentiel) est également sensible aux charges à découpage contrairement au critère 5 (IDS).

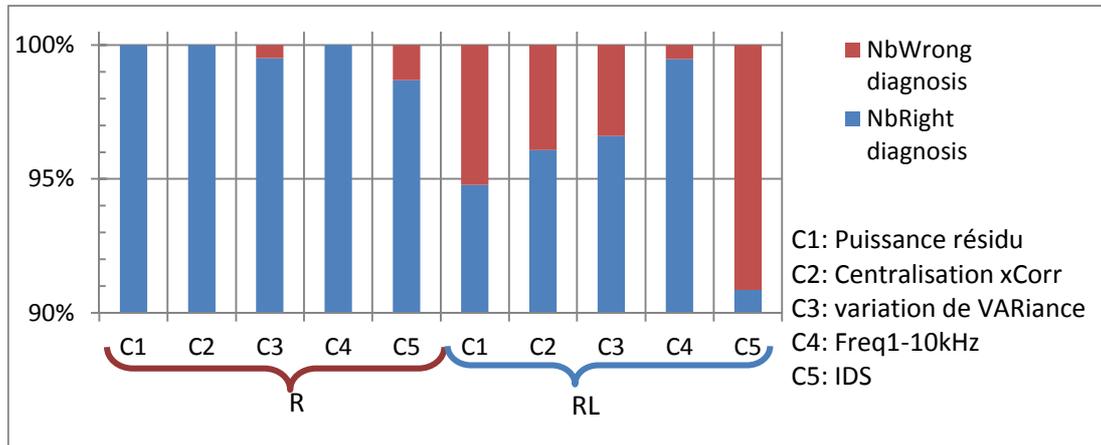


Figure 5-2 : Synthèse du taux de détection critère par critère

Tableau 23 : Synthèse des résultats critère par critère selon la charge

Critère	Charge R					Charge RL				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
Nb diagnostic justes	610	610	607	610	602	363	368	370	381	348
Nb diagnostic faux	0	0	3	0	8	20	15	13	2	35
Total diag	610	610	610	610	610	383	383	383	383	383
Taux de Justesse (Acc)	100%	100%	100%	100%	99%	95%	96%	97%	99%	91%
1-Acc	0%	0%	0%	0%	1%	5%	4%	3%	1%	9%

Pour compenser ces erreurs individuelles et recouvrir les cas de non-détection lorsque certains diagnostics sont défaillants, nous avons appliqué une logique de décision combinant les 5 critères. La logique de décision appliquée est binomiale : pour plus de k éléments 'justes' parmi n éléments, le diagnostic est considéré comme conforme (noté $\binom{n}{k}$).

La série de diagrammes en radar suivants (toile d'araignée Figure 5-3, Figure 5-4, Figure 5-5) décrit les statistiques de performance par la validation de 1 à 5 critères parmi 5 $\binom{5}{1 \text{ à } 5}$ selon :

- La justesse (accuracy Figure 5-3) correspondant au taux des bonnes décisions
- La fiabilité (sensitivity Figure 5-5) correspond au taux de bonne détection
- La fidélité (specificity Figure 5-4) correspond au taux de bonne "non-détection"

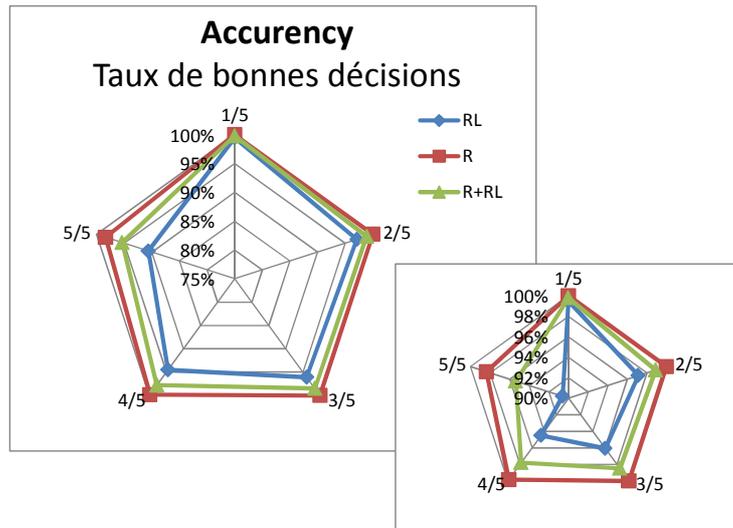


Figure 5-3 : Diagramme radar "Accuracy" sur charge R,RL,R+RL

Le diagramme en radar Figure 5-3 présente le taux de bonnes décisions pour une logique discriminante binomiale de $n=5$ éléments. Chaque branche décrit l'indice k de $\binom{n}{k}$ (décrit k/n). On y voit une justesse (accuracy) de 100% pour les charges résistives (610 cas) jusqu'à 3 coefficients parmi les 5 et une légère dégradation au-delà avec 98.4% en combinant $\binom{5}{5}$. Les charges légèrement inductives RL (383 cas) présentent des performances de l'ordre de 99.5% pour $\binom{5}{1}$ et 90.6% pour $\binom{5}{5}$. La défaillance conjointe des critères 1 et 5 sur les mêmes signaux diminue la pertinence des décisions prises.

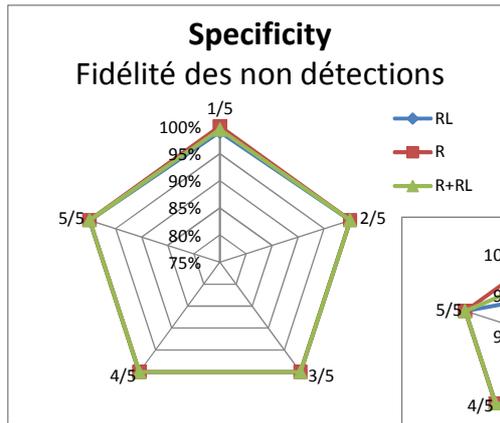


Figure 5-4 : Diagramme radar "Specificity" sur charge R,RL,R+RL [échelle de 95% à 100%]

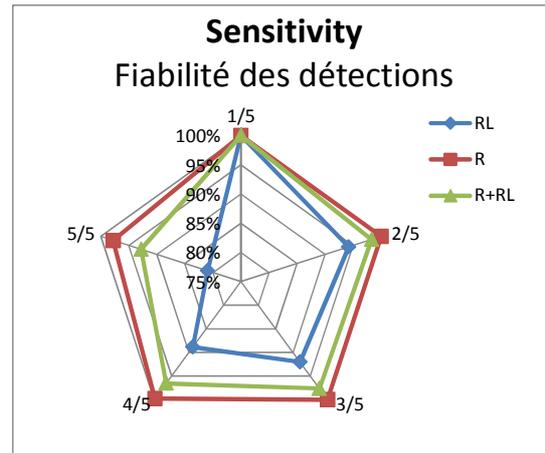


Figure 5-5 : Diagramme radar "Sensitivity" sur charge R,RL,R+RL [échelle de 85% à 100%]

Les faux déclenchements (à tort) sont représentés Figure 5-4 par la spécificité en fonction du nombre de coefficients pris en compte. Ce diagramme décrit qu'aucune fausse détection n'est faite sur charges R et seulement 1% d'erreur sur charges RL lors de la combinaison de 5 coefficients. La Figure 5-5 décrit le taux de bonne détection. La lecture du diagramme montre que pour $\binom{5}{1}$ coefficient, 100% des cas sont détectés y compris sur charges RL. En revanche, la combinaison de détecteurs rend la logique moins sensible sur charges RL.

Les données des diagrammes en radar Figure 5-3, Figure 5-4, Figure 5-5 se retrouvent dans les statistiques du Tableau 24.

5.1.2 Conclusion

Tableau 24 : Statistiques et résultat pour les 4 méthodes de détection selon la stratégie N parmi 5 noté $\binom{N}{5}$

Charge Logique	$\binom{5}{1}$	$\binom{5}{2}$	R+RL $\binom{5}{3}$	$\binom{5}{4}$	$\binom{5}{5}$	$\binom{5}{1}$	$\binom{5}{2}$	R $\binom{5}{3}$	$\binom{5}{4}$	$\binom{5}{5}$	$\binom{5}{1}$	$\binom{5}{2}$	RL $\binom{5}{3}$	$\binom{5}{4}$	$\binom{5}{5}$
TP	638	627	623	616	592	449	449	449	448	439	189	178	174	168	153
FN	0	11	15	22	46	0	0	0	1	10	0	11	15	21	36
TN	353	355	355	355	355	161	161	161	161	161	192	194	194	194	194
FP	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Sensitivity	100%	98.3%	97.6%	96.6%	92.8%	100%	100%	100%	99.8%	97.8%	100%	94.2%	92.1%	88.9%	81.0%
Specificity	99.4%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	99.0%	100%	100%	100%	100%
ACC	99.8%	98.9%	98.5%	97.8%	95.4%	100%	100%	100%	99.8%	98.4%	99.5%	97.1%	96.1%	94.5%	90.6%

Par rapport aux critères exploités séparément, cette stratégie renforce la robustesse de l'algorithme. En effet, les méthodes précédentes proposent une performance individuelle comprise entre 96%–100% pour les charges R & 87%–99% pour les charges RL+R (Tableau 22). Avec cette logique de décision, la justesse grimpe entre 98.4% et 100% de bonne décision sur charges R & 95.4%–99.8% sur charges R+RL (Tableau 24).

La lecture des résultats précise que la combinaison de 2 parmi 5 $\binom{5}{2}$ coefficients assure de ne faire aucune détection à tort sur aucune des charges du panel R,RL sans relayer le taux de bonnes détections en dessous de 98.3%.

En revanche, les limitations de cette méthode sont donc :

- sa potentielle inaptitude à réagir à certaines charges selfiques qui atténuent la signature de l'arc dans le courant de ligne.
- la nécessité d'avoir un phénomène d'arc établi de durée supérieure ou égale au temps d'analyse.

Ces contraintes expliquent les signaux de fausses détections et non-détections. Ceux-ci sont en partie représentés Figure 5-6. Il s'agit de signaux selfiques (1mH) dont la pente décroissante après le claquage indique un écartement des électrodes en cours après plus de 100ms (durée d'analyse). La pente décroissante du courant d'arc est le signe de l'augmentation d'impédance de l'arc par l'allongement de celui-ci. Cette propriété trompe les mesures à la foi sur le calcul du résidu et le rapport signal à bruit d'un signal déjà lissé par la self en série (constante de temps RL d'environ 20-30ms). La seule méthode résistante à ces paramètres est le critère fréquentiel sur la plage 1kHz-10kHz qui travaillant sur le signal brut. Cette méthode perçoit une modulation du signal suffisante pour déclencher une détection à tort.

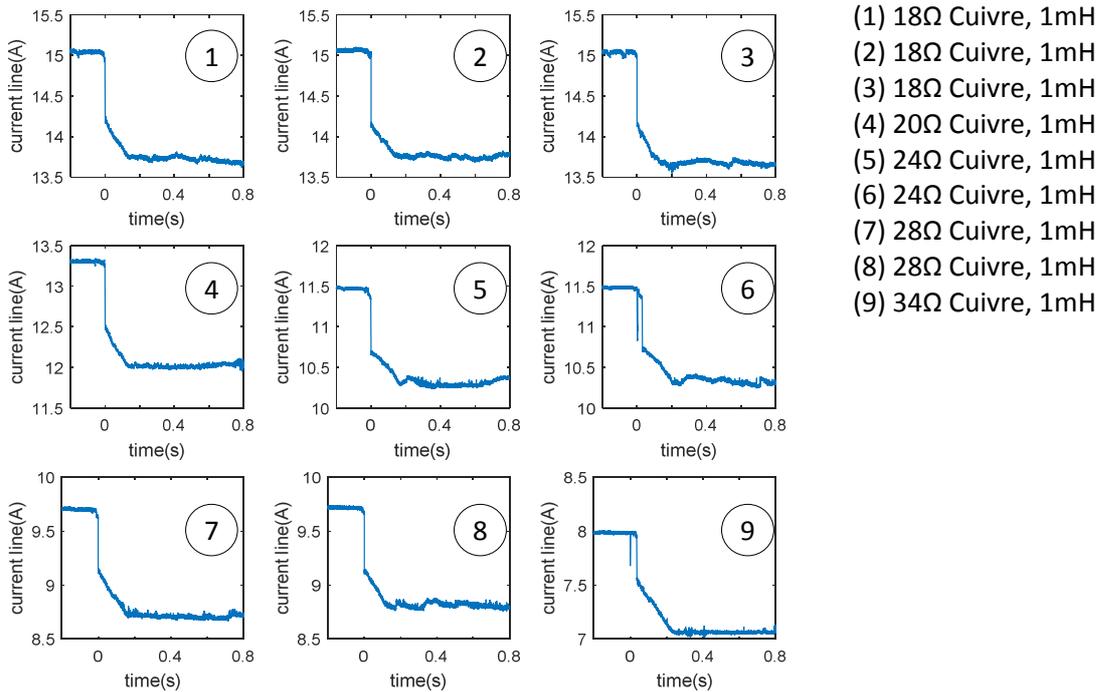


Figure 5-6 : Cas de non-détection multicritère

5.2 Perspectives et évolutions

L'approfondissement de ces travaux s'oriente selon 2 axes :

1) Élargissement de la base de données

La base de données sur laquelle notre méthode a été éprouvée est composée d'environ 1000 signaux R et RL avec plus de 100 configurations différentes de charges simples. Pour se rapprocher aux mieux des spécifications des normes UL1699b et IEC62606, il faudrait intégrer les charges de masquage et davantage de charges consommatrices de courant à découpage.

En revanche, il est matériellement difficile de réaliser en laboratoire ces expérimentations avec une topologie complexe plus proche de l'aéronautique (réseau maillé, longueur de câble d'environ 600km pour un A380, etc.). Pour faire ces essais, une approche de type expériences numérique est envisageable. En effet, il existe des modèles numériques d'arc et des modèles de charges aéronautiques qui, enrichie de nos signaux, peuvent être composés pour réaliser un système de type "smart-grid" à base de multiples sources et charges en réseau.

Les signaux issus des essais numériques pourront être assimilés par nos méthodes et contribuer à l'adaptation des critères aux différents changements de charges.

2) Autre stratégie de décision :

Nous avons proposé une discrimination des défauts par seuil fixe ou dynamique de façon empirique. Pour rendre ces critères évolutifs et adaptatifs aux différentes charges rencontrées, nous proposons 3 stratégies complémentaires de décisions :

- Remplacement des critères individuels de discrimination arbitraire par une part d'intelligence artificielle. la discrimination peut être décidée suite à un apprentissage par SVM⁵ ou réseau de neurones.
- Reconnaissance de charge avec choix du critère selon la charge

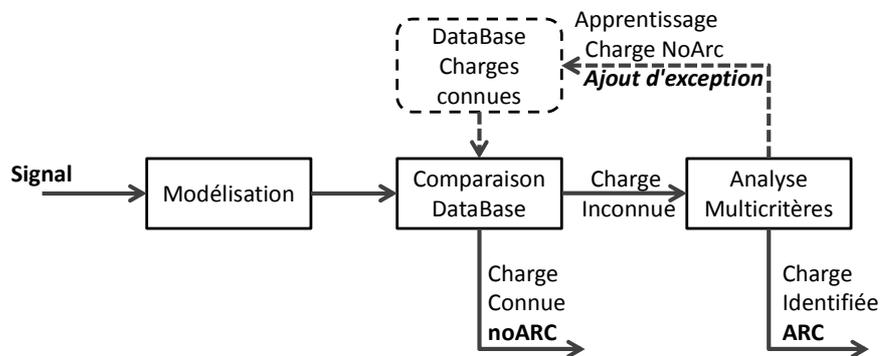


Figure 5-7: Principe du bypass d'analyse par reconnaissance de charge

Nous avons commencé des travaux d'identification des charges à l'aide d'une base de données constituée des paramètres estimés par l'estimation polynomiale des charges que le dispositif rencontre. L'objectif de ces travaux est de réduire la charge d'analyse en embarqué pour libérer plus rapidement la scrutation de nouveaux évènements et également réaliser un apprentissage de charges conflictuelles pour qu'elles soient considérées comme des exceptions.

⁵ Machine à vecteur de support : utilisée pour résoudre un problème de discrimination. Il est élaboré à partir de régression selon un ou plusieurs vecteurs.

- Pondération des critères selon la charge :

La perspective d'évolution étudiée au cours de ces travaux consiste à anticiper les défauts et difficultés de détection à l'aide d'une identification de charge. Celle-ci assisterait la logique de discrimination en privilégiant les algorithmes optimums en fonction des charges et conditions expérimentales.

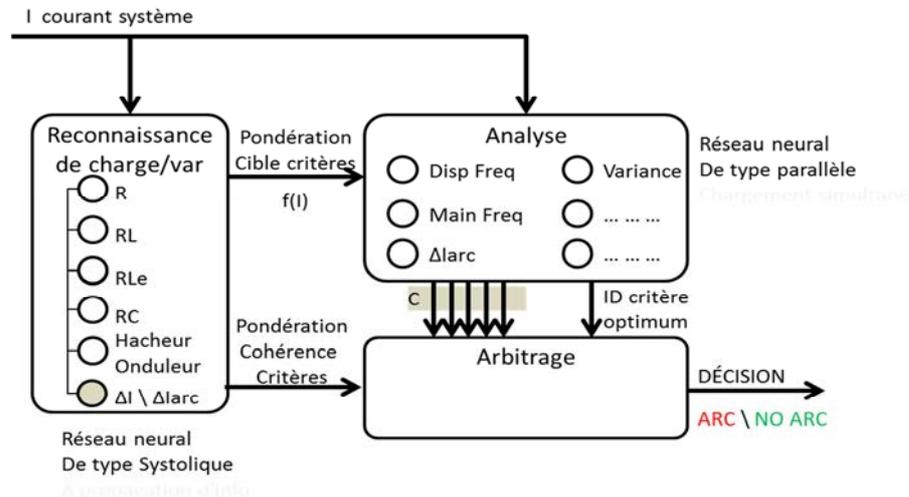


Figure 5-8 : Architecture de détection d'arc avec choix des critères adapté à la charge

Ainsi, l'intelligence proposée et schématisée Figure 5-8 :

- Détermine quelles sont la/les charge(s) observée(s).
- Adapte le seuillage des critères au type de charge en cours d'analyse Par exemple, en augmentant la susceptibilité des critères sur charges inductives qui atténuent la signature d'arc contenu dans les signaux électriques.
- Selon la charge, des pondérations sont appliquées aux critères pour donner du poids aux critères les plus efficaces et minorer le poids des critères défaillant sur ces mêmes charges.

5.3 Intégration partielle des algorithmes dans un démonstrateur

La réalisation d'un démonstrateur opérationnel est une étape cruciale de validation des méthodes proposées. Les algorithmes sont transférés et adaptés en embarqué sur microcontrôleur pour une analyse en temps réel (et non en temps fini). L'objectif du démonstrateur est de mettre en service les algorithmes développés au cours de cette thèse pour valider la mise en protection des charges défectueuses lors d'apparition d'arc sans pour autant réagir sur de simples variations de charges. Cette brève partie énumère le matériel utilisé pour l'intégration des algorithmes sous forme de hardware/firmware ainsi que les premiers résultats. Une vidéo de présentation du dispositif actif est également disponible sur demande.

Pour l'embarqué, un premier design hardware est proposé selon le schéma de principe Figure 5-9 constitué des éléments Figure 5-10 :

- 1 alimentation symétrique à piles ou alimentation 220Vac \rightarrow \cong \pm 5Vdc
- 1 shunt 20A \rightarrow 75mV (réalisé à partir de 2 shunts 10A \rightarrow 75mV) Figure 5-11
- 1 AOP d'instrumentation différentiel
- 1 demoboard STM32f4 discovery (ARM cortexM4)

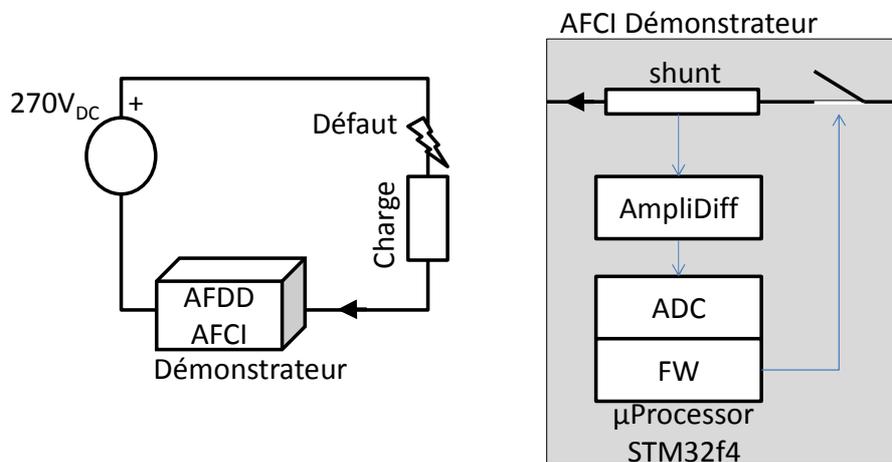


Figure 5-9 : Schéma d'intégration et de montage du démonstrateur dans le circuit HVDC270Vdc

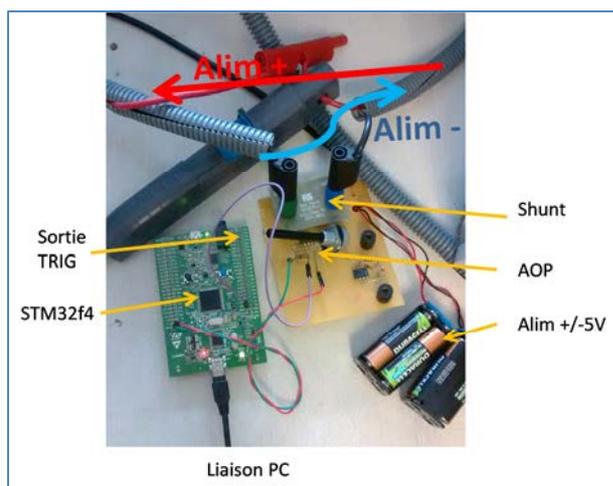


Figure 5-10 : Montage démonstrateur

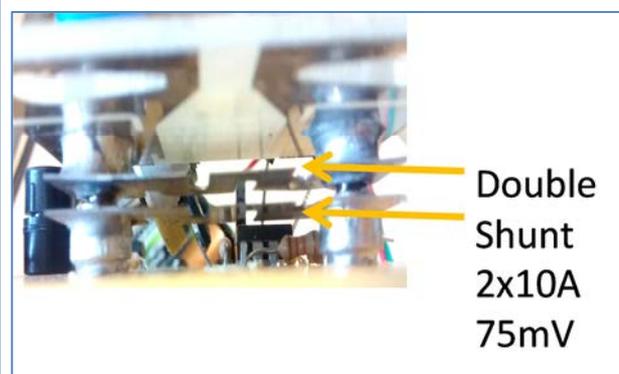


Figure 5-11 : Montage double shunt 10A parallèle

Cette plateforme de mesure et calcul est intégrée dans un boîtier de démonstration (Figure 5-12) avec un dispositif d'ouverture mécanique du circuit en cas de défaut détecté (relais 45A triphasé en série).

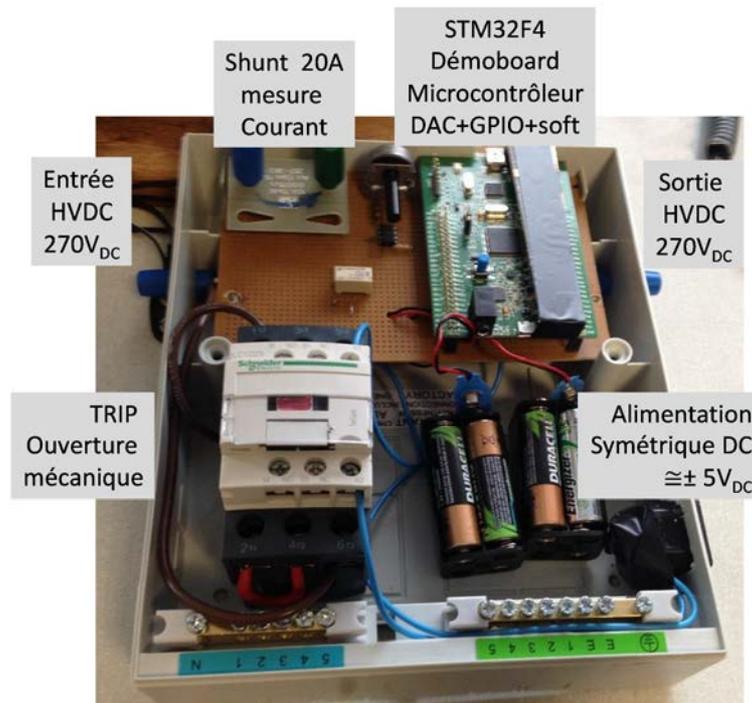


Figure 5-12 : Démonstrateur intégré dans son boîtier (sans alimentation 220V_{AC} - ±5V_{DC})

Démonstration et performances

Deux algorithmes sont intégrés à bord du démonstrateur. La première fonction de détection validée est l'algorithme de détection d'évènement par chute de courant (DROP tel qu'analysé partie 4.1.2). Cette étape est synthétisée par la machine d'état Figure 5-13.

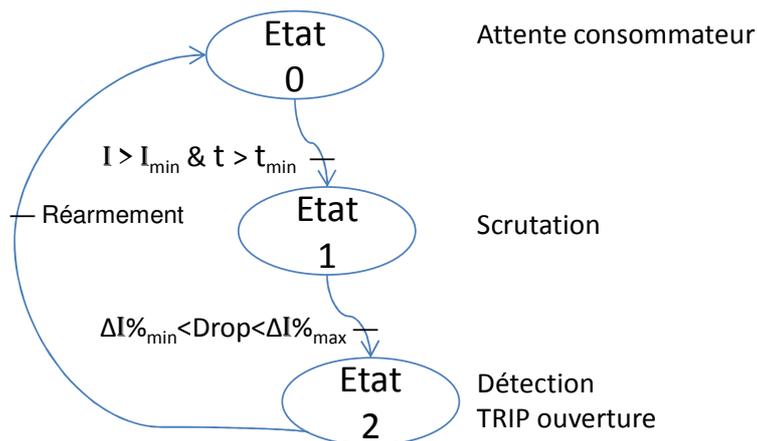


Figure 5-13 : Machine d'état détection d'évènement par %tage de DROP Iligne

Cette méthode présente 100% de détection d'arc sur électrodes cuivre pour une plage ΔI prédéfinie et comprise entre -4% et -16% du courant de ligne . En revanche, elle n'exclut nullement les cas sain de variations du courant compris dans cette plage de valeurs (nombreux Faux positifs). L'étape de confirmation par l'analyse de critère est nécessaire pour lutter contre les faux déclenchements.

Le second critère implémenté se base sur l'algorithme sur la détection d'arc d'après la puissance du résidu sur 100ms

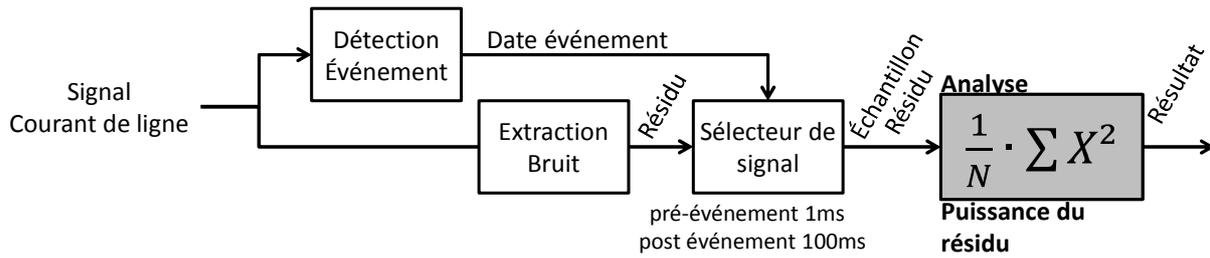


Figure 5-14 : Rappel de la méthode d'analyse du Prez

Pour être compatible avec les contraintes temps réelles (réduire le temps de calcul et la complexité), l'équation d'origine est adaptée tout en conservant le sens :

- 1- Réduction de la cadence d'échantillonnage : passée de 200kHz à 100kHz
- 2- Compensation du bruit d'acquisition (shunt **Au Lieu De** CP031) grâce à l'estimateur permettant l'extraction du bruit qui réalise une moyenne sur 600µs (ALD 300µs à Fe=200kHz)
- 3- L'équation : $Pr = \frac{1}{N} \cdot \sum X^2$ est simplifié par : $Pr = \sum_N |X|$ (5.1.)

Ainsi, le démonstrateur réalise la chaîne de traitement représentée ci-dessous :

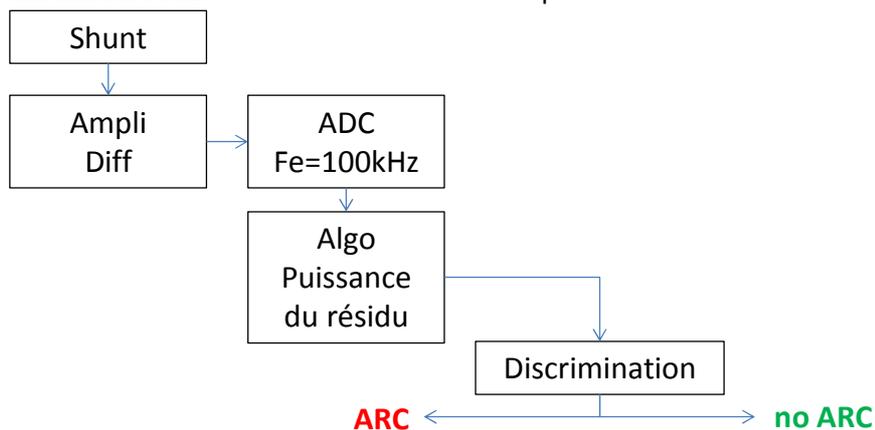


Figure 5-15 : Chaîne de traitement du démonstrateur (mesure, acquisition, traitement, décision)

L'algorithme et la discrimination sont résumés par la machine d'états suivante :

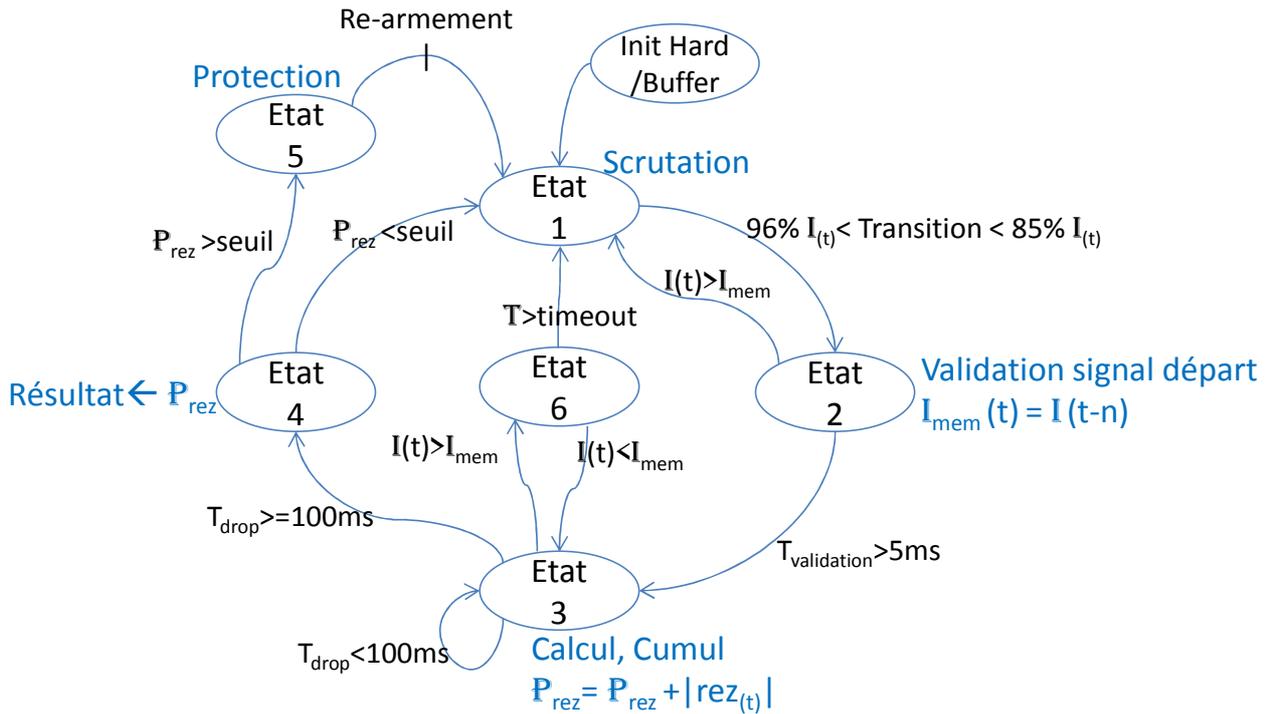


Figure 5-16 : Machine d'état de l'algorithme immunisé contre l'effet des arcs fugitifs

On voit Figure 5-16 la machine d'état adaptée de la méthode de détection 1 "puissance du résidu" : Après initialisation (ETAT0) l'algorithme reste en scrutation (ETAT1) jusqu'à apparition d'un "DROP" (ETAT2). Si le courant de ligne redevient "normal" d'ici 5ms, retour à l'état de scrutation, sinon début de l'analyse (ETAT3). Analyse est faite en temps réel par cumul des valeurs d'énergie du segment de résidu sélectionné. Si au cours de cette étape la charge redevient "normale", le cumul reste en pause (ETAT6) ou retourne à l'état initial (ETAT1). Sinon, passé un délai de 100ms de cumul tous les cycles d'analyse, le résultat est apprécié (ETAT4). Si le résultat est supérieur au seuil → Mise en protection (ETAT5). Sinon, retour à l'état de scrutation (ETAT1) : "fausse alerte".

Une mise au point est nécessaire pour adapter les seuils de discrimination à l'environnement expérimental (chaîne d'acquisition : shunt, ADC, etc.).

Un premier seuil statique se base sur seulement 23 valeurs avec arcs et 15 sans arcs puis est optimisé expérimentalement (Figure ci-dessous)

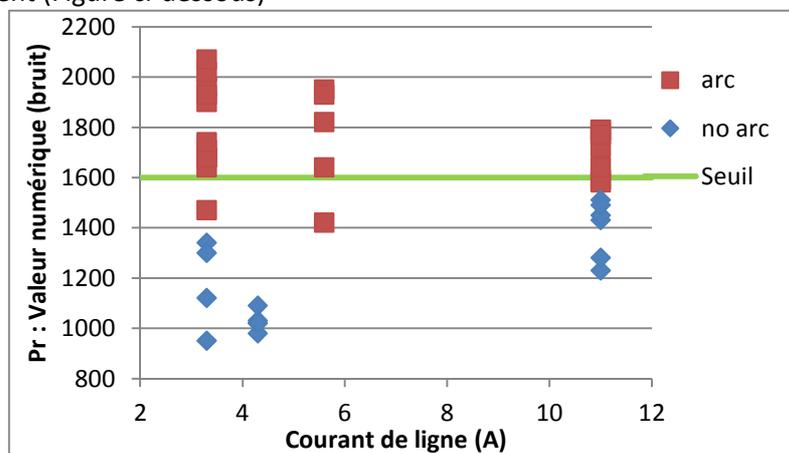


Figure 5-17 : Résultat expérimentaux démonstrateur

Les résultats obtenus par cette méthode sont illustrés avec arc Figure 5-20 et Figure 5-21, sans arc Figure 5-18 et Figure 5-19. On constate que, en l'absence d'arc, le démonstrateur ne détecte pas de défaut (OK) et lorsque les arcs sont présents, le dispositif détecte un évènement défectueux et déclenche le "trip" de mise en protection (OK)

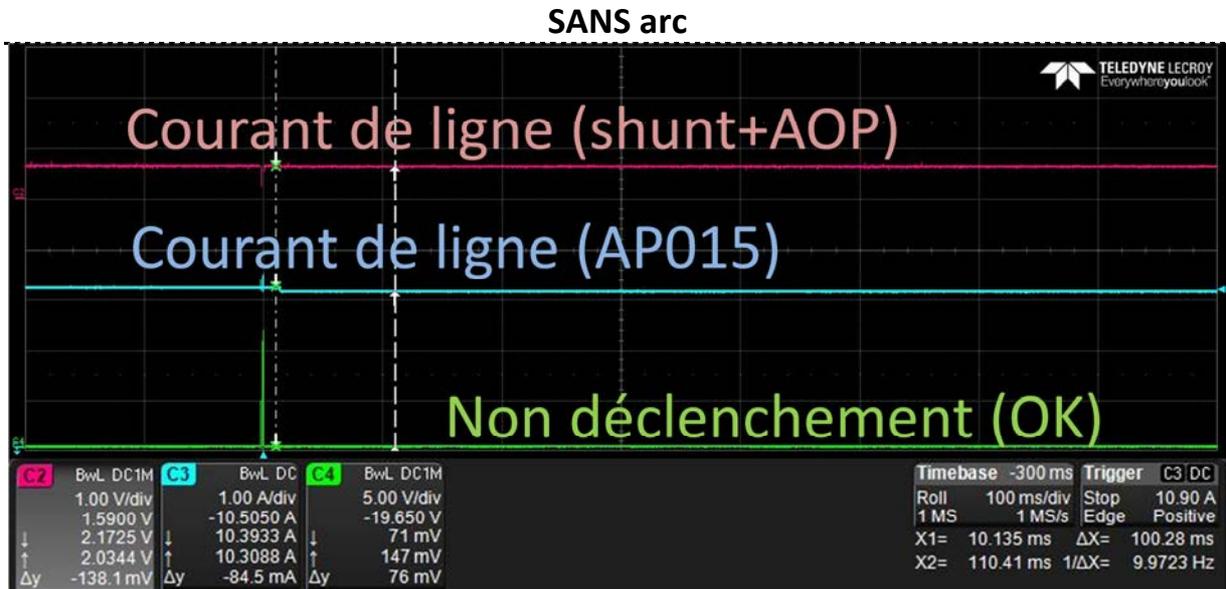


Figure 5-18 : Résultats (charge 3.3A)

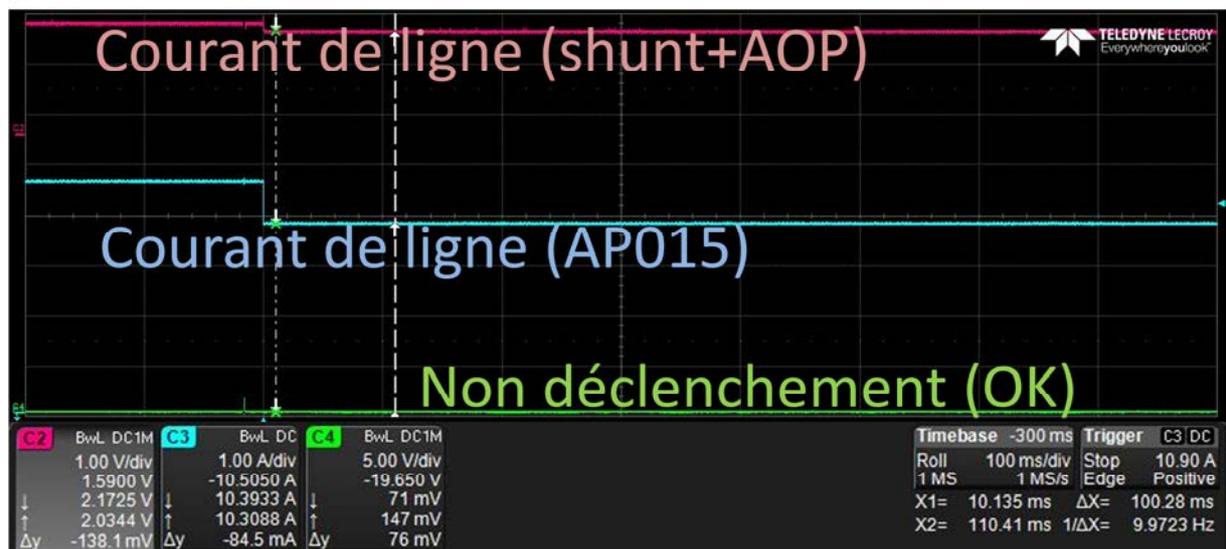


Figure 5-19 : Résultats (charge 11A)

AVEC arc

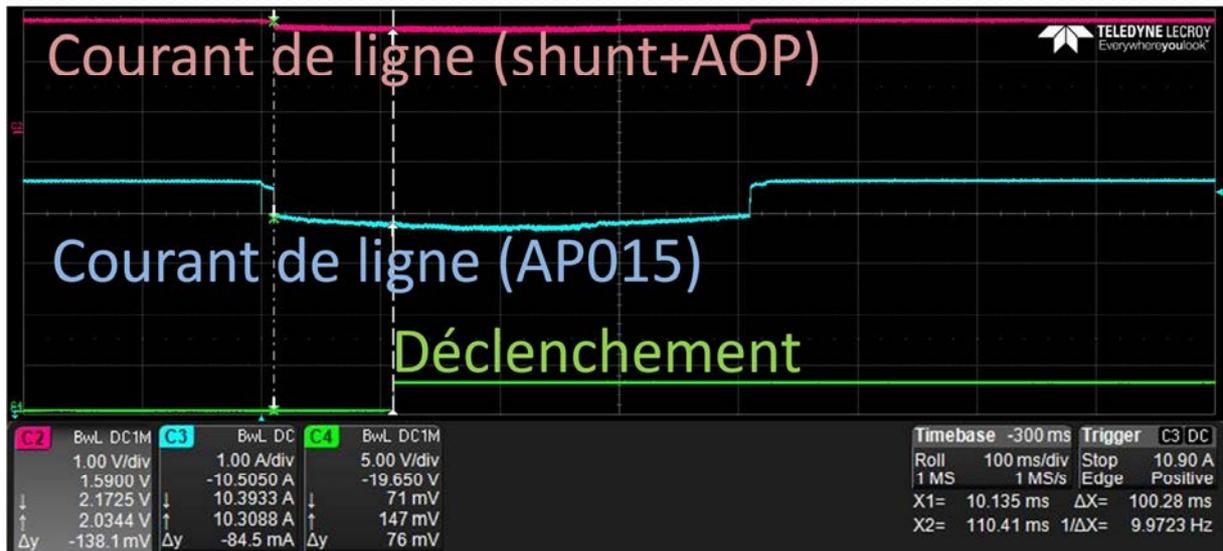


Figure 5-20 : Résultats (charge 11A)

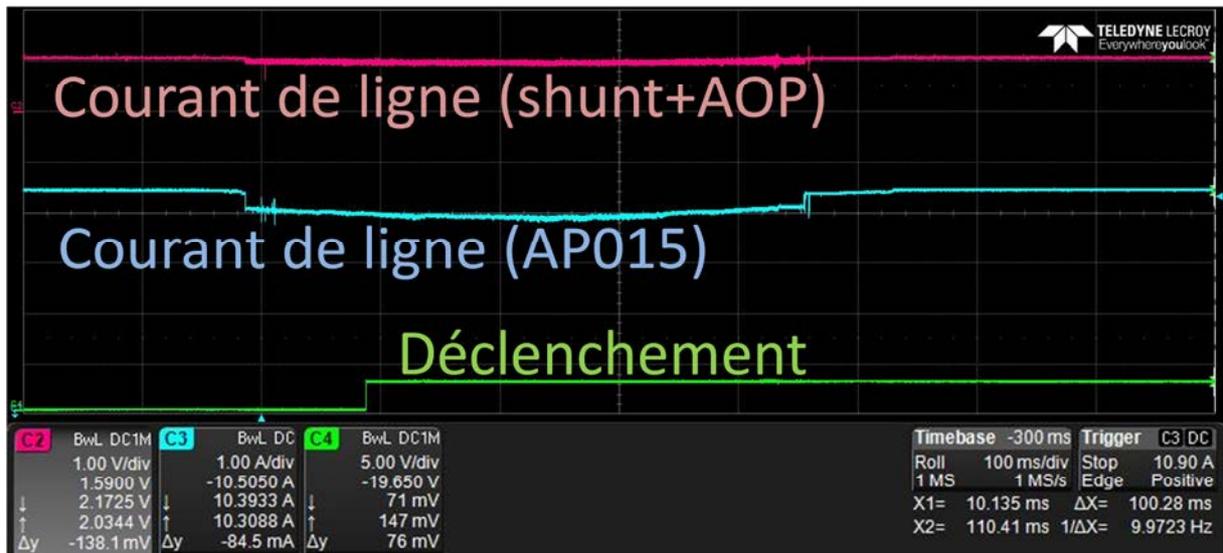


Figure 5-21 : Résultats (charge 5.6A)

L'intégration des algorithmes de détection d'évènement (ΔI) et d'analyse de la puissance du résidu montrent de très bons résultats. Mais nous ne disposons pas de données statistiques quant aux performances obtenues.

Chapitre 6 :

CONCLUSION GÉNÉRALE

6 Conclusion générale

La détection de défaut d'arc série est une problématique importante dans le milieu aéronautique. Pour répondre à l'augmentation de la puissance consommée, les constructeurs migrent vers un réseau continu HVDC 270V/540V_{DC} qui peut être plus facilement sujet à l'amorçage d'arcs intempestifs qu'un réseau en courant alternatif. Le défaut d'arc électrique est un risque qui est souvent la cause d'incidents électriques voire de crash. La contribution de cette thèse a porté sur la problématique de la caractérisation et la détection de défauts d'arcs électriques série par un cœur de distribution (SSPC) sur un réseau basse tension 270V_{DC} destiné à l'aéronautique.

Nous avons commencé ce travail expérimental par une phase exploratoire pour comprendre le comportement des arcs par l'observation phénoménologique de ceux-ci. L'influence des paramètres expérimentaux comme l'intensité du courant, la pression, le diamètre et l'écartement des électrodes ont été observés. Ces observations ont permis de rappeler que l'impédance des arcs dépend principalement de l'écartement et l'intensité. Mais que le comportement chaotique de l'arc est plutôt dépendant de la géométrie de la zone de décharge (diamètre/surface d'électrode) et de la pression du gaz à ioniser. Les observations par caméra rapide met en concordance les signaux électriques courant/tension et le comportement physique d'une décharge.

Les expérimentations avec la caméra rapide ont montré que la surface des électrodes change d'état (fusion, liquéfaction, bouillonnement) et que par conséquent la longueur et la forme de la décharge varient continuellement. La principale observation réalisée montre le développement d'un gaz à l'anode de façon répétée créant ainsi des bruits périodiques en fonction de la pression et de l'écartement. Cette particularité, qui peut être exploitée spécifiquement pour la détection en aéronautique et constitue une perspective de poursuite pour ce travail de recherche devant faire l'objet de plus amples investigations.

Un gros travail d'expérimentation a été mené dans le cadre de ce travail afin de créer une base de données complète au minima de charges résistives et inductives. Nous avons construit une base de signaux composés de 1045 cas d'arc série obtenue avec des charges résistives/inductives et quelques charges actives. Afin de tester la robustesse, des algorithmes de détection, nous avons également soumis les méthodes à près de 444 variations de charges pour vérifier que l'algorithme ne réalise pas de fausses détections.

Un travail important a également été mis en place pour l'analyse, la mise au point et le développement de méthodes de détection fiables d'un défaut d'arc séries sur charges résistives et légèrement inductives.

La démarche que nous avons suivie pour la détection consiste :

- À faire une détection d'évènement à chaque transition du signal de courant dans une fenêtre de durée finie (100 ms)
- À extraire dans la fenêtre d'analyse le bruit éventuellement produit par l'arc électrique à l'aide de la méthode du résidu en retirant la tendance du signal et conservant qu'une partie du bruit.

Nous avons proposé 5 critères différents d'analyse.

- La première méthode de détection est basée sur l'analyse de la puissance du bruit de l'arc contenu par le résidu courant de ligne. Cette méthode présente une discrimination idéale sur les charges résistives et fortes sur charges inductives, mais est vulnérable aux parasites de ligne autre que ceux produits par un arc (résonance RLC, hacheur, etc.).
- La seconde méthode est basée sur l'analyse de la dispersion du bruit par autocorrélation qui renseigne à la fois si le signal est répétitif ou stochastique.
- Le troisième critère se base justement sur l'observation de la non-stationnarité du signal analysé par la variation de variance temporelle. Cet indice est très révélateur de la non-linéarité du comportement de l'arc comparé aux signaux de transition.
- Deux autres méthodes de détection sont également proposées. Elles sont basées sur l'analyse fréquentielle des fluctuations générées par l'arc électrique sur le courant de ligne. Nous avons mis au point un indicateur nommé IDS (Indice de Dispersion Spectrale) qui caractérise l'étalement du spectre sur la plage fréquentielle 1 kHz à 100 kHz. Cette méthode est très efficace sur les charges à découpage et charges résistives, mais elle ne distingue pas certains cas d'arcs sur charges inductives.

La décision de la présence d'un défaut d'arc est obtenue par seuillage du résultat obtenu pour chaque critère. Le comportement non déterministe des arcs notamment aux conditions d'expérimentation (courant, tension, matériaux des électrodes, longueur de l'arc, etc.) rendent la détection difficile par un simple seuil sur le résultat des critères. C'est pour répondre à cette problématique que nous avons proposé une discrimination à l'aide de seuils variables selon le courant, la variation de charge ou le niveau de bruit électrique du système.

Nous avons ensuite cherché à combiner l'ensemble des critères afin d'améliorer les performances de détection et limiter le risque de fausses détections par la confirmation des pairs. Individuellement, les critères sont fortement discriminants. La combinaison des critères doit être améliorée et faire l'objet de travaux complémentaires pour augmenter l'intelligence de la détection en adaptant les critères à la charge détectée.

Une partie des méthodes proposées a été validée expérimentalement avec un dispositif de démonstration intégré sur microcontrôleur à travers la mesure courant/tension en temps réel. Les parties de détection d'évènement, d'extraction du bruit et d'analyse de la puissance du bruit de l'arc (méthode 1 : $P_{\text{résidu}}$) ont été ainsi validées. Mais l'ensemble de la méthode doit encore être intégré dans une cible industrielle de SSPC pour être validé.

Perspectives :

Les perspectives de ces travaux de thèses sont nombreuses et concernent les actions suivantes :

- **Modèle d'arc** : il serait intéressant de compléter les modèles d'arcs par une approche combinant physique de la décharge prenant en compte l'environnement (matériaux des électrodes, pression, gaz, écartement, etc.) et phénoménologie intégrant une partie statistique de probabilité qu'un évènement se produise (projection, extinction, fusion, pont fondu, arc-Flash, etc.).
- **Modèle de charges et de réseau** : Il serait intéressant d'intégrer aux modélisations existantes les méthodes d'asservissement des charges, alimentations et convertisseurs afin d'étudier leur comportement lors de défauts électriques sur une ligne de distribution. Ces modélisations enrichies devraient permettre de réaliser davantage d'essais numériques sans être limité aux contraintes matérielles d'un laboratoire.
Les algorithmes doivent également être soumis à davantage de charges (charges simples, combinées, de masquages). Ces expérimentations devraient apporter plus de précision sur la définition des seuils.
- **Logique de discrimination** : Il serait nécessaire de revoir la logique de combinaison des critères avec une adaptation des décisions aux conditions expérimentales et notamment au type de charge rencontrée. Un bloc d'identification de charges permettrait notamment de reconnaître les charges déjà connues en amont de toute analyse et économiser du temps machine en effectuant les analyses uniquement sur les charges inconnues. L'intégration d'une logique de discrimination intelligente capable d'identifier le type de charge victime de défaut devrait permettre d'adapter les seuils de façon dynamique à la charge en cours. Ainsi, par exemple, privilégier la méthode sur la bande de fréquence 1k-10kHz performante lorsque les charges sont inductives. Et à l'inverse, sélectionner la technique 5 (IDS) lorsque la charge est à commutation. D'autres pistes concernent la mise au point de réseaux de neurones qui réalisent une détection globale à partir d'indices de probabilité d'arc de chaque critère sans que la discrimination soit faite individuellement par ceux-ci.
- **Localisation d'arc électrique** : Parallèlement à la détection, il est nécessaire d'identifier avec précision la localisation d'un arc électrique pour isoler les défauts sans impacter la navigabilité d'un appareil en vol et également accélérer le diagnostic de maintenance au sol.
- **Réduction des temps de détection** : Les algorithmes présentés au cours de ces travaux sont basés sur une fenêtre d'observation de 100ms d'arc. Une étude approfondie est nécessaire pour évaluer l'impact de cette fenêtre d'observation sur les performances de détections. À terme, ces algorithmes devront être capables d'analyser en continu les signaux (fenêtre <1ms) pour supporter les anomalies fugitives brèves.

Partie 7 :

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

7 Références bibliographiques

- [ABZB15] ANDREA, J. ; BESDEL, P. ; ZIRN, O. ; BOURNAT, M.: The electric arc as a circuit component. In: *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2015, S. 003027–003034
- [AGSN10] AMMERMAN, RAVEL F. ; GAMMON, TAMMY ; SEN, PANKAJ K. ; NELSON, JOHN P.: DC-Arc Models and Incident-Energy Calculations. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* Bd. 46 (2010), Nr. 5, S. 1810–1819
- [AJHF14] ARMIJO, KENNETH M. ; JOHNSON, JAY ; HIBBS, MICHAEL ; FRESQUEZ, ARMANDO: Characterizing fire danger from low-power photovoltaic arc-faults. In: : IEEE, 2014 — ISBN 978-1-4799-4398-2, S. 3384–3390
- [Anil12] ANIL YARAMASU: *Intermittent Arc Fault Detection And Location For Aircraft Power Distribution System*, Ryerson University, 2012
- [AnST10] ANDREA, JONATHAN ; SCHWEITZER, PATRICK ; TISSERAND, ETIENNE: A New DC and AC Arc Fault Electrical Model. In: : IEEE, 2010 — ISBN 978-1-4244-8174-3, S. 1–6
- [AnZB12] ANDREA, JONATHAN ; ZIRN, OLIVIER ; BOURNAT, MARC: Principle of Arc Fault Detection for Solid State Power Controller. In: : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4673-0781-9, S. 1–6
- [ASDA15] AUGCARD, AMAURY ; SINGO, T. ; DESPREZ, P. ; ABBAOUI, M.: Numerical methods for detecting DC arc fault in lithium-ion batteries. In: *2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm)*, 2015, S. 39–46
- [Asa00] AS6087 SAE INT: AS6087 (WIP) ARC Fault Interrupter, 270 VDC
- [ASTR10] ANDREA, JONATHAN ; SCHWEITZER, PATRICK ; TISSERAND, ETIENNE ; ROTH, PATRICE ; WEBER, SERGE: Calibrated ac and dc arcing fault generator. In: *2010 Proceedings of the 56th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts*, 2010
- [Atip98] ATIPO, ANATOLE: *Etude Expérimentale des Régimes dynamiques des ondes d’ionisation dans un plasma de décharge lumineuse. mise en oeuvre de techniques de contrôle du chaos.* Nancy 1, Université Henri Poincaré, 1998
- [Ayll10] AYLLON, JULIA DELOS: *Symmetric 270V DC Power Supply of a Universal Power Converter for Airborne Applications*, 2010
- [Ayrt02] AYRTON, H: *The electric arc*, Electrician, 1902
- [BaNi93] BASSEVILLE, M. ; NIKIFOROV, I. V.: *Detection of abrupt changes: theory and application*, Prentice Hall information and system sciences series. Englewood Cliffs, N.J : Prentice Hall, 1993 — ISBN 978-0-13-126780-0
- [BaPe06] BANKE, B. ; PETERSEN, H. H.: Method and device for the detection of fault current arcing in electric circuits.
- [BaPo68] BADAREU, E. ; POPESCU, I. ; POPESCU-ULMU, C. (Übers.): *Gaz ionisés: décharges électriques dans les gaz*. Paris, France : Dunod, 1968
- [BeNe06] BECK, JAN B. ; NEMIR, DAVID C.: *Arc Fault Detection through Model Reference Estimation* (SAE Technical Paper Nr. 2006-01-3090). Warrendale, PA : SAE International, 2006
- [Blad98] BLADES, FREDERICK K.: Method and apparatus for detecting arcing in AC power systems by monitoring high frequency noise.
- [BrDa06] BROWN, CHRISTOPHER D. ; DAVIS, HERBERT T.: Receiver operating characteristics curves and related decision measures: A tutorial. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* Bd. 80 (2006), Nr. 1, S. 24–38
- [Brow55] BROWNE, T. E.: The Electric Arc as a Circuit Element. In: *Journal of The Electrochemical Society* Bd. 102 (1955), Nr. 1, S. 27
- [BSLS11] BROMBACH, J. ; SCHROTER, T. ; LUCKEN, A. ; SCHULZ, D.: Optimized cabin power supply with a +/- 270 V DC grid on a modern aircraft. In: : IEEE, 2011 — ISBN 978-1-4244-8806-3, S. 425–428
- [CCXW09] CHENG HONG ; CHEN XIAOJUAN ; XIAO WEI ; WANG CONG: Short-time fourier transform based analysis to characterization of series arc fault. In: : IEEE, 2009 — ISBN 978-1-4244-4544-8, S. 185–188

- [Char13] CHARRADA, MADIHA: *Étude de Qualité et de Stabilité des Réseaux Aéronautiques Embarqués HVDC*, Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, phdthesis, 2013
- [CLSC13] CAO, YANG ; LI, JING ; SUMNER, M. ; CHRISTOPHER, E. ; THOMAS, D.: Arc fault generation and detection in DC systems. In: *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2013 IEEE PES Asia-Pacific, 2013*, S. 1–5
- [Cobi41] COBINE, J.D.: Gaseous Conductors. In: , *McGraw-Hill*. (1941), S. 371–378
- [CPDS13] CATTIN, V. ; PERICHON, P. ; DAHMANI, J. ; SCHWARTZMANN, B. ; HEIRIES, V.: Detection of electric arcs in large batteries. In: : IEEE, 2013 — ISBN 978-1-4799-3832-2, S. 1–9
- [DeBe94] DELCROIX, J.-L. ; BERS, A.: *Physique des plasmas, volume 1*. Paris; Ed. du CNRS : EDP Sciences, 1994 — ISBN 978-2-86883-368-6
- [Deto14] DETOMBE, MARGO: *Optimizing epileptic focus localization using functional*, 2014
- [Elba12] EL BAYDA, HADI: *Etude du transfert d'énergie entre un arc de court-circuit et son environnement : application à l'Arc Tracking*, Université de Toulouse, Université Toulouse III - Paul Sabatier, phd, 2012
- [Fawc06] FAWCETT, TOM: An introduction to ROC analysis. In: *Pattern Recognition Letters, ROC Analysis in Pattern Recognition*. Bd. 27 (2006), Nr. 8, S. 861–874
- [FuHa01] FURSE, C. ; HAUPT, R.: Down to the wire [aircraft wiring]. In: *IEEE Spectrum* Bd. 38 (2001), Nr. 2, S. 34–39
- [FuSD09] FURSE, C. ; SMITH, P. ; DIAMOND, M.: Feasibility of Reflectometry for Nondestructive Evaluation of Prestressed Concrete Anchors. In: *IEEE Sensors Journal* Bd. 9 (2009), Nr. 11, S. 1322–1329
- [GCDD14] GI-HYEON GWON ; CHUL-HWAN KIM ; DOO-UNG KIM ; TACK-HYUN JUNG ; JOON HAN ; YUN-SIK OH ; KEON-WOO PARK: A Scheme for Detecting DC Series Arc Faults in Low Voltage Distribution System. In: : Institution of Engineering and Technology, 2014 — ISBN 978-1-84919-834-9, S. 12.67-12.67
- [GJSR16] GEORGIJEVIC, N. L. ; JANKOVIC, M. V. ; SRDIC, S. ; RADAKOVIC, Z.: The Detection of Series Arc Fault in Photovoltaic Systems Based on the Arc Current Entropy. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* Bd. 31 (2016), Nr. 8, S. 5917–5930
- [GMGS15] GHADERI, A. ; MOHAMMADPOUR, H. A. ; GINN, H. L. ; SHIN, Y. J.: High-Impedance Fault Detection in the Distribution Network Using the Time-Frequency-Based Algorithm. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Bd. 30 (2015), Nr. 3, S. 1260–1268. — Critère d'efficacité
- [GuJD04] GUO, S.Y. ; JONES, J.L. ; DOOLEY, A.S.: DC arc detection and prevention circuit and method.
- [GWWJ09] GUO YUNMEI ; WANG LI ; WU ZHUOQI ; JIANG BINFENG: Wavelet packet analysis applied in detection of low-voltage DC arc fault. In: : IEEE, 2009 — ISBN 978-1-4244-2799-4, S. 4013–4016
- [GZLS14] GAO, YUAN ; ZHANG, JUNJUN ; LIN, YANDAN ; SUN, YAOJIE: An innovative photovoltaic DC arc fault detection method through multiple criteria algorithm based on a new arc initiation method. In: : IEEE, 2014 — ISBN 978-1-4799-4398-2, S. 3188–3192
- [GZWN12] GU, HAORYING ; ZHANG, FENG ; WANG, ZIJUN ; NING, QING ; ZHANG, SHIWEN: Identification method for low-voltage Arc fault based on the loose combination of wavelet transformation and neural network. In: : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4577-1600-3, S. 1–4
- [Haeb07] HAEBERLIN, H: Arc Detector for Remote Detection of Dangerous Arcs on the DC Side of PV Plants. In: . Milano, Italy, 2007
- [HaLe10] HA, HYUNUK ; LEE, JANGMYUNG: Bad insulator detection algorithm using microphone array. In: : IEEE, 2010 — ISBN 978-1-4244-8031-9, S. 266–271
- [HeML12] HEGAZY, OMAR ; MIERLO, JOERI VAN ; LATAIRE, PHILIPPE: Analysis, Modeling, and Implementation of a Multidevice Interleaved DC/DC Converter for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* Bd. 27 (2012), Nr. 11, S. 4445–4458

- [HeZu84] HETZMANNSEDER, ENGELBERT ; ZUERCHER, JOE ; BROWNE, T. E. (Hrsg.): *Circuit interruption: theory and techniques, Electrical engineering and electronics*. New York : M. Dekker, 1984 — ISBN 978-0-8247-7177-5
- [Hill95] HILL, ROGER OWEN: *Applied change of mean detection techniques for HVAC fault detection and diagnosis and power monitoring*, Massachusetts Institute of Technology, Thesis, 1995
- [HoBe74] HOLLAHAN, JOHN R. ; BELL, ALEXIS T.: *Techniques and Applications of Plasma Chemistry*. 1st edition. Aufl. Santa Barbara : John Wiley & Sons Inc, 1974 — ISBN 978-0-471-40628-0
- [Holm67] HOLM, RAGNAR: *Electric Contacts: Theory and Application*. 4. Aufl. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 1967 — ISBN 978-3-540-03875-7
- [Hoya68] HOYAUX, MAX F: *Arc Physics*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 1968 — ISBN 978-3-642-85652-5
- [Iec13] IEC 62606: *IEC62606: General requirements for arc fault detection devices*. URL <https://webstore.iec.ch/publication/7248>
- [Ieee04] IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations—Amendment 1. In: *IEEE Std 1584a-2004 (Amendment to IEEE Std 1584-2002) (2004)*, S. 1–2
- [Iгна77] IGNATKO, V.P.: Electric characteristics of ac open heavy-current arcs. In: , 1977, S. p.98–102
- [JoAr14] JOHNSON, JAY ; ARMIJO, KENNETH: Parametric study of PV arc-fault generation methods and analysis of conducted DC spectrum. In: : IEEE, 2014 — ISBN 978-1-4799-4398-2, S. 3543–3548
- [JOMF12] JOHNSON, JAY ; OBERHAUSER, CHRIS ; MONTOYA, MICHAEL ; FRESQUEZ, ARMANDO ; GONZALEZ, SIGIFREDO ; PATEL, ASH: Crosstalk nuisance trip testing of photovoltaic DC arc-fault detectors. In: : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4673-0066-7, S. 001383–001387
- [JPLP11] JOHNSON, JAY ; PAHL, BIRGER ; LUEBKE, CHARLES ; PIER, TOM ; MILLER, THEODORE ; STRAUCH, JASON ; KUSZMAUL, SCOTT ; BOWER, WARD: Photovoltaic DC Arc Fault Detector testing at Sandia National Laboratories. In: : IEEE, 2011 — ISBN 978-1-4244-9965-6, S. 003614–003619
- [Kaip07] KAIPIA, TERO: APPLICATION OF LOW VOLTAGE DC-DISTRIBUTION SYSTEM - A TECHNO-ECONOMICAL STUDY. In: . Bd. 19 th International Conference on Electricity Distribution. Vienne, 2007
- [KaLi98] KARETTA, F. ; LINDMAYER, M.: Simulation of the gasdynamic and electromagnetic processes in low voltage switching arcs. In: *IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology: Part A* Bd. 21 (1998), Nr. 1, S. 96–103
- [Keil60] KEIL, A: Werkstoffe für elektrische Kontakte. In: *Springer-Verlag* (1960)
- [KePa99] KEENAN, J. ; PARKER, M.: Arc detectors. In: : IEEE, 1999 — ISBN 978-0-7803-5069-4, S. 710–715
- [Laco09] LACOUR, CÉLINE: *Apport de la mesure en continu pour la gestion de la qualité des effluents de temps de pluie en réseau d'assainissement*, Paris Est, 2009
- [LCLL08] LIU, GUANGJUN ; CAO, YIN NI ; LIU, YUGANG ; LIU, ZHENNING: A Survey on Arc Fault Detection and Wire Fault Location for Aircraft Wiring Systems. In: *SAE International Journal of Aerospace* Bd. 1 (2008), Nr. 1, S. 903–914
- [LeAr00] LEE, D ; ARNASON, P: U.S. Navy Wiring Systems Lessons Learned. In: . Presentation at the Joint Conference on Aging Aircraft, 2000
- [LeRe01] LEPRETTRE, B. ; REBIERE, Y.: Detection of electrical series arcs using time-frequency analysis and mathematical morphology. In: . Bd. 2 : IEEE, 2001 — ISBN 978-0-7803-6703-6, S. 446–449
- [LiDC11] LIU, BANGYIN ; DUAN, SHANXU ; CAI, TAO: Photovoltaic DC-Building-Module-Based BIPV System—Concept and Design Considerations. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* Bd. 26 (2011), Nr. 5, S. 1418–1429
- [Lope09] LOPEZ DEL MORAL HERNÁNDEZ, DAVID: *Study of the physical effects and protection systems in on-board electric power distribution systems [en Espagnol]*, Université de Madrid, 2009

- [LSTH15] LEZAMA, JINMI ; SCHWEITZER, PATRICK ; TISSERAND, ETIENNE ; HUMBERT, JEAN-BAPTISTE ; WEBER, SERGE ; JOYEUX, PATRICE: An embedded system for AC series arc detection by inter-period correlations of current. In: *Electric Power Systems Research* Bd. 129 (2015), S. 227–234
- [Luca01] LUCAS, J ROHAN: *High Voltage Engineering*. URL http://www.elect.mrt.ac.lk/HV_Chap1.pdf. - abgerufen am 2016-10-13. — Scribd
- [LuZa03] LUIS, J ; ZAHN, M: *detection of Electric Arcs in 42-volt Automotive Systems*, Massachusetts Institutes of Technology, Master thesis on Electrical Engineering, 2003
- [MADK08] MOFFAT, B. G. ; ABRAHAM, E. ; DESMULLIEZ, M. P. Y. ; KOLTSOV, D. ; RICHARDSON, A.: Failure mechanisms of legacy aircraft wiring and interconnects. In: *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Bd. 15 (2008), Nr. 3, S. 808–822
- [Mall99] MALLAT, S. G.: *A wavelet tour of signal processing*. 2nd ed. Aufl. San Diego : Academic Press, 1999 — ISBN 978-0-12-466606-1
- [MiHi73] MILLER, D. ; HILDENBRAND, J.: DC Arc Model Including Circuit Constraints. In: *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* Bd. PAS-92 (1973), Nr. 6, S. 1926–1934
- [Mora27] MORAND, MAX: Etude sur le passage de la décharge électrique à travers les gaz raréfiés et sur la répartition du champ dans l'espace sombre. In: *Journal de Physique et le Radium* Bd. 8 (1927), Nr. 11, S. 451–472
- [Mous11] MOUSSA ALI, ABDOURAMANE: *Diagnostic sans modèle a priori*, Nancy 1, 2011
- [MSRR15] MACKAY, LAURENS ; SHEKHAR, ADITYA ; ROODENBURG, BART ; RAMIREZ-ELIZONDO, LAURA ; BAUER, PAVOL: Series arc extinction in DC microgrids using load side voltage drop detection. In: : IEEE, 2015 — ISBN 978-1-4799-9880-7, S. 239–244
- [MXYW14] MENG XIE ; XIAOBIN ZHANG ; YANJUN DONG ; WEILIN LI: Arc fault detection for DC Solid State Power Controllers. In: : IEEE, 2014 — ISBN 978-1-4799-4239-8, S. 1–6
- [Nguy15] NGUYEN, TRUNG KIEN: *Design and soc implementation of a low cost smart home energy management system*, Université Nice Sophia Antipolis, phdthesis, 2015
- [NoAl10] NOPIAH, Z.M ; AL.: Running damage extraction technique for identifying fatigue damage events,. In: *WSEAS Trans. Math*. Bd. 9 (2010), S. 324–333
- [Nott23] NOTTINGHAM, W.B.: A new equation for the static characteristic of the normal electric arc. In: *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.* Bd. 42 (1923), S. 302
- [NyBS12] NYA, B. H. ; BROMBACH, J. ; SCHULZ, D.: Benefits of higher voltage levels in aircraft electrical power systems. In: : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4673-1372-8, S. 1–5
- [PaRO11] PAMER, A. ; RITZBERGER, G. ; OBERZAUCHER, F.: Procédé de détection d'arcs électriques dans des installations photovoltaïques et une telle installation photovoltaïque.
- [Pauk93] PAUKERT, J: The arc voltage and arc resistance of LV fault arcs. In: , 1993, S. 49–51
- [PBTJ09] PARIZAD, A. ; BAGHAEI, H.R. ; TAVAKOLI, A. ; JAMALI, S.: Optimization of arc models parameter using genetic algorithm. In: *Electric Power and Energy Conversion Systems, 2009. EPECS '09. International Conference on, 2009*, S. 1–7
- [PHKB04] PARKER, M. T. ; HAM, H. M. ; KEENAN, J. J. ; BENOIT, L. P.: Electric arc monitoring systems.
- [Raiz01] RAIZER, YURI P. ; ALLEN, J. E. (Hrsg.) ; KISIN, V. I. (Übers.): *Gas Discharge Physics*. Corrected edition. Aufl. Berlin ; New York : Springer, 2001 — ISBN 978-3-540-19462-0
- [Rest07] RESTREPO, CARLOS E.: Arc Fault Detection and Discrimination Methods. In: : IEEE, 2007 — ISBN 978-1-4244-0837-5, S. 115–122
- [RSNM08] RESTREPO, C. ; STALEY, P.S. ; NAYAK, A. ; MIKANI, V. ; KINSEL, H.T. ; TITUS, S.R. ; ENDOZO, J.: Systems and methods for arc fault detection.
- [RTSL13] RABLA, MICHAEL ; TISSERAND, ETIENNE ; SCHWEITZER, PATRICK ; LEZAMA, JINMI: Arc Fault Analysis and Localisation by Cross-Correlation in 270 V DC. In: : IEEE, 2013 — ISBN 978-1-4673-5281-9, S. 1–6
- [Scha17] SCHAU, H.: Risk parameters of DC fault arcs #x2014; Research work on DC arcs in LV systems. In: *2017 12th International Conference on Live Maintenance (ICOLIM), 2017*, S. 1–6
- [ScNo09] SCHIMPF, FRITZ ; NORUM, LARS E.: Recognition of electric arcing in the DC-wiring of photovoltaic systems. In: : IEEE, 2009 — ISBN 978-1-4244-2490-0, S. 1–6

- [ShPZ08] SHU, HONG-CHUN ; PENG, SHI-XIN ; ZHAO, XING-BING: Integration of multi-algorithm for single-phase fault detection in distribution system with arc suppression coil grounding using extenics. In : IEEE, 2008 — ISBN 978-7-900714-13-8, S. 2111–2115
- [SiSS02] SIDHU, T.S. ; SAGOO, G.S. ; SACHDEV, M.S.: On-line detection and location of low-level arcing in dry-type transformers. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* Bd. 17 (2002), Nr. 1, S. 135–141
- [SKLL15] SEO, GAB-SU ; KIM, KATHERINE A. ; LEE, KYU-CHAN ; LEE, KYUNG-JUN ; CHO, BO-HYUNG: A new DC arc fault detection method using DC system component modeling and analysis in low frequency range. In : IEEE, 2015 — ISBN 978-1-4799-6735-3, S. 2438–2444
- [Slad17] SLADE, P. G. (Hrsg.): *Electrical contacts: principles and applications*. Second edition, first issued in paperback. Aufl. Boca Raton London New York : CRC Press, Taylor & Francis Group, 2017 — ISBN 978-1-138-07710-2
- [Some59] SOMERVILLE, J.M.: *The Electric Arc*. Wiley. Aufl., 1959
- [Steio6] STEINMETZ, C.P.: Electric power into light, Section VI. The Arc. In: *Trans. Amer. Inst. Elect. Eng.* Bd. 25 (1906), S. p802
- [StMe10] STROBL, CHRISTIAN ; MECKLER, PETER: Arc Faults in Photovoltaic Systems. In : IEEE, 2010 — ISBN 978-1-4244-8174-3, S. 1–7
- [StOp91] STOKES, A. D. ; OPPENLANDER, W. T.: Electric arcs in open air. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* Bd. 24 (1991), Nr. 1, S. 26
- [TeKo04] TERZIJA, V. ; KOGLIN, H.: On the modeling of long arc in still air and arc resistance calculation. In : Bd. 2 : IEEE, 2004 — ISBN 978-0-7803-8465-1, S. 88–88
- [Ti:i12] TI:Implementing Arc Detection In Solar Applications (2012)
- [TPSR05] TERZIJA, VLADIMIR V. ; POPOV, MARJAN ; STANOJEVIC, VLADIMIR ; RADOJEVIC, ZORAN: EMTP simulation and spectral domain features of a long arc in free air. In: *18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, 2005. CIRED 2005*, 2005, S. 1–4
- [UGHE12] URIARTE, FABIAN M. ; GATTOZZI, ANGELO L. ; HERBST, JOHN D. ; ESTES, HUNTER B. ; HOTZ, THOMAS J. ; KWASINSKI, ALEXIS ; HEBNER, ROBERT E.: A DC Arc Model for Series Faults in Low Voltage Microgrids. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* Bd. 3 (2012), Nr. 4, S. 2063–2070
- [UI06] UL 1699: *UL 1699: Standard for Arc-Fault Circuit-Interrupters*. URL https://standardscatalog.ul.com/standards/en/standard_1699
- [VaAu00] VACQUIÉ, SERGE ; AUBÈS, MICHEL: *L'Arc électrique*. Paris : Eyrolles : CNRS Editions, 2000 — ISBN 978-2-212-05822-2
- [VaWa31] VAN, A.R. ; WARRINGTON, C: Reactance relays negligibly affected by arc impedance. In: *Elect world* (1931)
- [Viol93] VIOLLE, J.: Four électrique. - Lumière et chaleur de l'arc. In: *J. Phys. Theor. Appl.* Bd. 2 (1893), Nr. 1, S. 545–552
- [WaBa15] WANG, ZHAN ; BALOG, ROBERT S.: Arc Fault and Flash Signal Analysis in DC Distribution Systems Using Wavelet Transformation. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* Bd. 6 (2015), Nr. 4, S. 1955–1963
- [WeWB14] WENDL, MICHAEL ; WEISS, MARTIN ; BERGER, FRANK: HF Characterization of Low Current DC Arcs at Alterable Conditions. In : VDE, 2014 — ISBN 978-3-8007-3624-9, S. 1–6
- [WiMM04] WILKINS, R. ; M. ALLISON ; M. LANG: Improved method for arc flash hazard analysis. In : IEEE, 2004 — ISBN 978-0-7803-8419-4, S. 55–62
- [WMBJ14] WANG, ZHAN ; MCCONNELL, STEPHEN ; BALOG, ROBERT S. ; JOHNSON, JAY: Arc fault signal detection - Fourier transformation vs. wavelet decomposition techniques using synthesized data. In : IEEE, 2014 — ISBN 978-1-4799-4398-2, S. 3239–3244
- [WTTG07] WHEELER, KEVIN R. ; TIMUCIN, DOGAN A. ; TWOMBLY, I. XANDER ; GOEBEL, KAI F. ; WYSOCKI, PHIL F.: *Aging Aircraft Wiring Fault Detection Survey* : NASA Ames Research Center, 2007
- [XSHJ11] XIU YAO ; SHENGCHANG JI ; HERRERA, LUIS ; JIN WANG: DC arc fault: Characteristic study and fault recognition. In : IEEE, 2011 — ISBN 978-1-4577-1272-2, S. 387–390
- [YaHW15] YAO, XIU ; HERRERA, LUIS ; WANG, JIN: Impact evaluation of series dc arc faults in dc microgrids. In : IEEE, 2015 — ISBN 978-1-4799-6735-3, S. 2953–2958

- [YCLW15] YARAMASU, ANIL ; CAO, YINNI ; LIU, GUANGJUN ; WU, BIN: Aircraft electric system intermittent arc fault detection and location. In: *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems* Bd. 51 (2015), Nr. 1, S. 40–51
- [YHHW12] YAO, XIU ; HERRERA, LUIS ; HUANG, YI ; WANG, JIN: The detection of DC arc fault: Experimental study and fault recognition. In: : IEEE, 2012 — ISBN 978-1-4577-1216-6, S. 1720–1727
- [YHJZ14] YAO, XIU ; HERRERA, LUIS ; Ji, SHENGCHANG ; ZOU, KE ; WANG, JIN: Characteristic Study and Time-Domain Discrete- Wavelet-Transform Based Hybrid Detection of Series DC Arc Faults. In: *IEEE Transactions on Power Electronics* Bd. 29 (2014), Nr. 6, S. 3103–3115
- [YuDJ07] YUNGTAEK JANG ; DILLMAN, DAVID L. ; JOVANOVIĆ, MILAN M.: Fully soft-switched three-stage AC-DC converter. In: : IEEE, 2007 — ISBN 978-1-4244-1627-1, S. 490–497
- [ZiMo09] ZIANI, A ; MOULAI, H: Extinction properties of electric arcs in high voltage circuit breakers. In: *Journal of Physics D: Applied Physics* Bd. 42 (2009), Nr. 10, S. 105205

Liste des figures

Figure 1-1 : Répartition des plasmas (naturels et de laboratoire) en fonction de leurs propriétés	8
Figure 1-2 : Illustration d'une avalanche dans l'air	9
Figure 1-3 : Caractéristique UI d'un plasma et arc	10
Figure 1-4 : Schématisation d'une décharge " avalanche" [Luca01]	10
Figure 1-5 : Courbe de Paschen électrodes Fe pour différents gaz	11
Figure 1-6 : Quelques tensions de claquages minimales (électrodes Fe)	11
Figure 1-7 : Structure spatiale d'une décharge [BaPo68] Distance x du gap illustrative I Espace cathodique II Lueur négative III Zone sombre de Faraday IV Colonne positive V Zone anodique	12
Figure 1-8 : Concentration du courant par une surface réduite	12
Figure 1-9 : Explosion de pont fondu étiré (électrodes fer 10A)	13
Figure 1-10 : Illustration notion d'analyse	14
Figure 1-11 : Caractéristique V-I d'arc selon les équations de Nottingham	16
Figure 1-12 : Caractéristique V-I d'arc sur électrodes Cu/Cu à l'horizontale	17
Figure 1-13 : Caractéristique V-I d'arc sur électrodes Al/Al à la verticale	17
Figure 1-14 : Synthèse de résultat par Paukert (<i>Paukert 1993</i>)	17
Figure 1-15 : Comparatifs modélisation Paukert et Observations	18
Figure 1-16 : Résistance du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	19
Figure 1-17 : Résistance du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	19
Figure 1-18 : Etendue "Rang" du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	20
Figure 1-19 : Etendue "Rang" du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	20
Figure 1-20 : Bruit du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	22
Figure 1-21 : Bruit du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	22
Figure 1-22 : Distribution Gaussienne du bruit d'arc (électrode Cu Ø4mm)	23
Figure 1-23 : Distribution Gaussienne du bruit d'arc (électrode Cu Ø11mm)	23
Figure 1-24 : Photo disposition caméra rapide PHOTRON FastCAM	24
Figure 1-25 : Dispositif caméra rapide	25
Figure 1-26 : Ouverture de contact par rétractation de pont fondu Electrode Fe, I=20A, Pression ambiante, Temps de pause 1µs	27
Figure 1-27 : Tension d'arc, électrodes Fe, I=20A, P=ambient	27
Figure 1-28 : Contact par fusion de pont fondu Electrode Fe, Iarc=18A, Pression ambiante, Temps de pause 1µs	28
Figure 1-29 : Fusion des électrodes par un bref pont fondu Cathode (gauche) & Anode (droite) Fe 6.3mm, 18.5A pression ambiante. Écartement non contrôlé <2mm Temps de pause 1µs	30
Figure 1-30 : Courant/tension pendant la fusion des électrodes par un bref pont fondu	30
Figure 1-31 : Observations électriques tension d'arc VS fastCam (Valim 270V _{DC} , P=Patm-0.5b, charge RL=48Ω 105µH) vitesse 100kfps, temps de pause 10µs	31
Figure 1-32 : Mesure de la luminosité et niveaux électriques de la décharge	32
Figure 1-33 : Spectrogramme fluctuation gap 800hPa	33
Figure 1-34 : Spectrogramme fluctuation gap 500hPa	33
Figure 1-35 : Spectrogramme fluctuation gap 200hPa	33
Figure 1-36 : Courant de ligne sur charge 270V _{DC} 48Ω avec arc, Patmo	34
Figure 1-37 : Spectrogramme du bruit d'arc à pression atmosphérique	34
Figure 1-38 : Soufflage du métal en fusion sur l'anode par le gaz ionisé en cathode Décharge 18A, électrode fer, écartement <2mm Temps de pause 1µs	35
Figure 1-39 : Explosion de particule en vol 270Vdc, 48Ω+arc, 5,56A, électrode Cu 6,3mm usagés, écartement approximatif 1,2mm images 100kfps, temps d'ouverture 1µs	36
Figure 1-40 : Courant/Tension représentatif de l'évènement Figure 1-39	36

Figure 2-1 : Convertisseurs dans le réseau de puissance conventionnel actuels (AC/DC AC/AC)	41
Figure 2-2 : Evolution de la puissance électrique embarquée [Char13]	41
Figure 2-3 : exemple de configuration possible dans une structure DC [Ayll10]	42
Figure 2-4 : SSPC générique DC PDS [YCLW15]	43
Figure 2-5 : Principe SSPC contrôleur à semiconducteur [MXYW14].....	43
Figure 2-6 : Source des défaillances électriques [WTTG07]).....	44
Figure 2-7 : Origine de défauts électriques (tiré de [Anil12] exploitant les données de[LeAr00])	45
Figure 2-8 : Bilan d'énergie sur les câbles à âme cuivrés [Elba12]	46
Figure 2-9 : Énergie rayonnée d'un arc en air libre	47
Figure 2-10 :	47
Figure 2-11: photo de dégâts de connecteur engendrés par un feu d'arc électrique [Haeb07] Boitier électrique PV	48
Figure 2-12 : Diversité de réseau DC (Seo 2015)	49
Figure 2-13 : Résultat de la moyenne DFT d'alimentation AC/DC GIU	50
Figure 2-14 : Smart grid DC/DC (Yao2015).....	51
Figure 2-15 : Logique de régulation CVD(b); AVD(c) (Yao2015)	51
Figure 2-16 : Réaction du correcteur PI en cas d'arc série en différents points (Yao2015).....	51
Figure 2-17 : Courbe générique de disjonction pour l'AC	52
Figure 2-18 : Classification des méthodes et domaines de détections	53
Figure 2-19 : Analyses du domaine temporel non intrusives.....	55
Figure 2-20 : Différentiel d'écart à l'estimation par modèle [BeNe06].....	56
Figure 2-21 : Algorithme prédictif selon la tension produite en PV [ScNo09].	56
Figure 2-22 : Résultats différentiel Paukert(larc)-larc selon (Yao2011).....	57
Figure 2-24 : Monitoring de signal (moteur).....	58
Figure 2-24 : Analyse GLR.....	58
Figure 2-25 : (bas) Résultat par RDE / (haut) signal d'acquisition présentant des variations abruptes.	58
Figure 2-26 : DSP d'impédance d'arc 240Vdc, charge variable [YHHW12]	59
Figure 2-27 : Spectrogramme de charge [SKLL15] sonde BP:10kHz-100kHz	59
Figure 2-28 : DSP d'arc en fonction de larc [WeWB14].....	60
Figure 2-29 : DSP d'arc en fonction de Lgap.....	60
Figure 2-30 : Résultat d'analyse fréquentielle multi-bande avec 5 sources d'alimentation (Seo2015)60	
Figure 2-31 : Arborescence des ondelettes. S onde initiale	61
Figure 2-32 : Courant analysé et résultat moyen d'ondelette de type DB3.1; bandes de fréquence 6.25-12.5kHz (Yao 2012).....	61
Figure 2-33 : Courant analysé et résultat moyen d'ondelette de type DB3.4 bandes de fréquence 25-31.25kHz (Yao 2012)	61
Figure 2-34 : Variabilité de signaux obtenus par ondelette Sans arc, avec variation de charge, avec arc série, avec arc parallèle	62
Figure 2-35 : analyse temps/fréquence à 0.28ms/DFT. Signal 5MHz, DFT 65.5kS (Johnson et Armijo 2014).....	63
Figure 2-36 : Partie Décision par sommation 11 parmi 11 [ASDA15]	64
Figure 3-1 : Charge simple.....	69
Figure 3-2 : Charge de masquage.....	70
Figure 3-3 : Charge multiple	70
Figure 3-4 : Pont par laine de fer (UL1699b).....	71
Figure 3-5 : Dispositif d'écartement (UL1699b)	71
Figure 3-6 : Schéma du GDARC (Andrea2010)	71
Figure 3-7 : positionnement des câbles striés pour la carbonisation et arc (UL1699).....	72
Figure 3-8 : Circuit fermé avec chemin carboné	72
Figure 3-9 : Documentation technique du pont vibrant (AS6087).....	72
Figure 3-10 : Profil d'accélération/fréquence recommandé (AS6087)	72

Figure 3-11 : Arc humide sur faisceau	73
Figure 3-12 : Guillotine de sectionnement (AS6087)	73
Figure 3-13 : Schéma de base.....	74
Figure 3-14 : Enceinte climatique.....	74
Figure 3-15 Électrodes cuivre/carbone	75
Figure 3-16 : Circuit fermé par électrodes d'écartement	75
Figure 3-17 : Chemin carboné	75
Figure 3-18 : Pont vibrant Mono touche IJL.....	76
Figure 3-19 : Arc par pont salin sur brèches de 2mm	76
Figure 3-20 : Création d'arcs série par pont salin humide (charge 48Ω +arc).....	76
Figure 3-21 : Configuration complète du banc de test.....	77
Figure 3-22 : Topologie générique banc de test.....	77
Figure 3-23 : Courant d'arc série à 270VDC par écartement d'électrode tungstène et cuivre pour une charge 48ohms.....	81
Figure 3-24 : signal arc par ouverture de contact Électrode laiton 6mm	81
Figure 3-25 : signal apparition d'un arc sur chemin carboné	82
Figure 3-26 : signal arc sur plot vibrant (plot et cosse en cuivre)	82
Figure 3-27 : signal d'arc fugitif sur une charge active régulée en puissance 1.6kW 270V _{DC}	83
Figure 3-28 : signal triangle avec activation d'arc par ouverture.....	83
Figure 3-29 : Courbe de ROC pour une capacité de discrimination mauvaise, nulle, moyenne (selon plusieurs valeurs-seuil du test) et idéale.....	85
Figure 3-30 : Illustration du nuage de point des valeurs résultats selon un domaine d'étude (courant de ligne, etc.) Expression de zone de confusion lors de superpositions.....	85
Figure 3-31 : Illustration d'une dispersion de résultat	85
Figure 4-1 : Pourcentage de chute de courant d'arc à 270Vdc	90
Figure 4-2 : Statistique de variation du courant lors d'apparition d'arc (149 cas d'ouverture Cu/Cu & C/C 270V _{DC} charges variables).....	91
Figure 4-3 : Variation de résistance de l'arc en fonction du courant.....	92
Figure 4-4 : Méthode de discrimination par variation (seuil statistique)	92
Figure 4-5 : Modèle équivalent Zligne avec/sans Arc	93
Figure 4-6 : Prédicteur Rarc.....	93
Figure 4-7 : Algorithme de prédiction d'impédance de ligne défectueuse.....	93
Figure 4-8 Estimation de l'impédance de ligne en fonction du courant de charge (temps réel, sans retard) (cadence : 250 estimations.s ⁻¹)	94
Figure 4-9 : Variation de tension d'arc selon le matériau des électrodes en fonction du courant (Courant avant arc : 32 cas 2.2A, 26 cas 5.5A, 24 cas 11A distribués selon : 8W, 17Cu, 14C, 14Al, 17Fe, 12laiton)	94
Figure 4-10 : Variation moyenne de tension d'arc selon le matériau des électrodes	95
Figure 4-11 : Estimation du résidu <i>a priori</i>	97
Figure 4-12 : Principe moyenne glissante médiane en $\pm W2$	98
Figure 4-13 : Réponse filtre Fc=10Hz.....	99
Figure 4-14 : Réponse filtre Fc=1kHz.....	99
Figure 4-15 : Illustration explicative de l'estimation par rampe	100
Figure 4-16 : Illustration explicative de l'estimation par pente	101
Figure 4-17 : Estimation à faible ajustement	102
Figure 4-18 : Estimation à fort ajustement	102
Figure 4-19 : Résidu victime d'artefact d'estimation	102
Figure 4-20 : Résidu contenant peu d'artefacts	102
Figure 4-21 : Principe d'évaluation qualitative des estimations	103
Figure 4-22 : Variance "Méso" 1ms (moyenne glissante T=10, W=1000).....	104
Figure 4-23 : Variance "Micro" 100µs (moyenne glissante T=10, W=1000)	104

Figure 4-24: Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. pour un estimateur passe-bas à différentes fréquences de coupure	105
Figure 4-25 : Comparatif corrélation de la variance glissante.....	106
Figure 4-26 : Comparatif corrélation de la variance glissante.....	106
Figure 4-27 : Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité T=10 point	107
Figure 4-28 : Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité T=100 points.....	107
Figure 4-29: Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité T=10 point	108
Figure 4-30: Comparatif corrélation de la variance glissante du signal initial avec les différents estimations et résidus. variance glissante pour différentes distances d'estimation de périodicité T=100 point	108
Figure 4-31 : Principe de la méthode de détection par calcul de la puissance du bruit d'arc	111
Figure 4-32 : Exemple de traitement de la puissance du résidu	112
Figure 4-33 : distribution normalisée des résultats par analyse de puissance du résidu 449 Arc sur charges R : 685 transitions sans arc sur charge R(120μH) / RL(1mH→34mH).....	113
Figure 4-34 : Courbe de ROC de la méthode de la puissance du résidu	114
Figure 4-35 : Scores/résultats "Pr Puissance du résidu" sur 1ms+100ms d'arc selon le domaine d'étude bidirectionnel I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante (Fc=8kHz) sur un signal Fe=200kHz	114
Figure 4-36 : Méthode d'approximations successives	115
Figure 4-37 : Courbe de ROC synthèse de la méthode "Puissance du résidu"	116
Figure 4-38 : Diagramme de principe de la méthode par centralisation de l'autocorrélation du résidu	117
Figure 4-39 : Exemple du traitement de la méthode d'analyse par la centralisation de l'autocorrélation du résidu.....	118
Figure 4-40 : distribution normalisée des résultats (scores) par analyse de dispersion de l'autocorrélation du résidu 449 Arcs sur charges R : 170 transitions sans arcs sur charge R(32μH à 120μH).....	119
Figure 4-41 : Courbe de ROC de la méthode par dispersion de l'autocorrélation.....	120
Figure 4-42 : Scores résultat "CXcorr Centralisation de l'autocorrélation du résidu" selon le domaine d'étude I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante (Fc=8kHz) sur un signal Fe=200kHz	120
Figure 4-43 : Courbe de Roc pour le seuil $f(\Delta I)$	121
Figure 4-44 : Illustration variance temporelle du résidu. Présence d'arc à partir du segment 9.....	121
Figure 4-45 : Diagramme de principe de la méthode "moyenne de la variance glissante"	122
Figure 4-46 : Exemple du traitement de la méthode d'analyse de l'évolution de la variance du résidu	123
Figure 4-47 : distribution normalisée des résultats de scores par analyse de l'évolution d'une variance du résidu 450 Arc sur charges R : 315 transitions sans arc sur charge R ($L \leq 120\mu H$).....	124
Figure 4-48 : Scores résultat "VARv : Variance moyenne" sur 96ms d'arc après transition selon le domaine d'étude I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante (Fc=8kHz) sur un signal Fe=200kHz	124
Figure 4-49 : Matrice de confusion graphique Th(a,b,l).....	125
Figure 4-50 : Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de I sur charges R uniquement.....	126
Figure 4-51: Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de I sur charges R+RL.....	126

Figure 4-52 : Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de ΔI sur charges R uniquement	126
Figure 4-53: Détermination graphique des coefficients a & b en fonction de ΔI sur charges R+RL ..	126
Figure 4-54 : Courbe de ROC méthode " variation de variance du résidu " sur charges R & RL par discrimination par seuil proportionnelle à ΔI	127
Figure 4-55 : Courbe ROC méthode "variation de variance du résidu" sur charges R & R+RL par discrimination à seuil fixe.....	127
Figure 4-56 : Diagramme de principe de la méthode DES	128
Figure 4-57 : Exemple du principe de la méthode fréquentielle.....	129
Figure 4-58 : Distribution normalisée des résultats de score pour l'analyse de densité spectrale d'énergie DSE 1-10kHz	129
Figure 4-59 : Distribution normalisée des résultats de score pour l'analyse de densité spectrale d'énergie DSE 1-50kHz	129
Figure 4-60 : Courbe ROC selon seuil déterministe Bande 1-10kHz	130
Figure 4-61 : Courbe ROC selon seuil déterministe Bande 1-50kHz	130
Figure 4-62 : Scores résultat "fréquentiel, DES de la bande 1-10kHz du signal" selon le domaine d'étude I_{init} , ΔI résultats obtenus à l'issue d'une extraction du résidu par moyenne glissante ($F_c=8kHz$) sur un signal $F_e=200kHz$	131
Figure 4-63 : Courbe de ROC sur charge R et RL selon une discrimination proportionnelle à ΔI	132
Figure 4-64 : caractéristiques spectrales sur plusieurs phases d'apparition d'arc [RTSL13].....	133
Figure 4-65 : DSP d'arc à différentes intensités (Wendl 2014)	133
Figure 4-66 : FFT convertisseur avec/sans arc Signal lissé 400Hz (Johnson et al. 2012)	134
Figure 4-67 : Résultat de DSP pour différente charge avec Arc et sans Arc.....	135
Figure 4-68 : Spectrogramme d'une charge résistive simple alimenté en 270VDC par écartement d'électrodes cuivre (Taille de fenêtre 10kS, espacement 1kS. Résolution spectrale 100Hz).....	135
Figure 4-69 : Spectrogramme signal triangle (simili onduleur 0-10A) avec arc (charge minimale résistive 2.4A) sur 270VDC (taille de fenêtre 10kS, espacement 1kS. Résolution spectrale 100Hz)	136
Figure 4-70 : Aspect du fenêtrage de type hamming et normalisé selon la variation min/max du signal fenêtré.....	137
Figure 4-71 : Phases de la méthode de détection.....	137
Figure 4-72 : Signal, Spectrogramme, binarisation selon un seuil -100dB et IDS correspondants	138
Figure 4-73 : Comparatif seuils fixes de binarisation (-70dB, -80dB, -90dB, -100dB).....	139
Figure 4-74 : chandelier IDS min-max-moyen (Seuil statique -100dB).....	140
Figure 4-75 : Illustration du mode de calcul du seuil de binarisation dynamique avec latence par fenêtres glissantes.....	141
Figure 4-76 : Évolution du bruit pour l'élaboration du seuil de binarisation dynamique.....	141
Figure 4-77 : résultats statistiques min-max-mean de l'IDS (par seuil de binarisation Autoadaptatif) $N_d=10ms$; $dT=-100ms$	142
Figure 4-78 : IDS de différentes charges	143
Figure 4-79 : Machine à états de la partie décision	144
Figure 4-80 : Résultat du bloc de confirmation.....	144
Figure 4-81 : résultat du test par plot vibrant.....	145
Figure 4-82 : Durée d'arc (Dilatation d'ordonnée en bleu).....	145
Figure 4-83 : Courbe de Roc (1- Specificity) / Sensitivity sur charge R.....	146
Figure 4-84 : Performance de détection pour 6 charges différentes.....	147
Figure 4-85 : Spectrogramme et résultat de détection à partir de l' IDS sur arc carbone (ouverture) $R=15.5\Omega$, $L=35\mu H$, alimentation 270V _{DC}	

Figure 5-1 : Algorithme de discrimination d'arc selon les 5 critères sélectionnés.....	153
Figure 5-2 : Synthèse du taux de détection critère par critère	154
Figure 5-3 : Diagramme radar "Accuracy" sur charge R,RL,R+RL.....	155

Figure 5-4 : Diagramme radar "Specificity" sur charge R,RL,R+RL [échelle de 95% à 100%]	156
Figure 5-5 : Diagramme radar "Sensitivity" sur charge R,RL,R+RL [échelle de 85% à 100%]	156
Figure 5-6 : Cas de non-détection multicritère	157
Figure 5-7: Principe du bypass d'analyse par reconnaissance de charge	158
Figure 5-8 : Architecture de détection d'arc avec choix des critères adapté à la charge	159
Figure 5-9 : Schéma d'intégration et de montage du démonstrateur dans le circuit HVDC270Vdc...	160
Figure 5-10 : Montage démonstrateur	160
Figure 5-11 : Montage double shunt 10A parallèle	160
Figure 5-12 : Démonstrateur intégré dans son boîtier (sans alimentation 220V _{AC} - ±5V _{DC})	161
Figure 5-13 : Machine d'état détection d'évènement par %tage de DROP ligne	161
Figure 5-14 : Rappel de la méthode d'analyse du Prez	162
Figure 5-15 : Chaîne de traitement du démonstrateur (mesure, acquisition, traitement, décision)	162
Figure 5-16 : Machine d'état de l'algorithmme immunisé contre l'effet des arcs fugitifs	163
Figure 5-17 : Résultat expérimentaux démonstrateur	163
Figure 5-18 : Résultats (charge 3.3A)	164
Figure 5-19 : Résultats (charge 11A)	164
Figure 5-20 : Résultats (charge 11A)	165
Figure 5-21 : Résultats (charge 5.6A)	165
Figure 8-1: Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	190
Figure 8-2 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	190
Figure 8-3 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	190
Figure 8-4 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	190
Figure 8-5 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	190
Figure 8-6 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	190
Figure 8-7 : Impédance réelle du plasma d'arc (Pression ambiante)	190
Figure 8-8 : Impédance réelle du plasma d'arc (Pression ambiante – 0.9b)	190
Figure 8-9 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	191
Figure 8-10 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	191
Figure 8-11 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	191
Figure 8-12 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	191
Figure 8-13 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)	191
Figure 8-14 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)	191
Figure 8-15 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (Pression ambiante)	191
Figure 8-16 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (Pression ambiante – 0.9b)	191
Figure 8-17 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic sur électrodes laiton	192
Figure 8-18 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic	193
Figure 8-19 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic	193

Partie 8 :

ANNEXES

8 ANNEXES

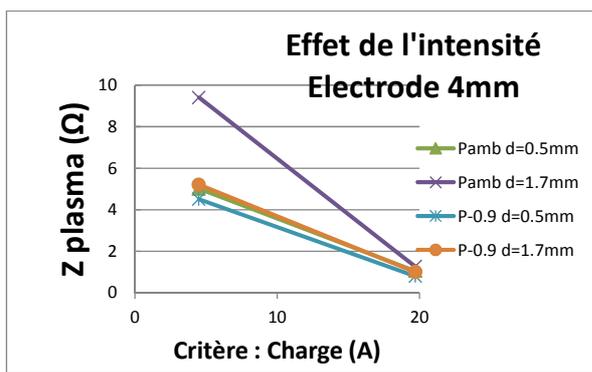


Figure 8-1: Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

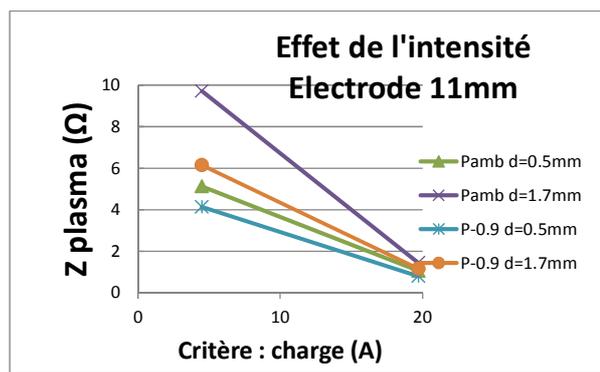


Figure 8-2 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

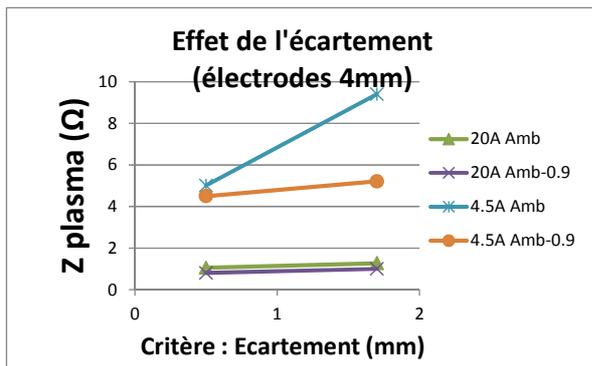


Figure 8-3 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

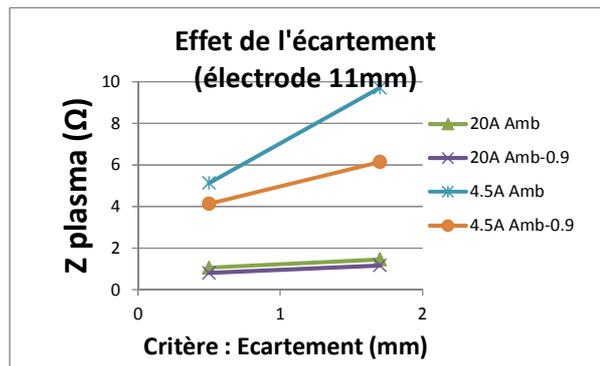


Figure 8-4 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

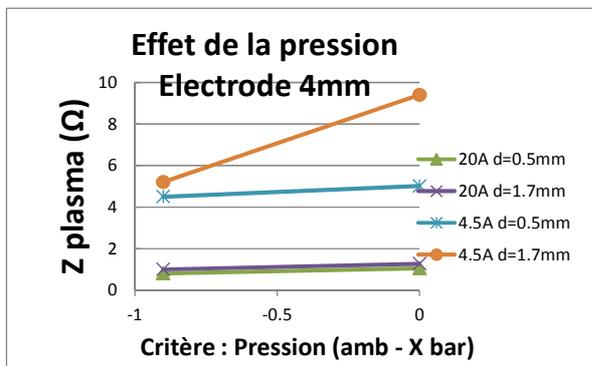


Figure 8-5 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

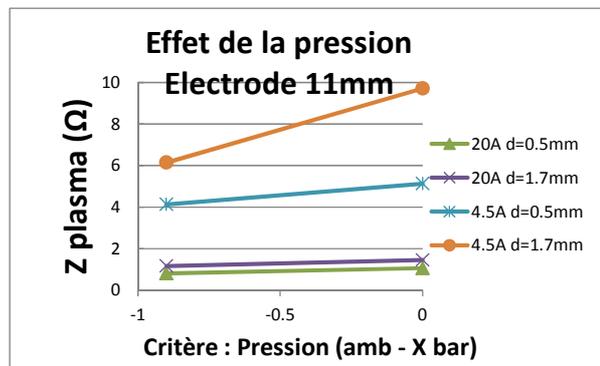


Figure 8-6 : Impédance réelle du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

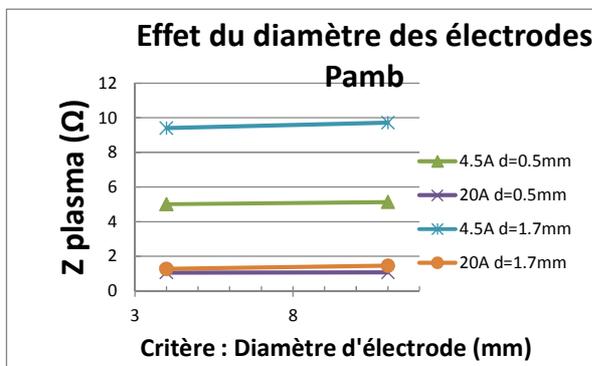


Figure 8-7 : Impédance réelle du plasma d'arc (Pression ambiante)

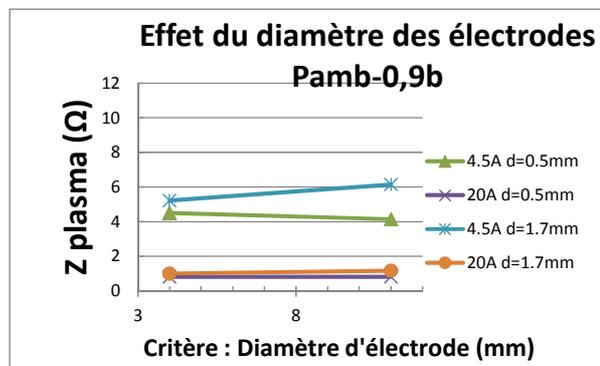


Figure 8-8 : Impédance réelle du plasma d'arc (Pression ambiante - 0.9b)

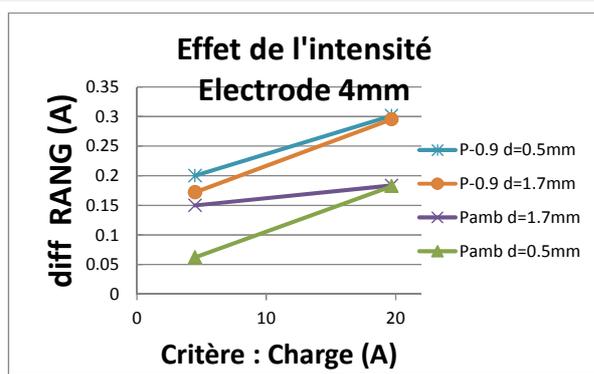


Figure 8-9 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

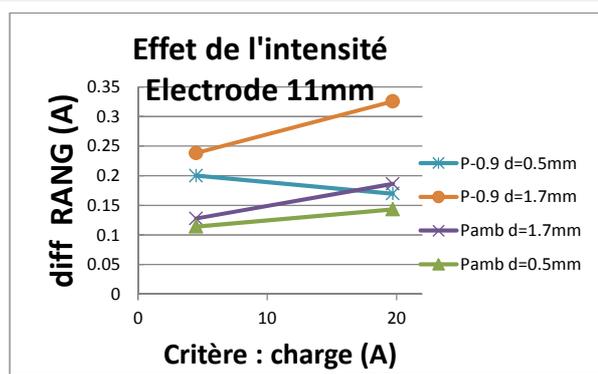


Figure 8-10 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

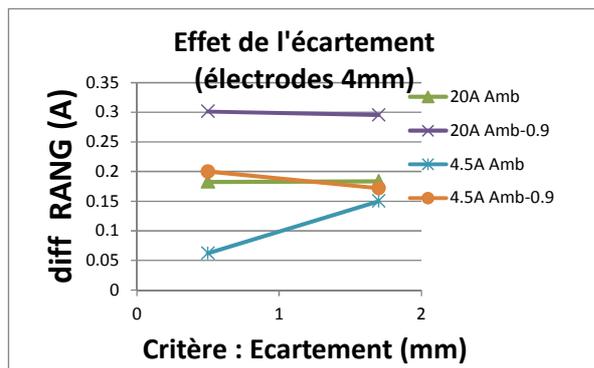


Figure 8-11 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

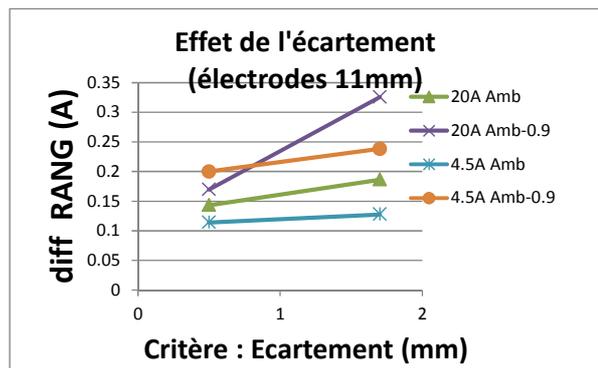


Figure 8-12 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

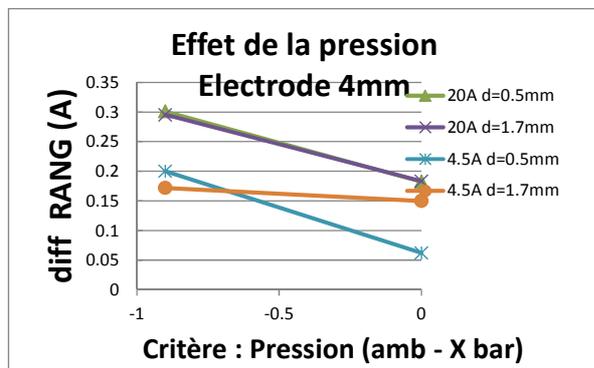


Figure 8-13 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø4mm)

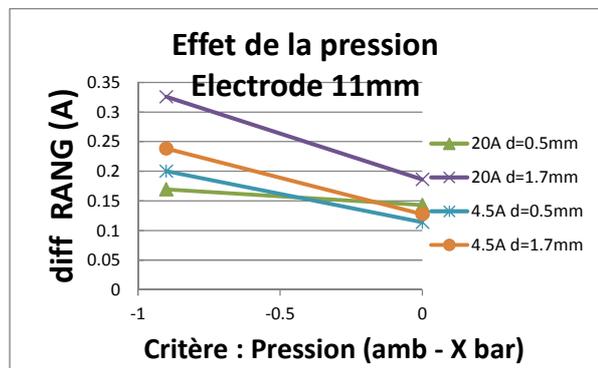


Figure 8-14 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (électrodes Cu/Cu Ø11mm)

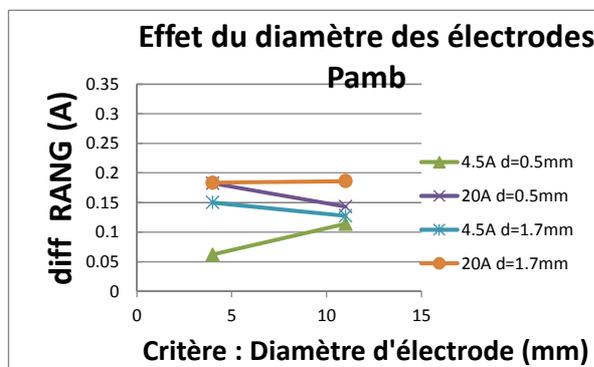


Figure 8-15 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (Pression ambiante)

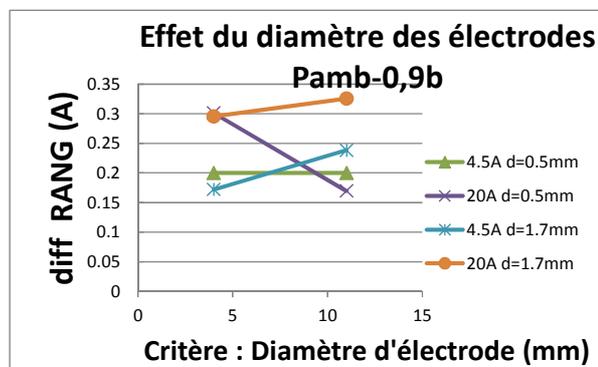
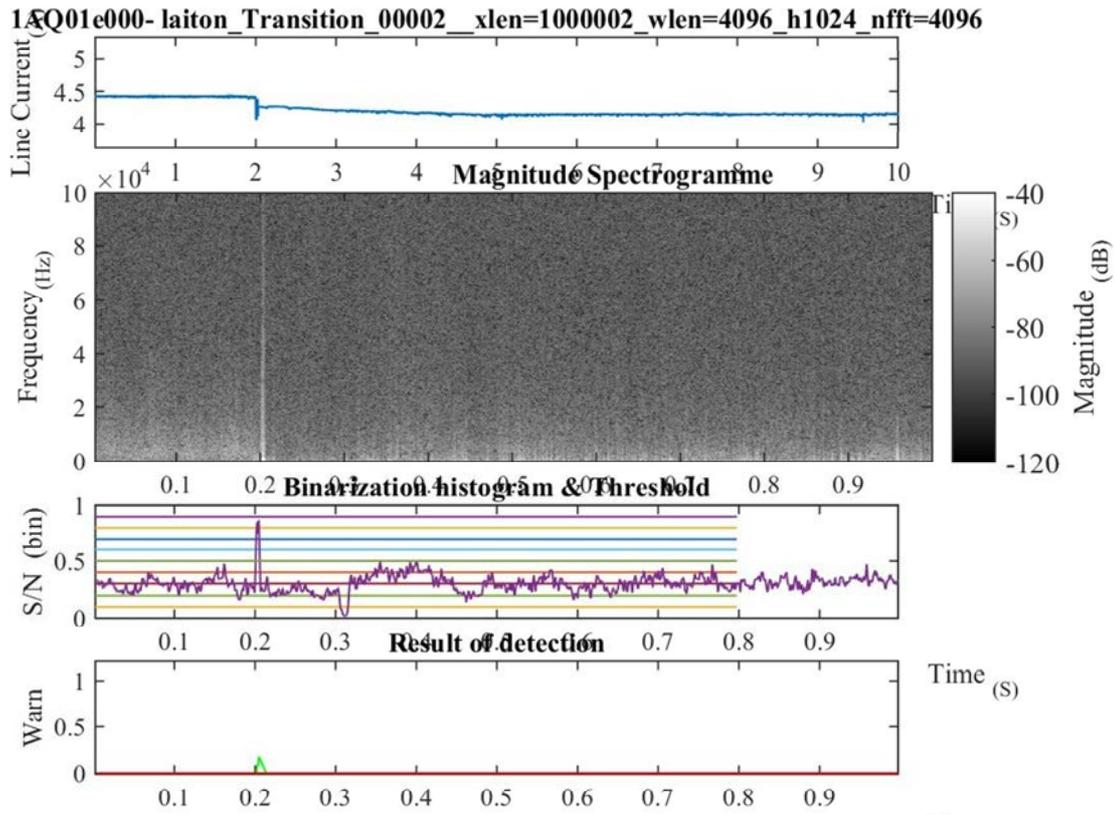
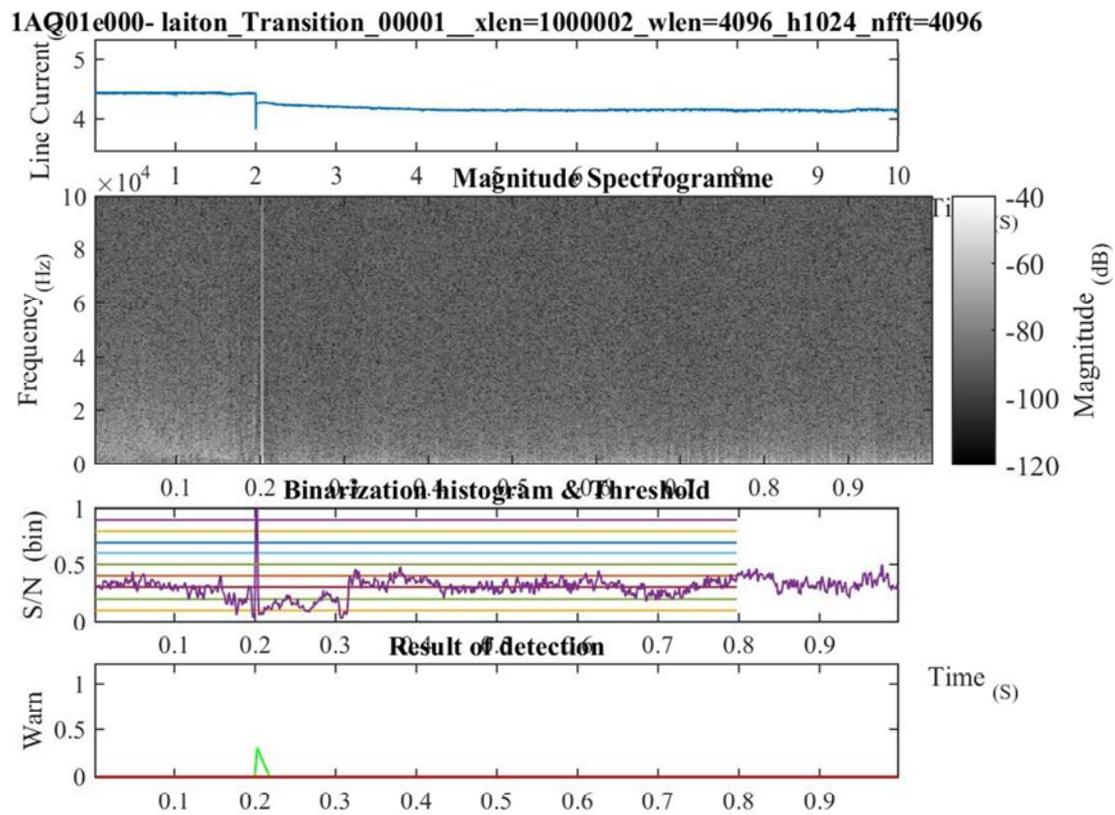


Figure 8-16 : Rang(MAX-MIN) du plasma d'arc (Pression ambiante - 0.9b)



|C270Vdc |Laiton |59.7R 4.5A 20% |35uH | 100hPa (15818m) |1.7mm(rot 3tr but) |T°amb |HR amb |Air amb (S)

Figure 8-17 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic sur électrodes laiton.



|C270Vdc |Laiton |59.7R 4.5A 20% |35uH | 100hPa (15818m) |1.7mm(rot 3tr but) |T°amb |HR amb |Air amb (S)

Figure 8-18 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic.

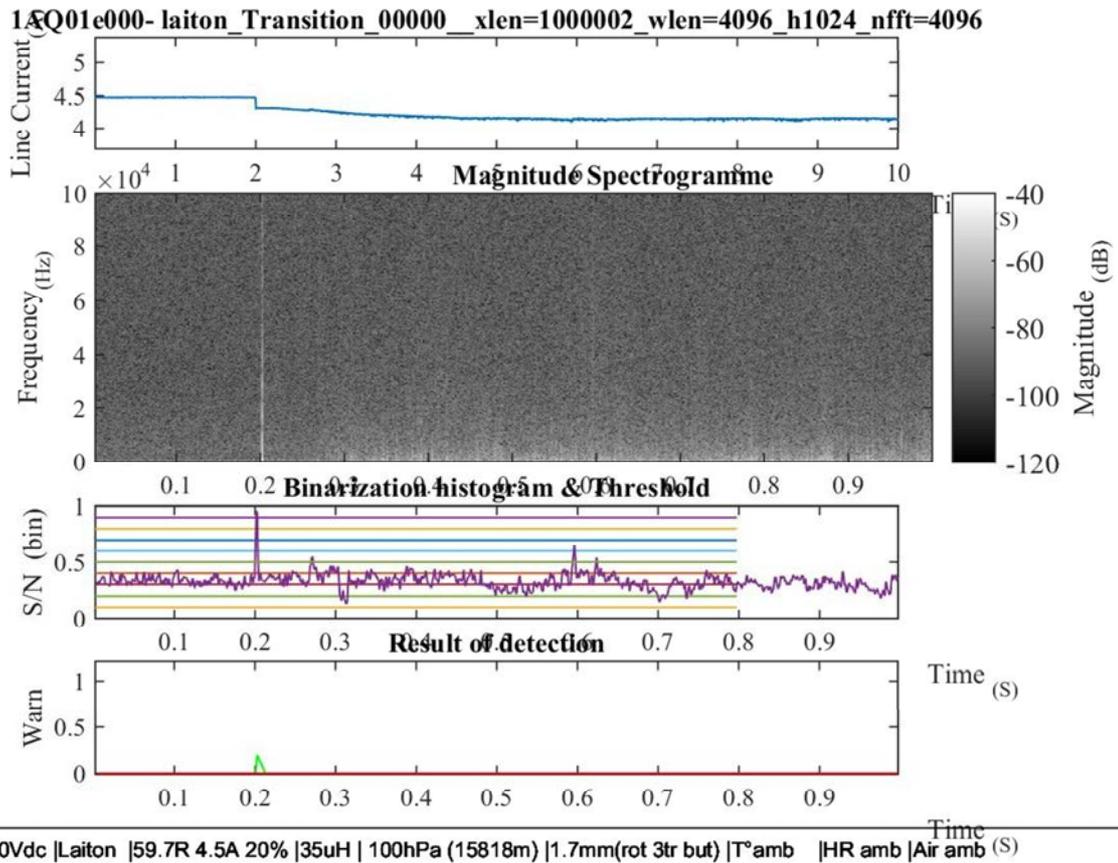


Figure 8-19 : Tracé Spectrogramme, IDS, résultat de détection pour un cas défectueux de diagnostic.

Résumé

Les avions du futur auront une topologie tout électrique. Pour cela, les constructeurs augmentent la puissance et la tension d'utilisation du réseau d'énergie embarqué. Cependant, le défaut d'arc électrique est un risque qui est souvent la cause d'incidents d'exploitation voire de crash. La contribution de cette thèse porte sur la problématique de l'identification et la détection de défauts électriques sur un réseau de distribution d'énergie de type HVDC $\pm 270V_{DC}$ destiné à l'aéronautique. Dans ce manuscrit, le premier axe suivi est exploratoire. Il porte sur l'observation du comportement et de la phénoménologie d'arc dans le milieu proche de l'aéronautique (notamment par l'émulation de l'altitude par la pression). Le second axe de recherche porte sur l'analyse, la mise au point et le développement de méthode de détection fiable d'un défaut d'arc électrique par un cœur de distribution d'énergie (SSPC) sur charges résistive et légèrement inductive. Cinq méthodes ont été développées au cours de ce travail de thèse. Elles sont basées sur l'analyse des caractéristiques temporelles, fréquentielles et temps-fréquence du courant de ligne. À l'issue de chaque méthode est produit un indicateur qui est ensuite utilisé par une logique de discrimination dépendant de chaque critère. Le comportement non-déterministe des arcs notamment aux conditions d'expérimentation (courant, tension, matériaux des électrodes, longueur de l'arc, etc.) rendent la détection difficile par un simple seuil sur le résultat des critères. Dans ces travaux, une approche proportionnelle au défaut est proposée pour la discrimination à l'aide de seuils variables selon le courant, la variation de charge ou le bruit électrique du système. Le résultat combiné des méthodes aboutit à une décision de mise en protection. Pour valider expérimentalement les algorithmes proposés, une vaste base de données a été constituée comprenant aussi bien des signaux de nature résistive que selfique avec à la fois des arcs et des variations de charges sans arcs afin de vérifier qu'aucune détection n'opère à tort. Le fruit de ces travaux a été en partie implémenté dans un prototype d'analyse en temps réel de la ligne de distribution.

Mots-clés : défauts d'arcs, arc série, phénomène aux électrodes, réseau électrique avionique, aéronautique, HVDC $\pm 270V$, détection de défauts d'arcs, AFDD.

Abstract

Tomorrow's aircraft will have an all-electric topology. This mean, manufacturers boost power and voltage of the embedded energy network. Nevertheless, the lack of an electric arc is a risk that is often the cause of the crash or operated occurrences. This thesis contributions concerns identification issue and electric arc fault detection on an energy distribution smart grid of HVDC network dedicated to avionic. The first line of this manuscript is exploratory. It covers behavioural observation and arc phenomenology in the grounded sphere of aeronautic (in particular emulated altitude by pressure). The second line of research deals with analysis, clarification and development of reliable approach of electric arc default detection through a central energy distribution on resistive charges. Five methods have been initiated throughout this thesis paper. They are based on several characteristic (time, frequency and time-frequency) of the line current. An indicator is produced at the end of each method. Subsequently, the indicator is used by a logic of discrimination according to each criterion. The non-deterministic behaviour of arc notably testing conditions (current, voltage, electrode materials, etc. makes detection difficult by a simple threshold on result of criteria. In this work, a new approach of arc fault discrimination is proposed. This used a proportional and variable threshold according to the current, load or noise variations from the system. The combined outcome of method results to a decision providing protection. To confirm experimentally proposed algorithms, a wide range database has been established. That included equally resistive and inductive signals with both arcs and load variations without arc fault so as to ensure that any detection is not mistakenly occurring. The upshot of this research work has been implemented in real time protection device prototype for HVDC $\pm 270V$ smart-grid.

Keywords: serial arc faults, electrode phenomenon, HVDC $\pm 270V$ avionics electrical network, arc fault detection, AFDD.