



ÉCOLE
CENTRALE LYON

N° d'ordre NNT : 2018LYSEC024

**THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON
opérée au sein de l'Ecole centrale de Lyon**

Ecole Doctorale N° 160

Ecole doctorale électronique, électrotechnique et automatique (EEA)

Spécialité de doctorat : Génie Électrique

Soutenue publiquement le 24/09/2018, par :

Etienne OUSS

**Caractérisation des décharges partielles
et identification des défauts
dans les PSEM sous haute tension continue**

Devant le jury composé de :

S. AGNEL

A. BEROUAL

N. BONIFACI

A. GIRODET

T. LEBEY

C. T. VU

Professeur – Université de Montpellier 2 - France

Professeur – Ecole Centrale de Lyon - AMPERE - France

HDR, CR CNRS – G2ELab – Grenoble - France

Ingénieur, Senior expert – SuperGrid Institute - France

HDR, DR CNRS – LAPLACE – Toulouse - France

Docteur – SuperGrid Institute - France

Président

Directeur de thèse

Rapporteur

Examineur

Rapporteur

Invité

Résumé :

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la surveillance des postes sous enveloppe métallique (PSEM) en courant continu (DC). La disponibilité de ces équipements étant primordiale pour leurs utilisateurs, il est nécessaire de disposer d'un outil de surveillance (*monitoring*) permettant de prévenir toute défaillance. Cet outil doit être capable de détecter et d'identifier les défauts présents, afin d'apporter une réponse adaptée. Depuis de nombreuses années, le monitoring des PSEM en AC est réalisé grâce à la mesure des décharges partielles (DP). Malheureusement, les connaissances des DP dans les PSEM en DC sont encore lacunaires, et les techniques d'identification des défauts sont intrinsèquement liées à l'environnement AC. De nouvelles techniques sont donc nécessaires en DC.

Ce travail de thèse avait pour but de caractériser les décharges partielles dans les postes sous enveloppe métallique en tension continue, et de mettre en place une solution de reconnaissance automatique des défauts. Pour cela, un banc de mesure des décharges partielles a d'abord été mis en place. Afin de garantir la pertinence des résultats pour des systèmes industriels, les travaux ont été réalisés dans une section de PSEM sous tension continue. Le comportement des DP a été étudié pour deux types de défauts : des pointes sur le conducteur haute-tension et des particules libres métalliques. La caractérisation a porté sur l'influence de plusieurs paramètres : la nature et la pression du gaz, le niveau et la polarité de la tension. La mesure des DP a d'abord été réalisée en conformité avec la norme IEC 60270, permettant ainsi d'évaluer la pertinence de cette méthode pour les applications DC. La caractérisation a été complétée grâce à d'autres chaînes de mesure : une mesure de courant stationnaire, une mesure de courant haute-fréquence, une mesure de lumière, et une mesure des ondes ultra-haute fréquence (UHF). Le travail sur l'identification des défauts a d'abord consisté à construire une signature pertinente à partir des mesures de DP, puis à constituer une base de données, et enfin à implémenter un algorithme de reconnaissance automatique.

Ces travaux ont montré que la méthode conventionnelle de mesure des DP présente certaines limites pour la détection des décharges partielles en DC, notamment pour les décharges couronne. Elle a tout de même permis de faire une bonne partie du travail de caractérisation. Les résultats obtenus avec les autres chaînes de mesure utilisées ont permis d'expliquer les lacunes de la méthode conventionnelle. Ils ont également permis un véritable apport pour la caractérisation des DP engendrées par des défauts de type pointe et particule. Enfin, une classification automatique efficace des défauts a été mise en place. Elle s'appuie sur le diagramme $q(\Delta t)$ issu des données de la mesure conventionnelle des décharges partielles et sur un algorithme de réseau de neurones.

Mots-clé :

Poste Sous Enveloppe Métallique (PSEM), Courant Continu (DC), Décharge Partielle (DP), Gaz, Défaut, Pointe, Particule, Pression, Identification, Réseau de Neurones, IEC 60270, UHF.

Abstract:

The framework of this thesis is the monitoring of High-Voltage, Direct Current (HVDC) Gas-Insulated Substations (GIS). The availability of these equipment is crucial for electrical networks operators. That is why they need a preventive diagnosis tool. The solution must be able to detect and identify the insulation defects, so that an appropriate maintenance can be planned. The last 40 years have seen Partial Discharges (PD) measurement become a classic monitoring tool for AC GIS. Unfortunately, there is a lack of scientific information about PD in HVDC GIS, and the known defect identification techniques are very specific to the AC environment. New techniques are thus needed in DC.

This thesis aimed to characterize partial discharges in DC gas-insulated substations, and to develop an automatic defect identification tool. The first step of this work was the development of a partial discharge measuring bench. The complete study has been performed in a GIS section, so that the results can be directly applied to industrial equipment. Two kinds of defect have been investigated: protrusions on the high-voltage conductor, and free metallic particles. The influence of parameters such as gas nature and pressure, voltage level and polarity has been evaluated. First, PD have been measured in conformity with the IEC 60270 standard, and the relevance of this method in a DC environment has been evaluated. Then, other measuring chains have been used to improve the characterization of partial discharges: a steady-state current measurement, a high-frequency current measurement, a light measurement and a measurement of Ultra-High Frequency (UHF) waves. Finally, a relevant signature for defect identification has been designed and extracted from DP recordings. A database has been constituted, and an automated recognition algorithm has been implemented.

The results show that the conventional PD measurement technique is not fully adapted to partial discharges detection in DC, corona discharges being the most problematic situation. Nevertheless, this method has brought enough information to start the characterization of PD. The limitations of the conventional method have been explained thanks to the results of the other measurements. These other experimental results have led to an actual improvement of the characterization of protrusion and particle-generated partial discharges. An effective automated defect classification solution has been implemented. The signature is derived from the $q(\Delta t)$ diagram that has been extracted from the data obtained with the partial discharge conventional measurement. The identification algorithm has a neural network structure.

Keywords:

Gas-Insulated Substation (GIS), Direct Current (DC), Partial Discharge (PD), Gas, Defect, Protrusion, Particle, Pressure, Identification, Neural Network, IEC 60270, UHF.

Table des matières

INTRODUCTION	11
CHAPITRE 1. ETAT DE L'ART	15
1.1. Décharges partielles dans les PSEM.....	16
1.1.1. Qu'est-ce qu'un PSEM ?	16
1.1.2. Qu'est-ce qu'une décharge partielle ?	18
1.1.2.1 Théorie de Townsend	18
1.1.2.2 Streamers.....	21
1.1.2.3 Leaders.....	23
1.1.3. Défauts à l'origine des décharges partielles dans les PSEM.....	23
1.1.3.1 Protubérances fixes - Corona	23
1.1.3.2 Particules flottantes	26
1.1.3.3 Autres types de défauts.....	27
1.2. Méthodes de mesure des décharges partielles.....	29
1.2.1. Méthode conventionnelle - IEC 60270	29
1.2.1.1 Circuits de mesure.....	30
1.2.1.2 Bande de fréquence	32
1.2.1.3 Charge apparente	33
1.2.2. Mesure UHF des décharges partielles.....	33
1.2.2.1 Ondes électromagnétiques dans les PSEM.....	33
1.2.2.2 Mesure UHF dans les PSEM.....	35
1.2.2.3 Potentiel pour l'identification des défauts.....	36
1.2.3. Mesure de la lumière émise par les DP	36
1.2.4. Autres méthode de détection des DP	37
1.2.5. Amélioration du rapport signal/bruit (<i>pre-processing</i>).....	37
1.2.5.1 Transformation de Fourier	38
1.2.5.2 Transformation en ondelettes.....	38
1.2.5.3 Analyse en composantes indépendantes (ICA).....	40
1.3. Reconnaissance des défauts	40
1.3.1. Extraction d'une signature.....	41
1.3.1.1 En AC : le diagramme de phase (Phase-resolved PD pattern, PRPD).....	41
1.3.1.2 En DC : analyse temporelle des décharges partielles.....	44

1.3.1.3	Défauts multiples	46
1.3.1.4	Signatures polyvalentes : analyse individuelle de chaque impulsion	46
1.3.2.	Méthodes automatiques de classification	51
1.3.2.1	Les réseaux neuronaux (Artificial Neural Networks, ANN)	51
1.3.2.2	Support Vector Machine (SVM)	53
1.3.2.3	Hidden Markov Models (HMM)	55
1.3.2.4	Apprentissage non-supervisé (clustering)	55
1.3.2.5	Le boosting	56
1.4.	Conclusion	58
CHAPITRE 2. DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL		61
2.1.	Un véritable PSEM HVDC	61
2.1.1.	Source HVDC	61
2.1.2.	Objet de test	63
2.1.3.	Introduction de défauts artificiels	65
2.2.	Mesure conventionnelle des décharges partielles	66
2.2.1.	Chaîne de mesure conventionnelle des DP	66
2.2.2.	Caractérisation à vide	67
2.3.	Mesures de courant	68
2.3.1.	Montage électrique	68
2.3.2.	Mesure de courant stationnaire	69
2.3.3.	Mesure haute-fréquence	70
2.4.	Mesure du rayonnement lumineux	71
2.4.1.	Détection qualitative des UV - caméra UV	71
2.4.2.	Mesure quantitative de la lumière - Photomultiplicateur	72
2.5.	Mesure des ondes UHF	73
2.6.	Protocole expérimental	75
2.6.1.	Changement de paramètres d'expérimentation	75
2.6.2.	Application de la tension et mesures	76

CHAPITRE 3. MESURE CONVENTIONNELLE DES DÉCHARGES PARTIELLES EN DC 79

3.1. Comportement des particules libres métalliques 79

3.1.1.	Etude préliminaire : mouvement de va et vient d'une particule sphérique	80
3.1.2.	Comportement des particules filamenteuses en mouvement d'allers -retours (polarité positive)	81
3.1.3.	Comportement des particules filamenteuses en <i>firefly</i> (polarité négative)	82
3.1.3.1	<i>Effet de la tension sur les DP</i>	83
3.1.3.2	<i>Lien entre le mouvement et les DP</i>	84
3.1.3.3	<i>Influence de la nature et de la pression du gaz sur les DP</i>	85
3.1.4.	Bilan	86

3.2. Comportement des défauts de type pointe sur le conducteur haute-tension 87

3.2.1.	Comportement des défauts de type pointe dans l'azote (N_2) en polarité positive	87
3.2.1.1	<i>Influence du niveau de tension sur la formation des DP</i>	87
3.2.1.2	<i>Influence de la pression sur les DP en présence d'une pointe positive dans l'azote</i>	90
3.2.1.3	<i>Influence de la durée d'application de la tension sur les DP en présence d'une pointe positive dans l'azote</i>	92
3.2.1.4	<i>Répétabilité et reproductibilité des mesures de DP en présence d'une pointe positive dans l'azote</i>	93
3.2.2.	Comportement des défauts de type pointe dans l'azote (N_2) en polarité négative	95
3.2.2.1	<i>Influence du niveau de tension sur la formation des DP</i>	95
3.2.2.2	<i>Influence de la pression sur les DP en présence d'une pointe négative dans l'azote</i>	100
3.2.2.3	<i>Influence de la durée d'application de la tension sur les DP en présence d'une pointe négative dans l'azote</i>	103
3.2.2.4	<i>Répétabilité et reproductibilité des mesures de DP en présence d'une pointe négative dans l'azote</i>	105
3.2.3.	Comportement des défauts de type pointe dans le SF_6	107

3.3. Conclusion 109

CHAPITRE 4. APPORT DES MÉTHODES NON-CONVENTIONNELLES À L'ANALYSE DES DÉCHARGES PARTIELLES 111

4.1. Mesure de l'émission lumineuse 111

4.1.1.	Approche qualitative – Caméra UV	112
4.1.2.	Approche quantitative – Photomultiplicateur	113
4.1.2.1	<i>Effet du niveau de tension</i>	113
4.1.2.2	<i>Effet de la pression</i>	115
4.1.2.3	<i>Influence de la nature du gaz</i>	116
4.1.3.	Détection des rayons lumineux en présence d'une particule libre métallique	117
4.1.4.	Limites de la mesure de lumière pour la détection de défauts	117

4.2.	Mesures de courant	118
4.2.1.	Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe dans l'azote	118
4.2.1.1	<i>Effet du niveau de tension</i>	118
4.2.1.2	<i>Equation de la caractéristique courant-tension</i>	121
4.2.1.3	<i>Effet de la pression</i>	123
4.2.1.4	<i>Transition entre un régime impulsionnel de décharge et un régime continu (pulseless) pour le corona négatif dans l'azote</i>	124
4.2.1.5	<i>Bilan des mesures de courant en présence d'une pointe dans l'azote</i>	129
4.2.2.	Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe dans le SF ₆	130
4.2.2.1	<i>Effet du niveau de tension</i>	130
4.2.2.2	<i>Modélisation de la caractéristique courant-tension : effet de la pression</i>	131
4.2.3.	Caractéristique courant-tension en présence d'une particule libre métallique	131
4.2.4.	Avantages et inconvénients de la mesure de courant stationnaire pour la détection des défauts	132
4.3.	Mesure des ondes UHF	132
4.3.1.	Détection des défauts de type particule	133
4.3.2.	Détection des défauts de type pointe dans le SF ₆	134
4.3.3.	Conclusions sur la mesure UHF	136
4.4.	Conclusion	136
CHAPITRE 5.	IDENTIFICATION DES DÉFAUTS	139
5.1.	Définition d'une signature en DC	140
5.1.1.	Intérêt du diagramme $q(\Delta t)$	140
5.1.2.	Normalisation de la signature	143
5.1.3.	Echantillonnage de la signature	145
5.2.	Constitution d'une base de données	147
5.3.	Implémentation et optimisation d'un algorithme de reconnaissance automatique de défauts	149
5.3.1.	Structure générale de l'algorithme	149
5.3.2.	Généralisation et performance de l'algorithme de reconnaissance	149
5.3.3.	Amélioration de la robustesse de la classification par la redondance	152
5.4.	Conclusion	154

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES157

RÉFÉRENCES 161

Bibliographie161

Contributions scientifiques168

ANNEXE A. DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL DE RECONNAISSANCE DES DÉFAUTS.....169

A.1. Implémentation d'un algorithme de réseau de neurones.....169

A.2. Développement d'une interface.....169

REMERCIEMENTS.....173

Introduction

Dans les réseaux électriques en tension alternative (AC), les Postes Sous Enveloppe Métallique (PSEM) sont utilisés depuis de nombreuses années en raison de leur faible encombrement et de leur robustesse. Ces postes sont composés d'un conducteur haute-tension maintenu par des pièces isolantes dans une enveloppe métallique. L'enveloppe contient un gaz isolant sous pression comme le SF_6 , l'air sec, l'azote ou le CO_2 . La conception de l'ensemble repose sur les hautes tenues diélectriques des isolants solides et gazeux utilisés, ce qui permet de réduire les distances tout en supportant des champs électriques très intenses. Dans ce contexte, tout défaut interne dans le poste de nature à amplifier localement le champ électrique peut avoir des conséquences dramatiques sur l'installation. En effet, même si le défaut n'est pas assez important pour conduire directement à l'amorçage, sa présence peut dégrader l'isolation au fil du temps et réduire la tenue diélectrique, jusqu'à atteindre l'amorçage. Cette situation doit à tout prix être évitée par l'exploitant du réseau car elle est dangereuse et nécessite une importante maintenance pendant laquelle l'installation est indisponible. Il est donc fondamental de disposer d'outils de surveillance (*monitoring*) de l'état de l'isolation électrique des postes.

Le plus important de ces outils est certainement celui de la mesure des décharges partielles (DP), qui s'appuie sur le fait que les défauts qui peuvent conduire à l'amorçage génèrent aussi des décharges localisées : les DP. Plusieurs méthodes permettent de mesurer les décharges partielles. L'une d'entre elles est décrite dans la norme IEC 60270, dont le dernier amendement date de 2015 [1]. Il s'agit d'une mesure électrique qui consiste à mesurer l'impulsion de courant générée par chaque décharge partielle.

En tension alternative, cette mesure peut être synchronisée avec l'onde de tension, ce qui permet de générer des diagrammes caractéristiques des différents types de défaut. Ainsi, il est possible d'identifier le type de défaut qui engendre les DP que l'on mesure.

L'étude des décharges partielles sous tension continue (DC) est à nouveau au centre des préoccupations de la communauté scientifique et des spécialistes de la haute-tension. Cela est dû au fait que la conception de liaisons HVDC est actuellement un axe de recherche majeur pour le transport de l'électricité sur les longues distances et l'intégration au réseau électrique des sources d'énergies distantes de ce dernier. Les nouveaux réseaux HVDC auront besoin d'équipements tels que les appareils de protection ou les postes de

distribution. La conception de ces équipements avec la technologie des PSEM présenterait le double avantage de l'insensibilité à l'environnement et de la taille réduite par rapport à des équipements isolés à l'air. L'identification des défauts grâce à la mesure des décharges partielles constituerait un moyen de s'assurer de la fiabilité des équipements en anticipant les possibles défaillances. Dans ce travail, nous nous intéressons à la mesure des DP dans les PSEM DC.

De nombreux travaux ont été menés sur le phénomène de décharges partielles en DC [2]–[6]. Cependant, ces derniers ont souvent été réalisés sur des maquettes expérimentales de taille réduite, où la géométrie et les dimensions sont sans rapport avec les PSEM. Il est donc difficile d'en tirer des conclusions pour les systèmes réels, d'autant plus que sous contrainte DC, la charge d'espace joue un rôle essentielle dans l'initiation et le développement des décharges partielles. Quant à l'identification des défauts en DC, les résultats rapportés dans la littérature empruntent beaucoup aux approches développées en AC, mais sans en avoir la maturité. D'où l'intérêt de développer des techniques spécifiques pour le DC.

Cette thèse porte sur l'étude du phénomène de décharges partielles dans les PSEM sous tension continue en fonction de plusieurs paramètres d'expérimentation : la nature et la pression du gaz, la polarité et le niveau de la tension, et surtout le type de défaut. Elle a pour objectif de comprendre les mécanismes de développement des décharges et d'évaluer la possibilité d'utiliser les résultats de mesures pour élaborer un algorithme de reconnaissance des défauts. Il s'agit également de développer une méthodologie permettant l'identification automatique des défauts à partir des mesures de DP effectuées en DC dans un PSEM.

Le présent manuscrit comporte cinq chapitres. Le premier porte sur l'état des connaissances relatives aux décharges partielles, notamment en DC et dans les PSEM ; il comporte trois parties. La première partie revient sur les phénomènes physiques mis en jeu lors de l'apparition de DP, et sur les résultats de caractérisations effectuées par d'autres chercheurs. La deuxième partie présente les différentes méthodes que l'on peut utiliser pour détecter, caractériser ou mesurer des décharges partielles. Et la troisième partie décrit les bases théoriques pour l'identification des défauts, du choix d'une signature à la mise en place d'algorithme de reconnaissance automatique.

Le deuxième chapitre présente le dispositif expérimental utilisé dans nos travaux. On y décrit comment on s'est placé dans un véritable PSEM HVDC ainsi que les différentes chaînes de mesure mises en place, la mesure conventionnelle (IEC 60270), les mesures de courant stationnaire et haute fréquence, la mesure de l'intensité lumineuse et la mesure UHF. Différents aspects du protocole expérimental sont ensuite développés, notamment la procédure d'application de la tension.

Le troisième chapitre est dédié à l'utilisation de la méthode conventionnelle des décharges partielles pour obtenir des informations sur les décharges partielles générées par les deux

types de défaut les plus courants dans un PSEM : les particules et les pointes (aspérités). Pour chacun de ces défauts, la caractérisation des DP est menée pour deux gaz différents : l'azote (N_2) et l'hexafluorure de soufre (SF_6). Le comportement des DP est observé en fonction de la polarité et du niveau de tension DC, puis en fonction de la pression du gaz. L'effet de la durée d'application de la tension est ensuite évalué. Enfin, on se pose la question de la répétabilité et de la reproductibilité des mesures de DP en DC selon la norme IEC 60270.

Dans le quatrième chapitre, d'autres chaînes de mesure des décharges partielles sont utilisées pour obtenir des informations supplémentaires sur le comportement des DP en DC en présence d'une particule ou d'une pointe. Ces informations permettront de poursuivre la caractérisation, mais aussi de répondre à certaines questions suscitées par les résultats obtenus au chapitre précédent. Comme au chapitre 3, l'influence de la nature et de la pression du gaz, de la polarité et du niveau de la tension DC sont également analysées. Les différentes méthodes de mesure sont par la suite comparées avec la méthode conventionnelle et discutées au vu de leur potentiel pour la reconnaissance des défauts.

Enfin, le cinquième chapitre présente la méthodologie définie et les travaux accomplis pour mettre en place un algorithme de reconnaissance automatique des défauts. Une première partie relate le choix et l'élaboration d'une signature. Une deuxième aborde la problématique de la constitution d'une base de données. La troisième partie traite de la mise en place d'un algorithme de reconnaissance des défauts et de son optimisation.

Chapitre 1. Etat de l'art

L'objectif de ce chapitre est de faire le point sur l'état des connaissances relatives aux phénomènes de décharges partielles (DP), en particulier sur les conditions de leur apparition, leur mesure et leur caractérisation. L'accent est mis sur la recherche des DP dans les postes sous enveloppe métallique (PSEM, ou *Gas Insulated Substations, GIS*) en courant continu. Le phénomène de DP, dont les conséquences sur les installations électriques peuvent être dramatiques, fait l'objet de recherches intenses depuis de nombreuses années. Contrairement aux DP en courant alternatif (*Alternative Current, AC*) où la littérature est très riche et où l'on dispose de nombreux outils pour leur détection et leur caractérisation, les connaissances sur le phénomène de DP en courant continu (*Direct Current, DC*) restent limitées. Le fort intérêt pour les décharges partielles en DC est lié aux besoins de disposer d'outils de surveillance des composants des réseaux et équipements haute tension DC.

La première partie présente un état de l'art sur la compréhension physique des phénomènes de décharges partielles en courant continu que l'on peut retrouver dans un poste sous enveloppe métallique.

La deuxième partie fait le point sur les méthodes expérimentales disponibles pour la détection et la mesure de décharges partielles. Dans cette optique, la norme IEC 60270 qui donne un cadre universel à la mesure « conventionnelle » est incontournable. On s'intéresse également à l'apport d'autres méthodes, comme la mesure du signal lumineux associé ou encore la mesure ultra-haute fréquence (UHF).

La troisième partie relate comment les chercheurs ont pu s'attaquer à la problématique de l'identification des défauts. On y montre quelles données pertinentes, c'est-à-dire discriminantes pour la classification des défauts, peuvent être extraites des différentes mesures de décharges partielles. Plusieurs méthodes de classification automatique sont ensuite présentées.

1.1. Décharges partielles dans les PSEM

1.1.1. Qu'est-ce qu'un PSEM ?

Un PSEM est composé de quatre éléments principaux, représentés en Figure 1.

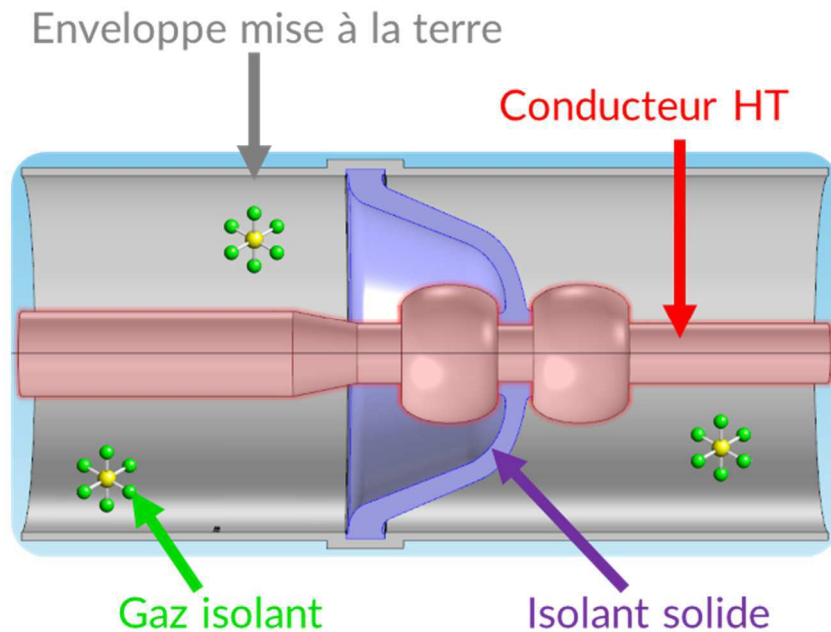


Figure 1 : Structure d'un PSEM.

- Le conducteur haute-tension
 - C'est la partie qui justifie l'existence du poste. Dans le cas le plus simple, il s'agit d'une barre métallique, mais on trouve aussi d'autres fonctions, comme les contacts mobiles des sectionneurs.
- L'enveloppe métallique
 - Mise à la terre, elle assure la séparation entre l'intérieur et l'extérieur du poste.
- Les supports isolants
 - Leur fonction première est de maintenir le conducteur haute-tension au milieu du poste. Ces supports sont souvent en forme de cône et sont constitués d'une résine époxy. Les supports isolants permettent aussi de séparer une installation en PSEM en plusieurs compartiments étanches.
- Le gaz isolant
 - Les principaux gaz utilisés sont recensés en Figure 2. La tenue diélectrique des gaz peut être significativement améliorée en augmentant leur pression.

Gaz	Symbole	Applications
Azote	N ₂	Générateurs HT, Condensateurs, Diviseurs HT
Dioxyde de carbone	CO ₂	Quelques générateurs HT, Disjoncteurs HT
Air	N ₂ + O ₂	Lignes aériennes, Machines, Disjoncteurs
Hexafluorure de soufre	SF ₆	Disjoncteurs, Transformateurs, Emetteurs de puissance, Lignes HT isolées au gaz, Générateurs HT
Hexafluorure de soufre + azote	SF ₆ + N ₂	Générateurs THT, Disjoncteurs

Figure 2 : Nomenclature des principaux gaz isolants utilisés en électrotechnique (d'après [7]).

→ Compacité

Les stations haute-tension isolées à l'air ont l'inconvénient de nécessiter de grandes distances d'isolement. La technologie des PSEM permet de réduire ces distances grâce à la bonne tenue diélectrique du gaz utilisé par rapport à l'air. En conséquence, les installations en PSEM sont environ 4 fois plus compactes que les installations isolées à l'air. Cela permet de les installer à proximité des zones urbaines.

→ Sécurité

Le deuxième avantage est apporté par la présence de l'enveloppe métallique qui sépare l'intérieur et l'extérieur du poste. Cela permet à l'intérieur du poste de ne pas être influencé par les perturbations extérieures. Réciproquement, le risque haute-tension est confiné à l'intérieur de l'enceinte. Une installation PSEM est donc sans danger pour les personnes et les équipements qui se trouvent à proximité. Il est donc tout à fait possible d'installer des PSEM dans un bâtiment, comme on le voit en Figure 3.



Figure 3 : Photographie d'une installation en PSEM dans un bâtiment.

1.1.2. Qu'est-ce qu'une décharge partielle ?

Une décharge partielle est définie dans la norme IEC 60270 [8] comme :

« Décharge électrique localisée qui entraîne une rupture partielle de l'isolation entre les conducteurs et qui peut ou pas se produire à proximité d'un conducteur. Les DP sont en général une conséquence d'un stress électrique local dans l'isolation ou à la surface de l'isolation. Généralement, ces décharges apparaissent sous formes d'impulsions ayant une durée de plus ou moins $1 \mu s$ »

Pour bien comprendre cette définition, il est important d'identifier les mécanismes qui régissent les décharges électriques. Dans ce travail de thèse, on s'intéresse spécifiquement aux décharges partielles dans l'isolation gazeuse des PSEM, c'est pourquoi les paragraphes qui vont suivre se concentrent sur les mécanismes de décharge dans les gaz.

Selon les caractéristiques de l'environnement étudié, notamment la pression du gaz et la distance inter-électrodes, ces mécanismes peuvent être très différents. On distingue notamment les décharges de Townsend, les *streamers*, et les *leaders*.

1.1.2.1 Théorie de Townsend

La théorie de Townsend donne un cadre théorique aux décharges dans les gaz quand l'influence de la charge d'espace est négligeable [9], c'est à dire pour des faibles valeurs du produit $P \cdot a$ (P = pression ; a = distance inter-électrodes). La théorie de Townsend identifie plusieurs modes de décharge, que l'on pourra situer sur la caractéristique courant-tension donnée en Figure 4 :

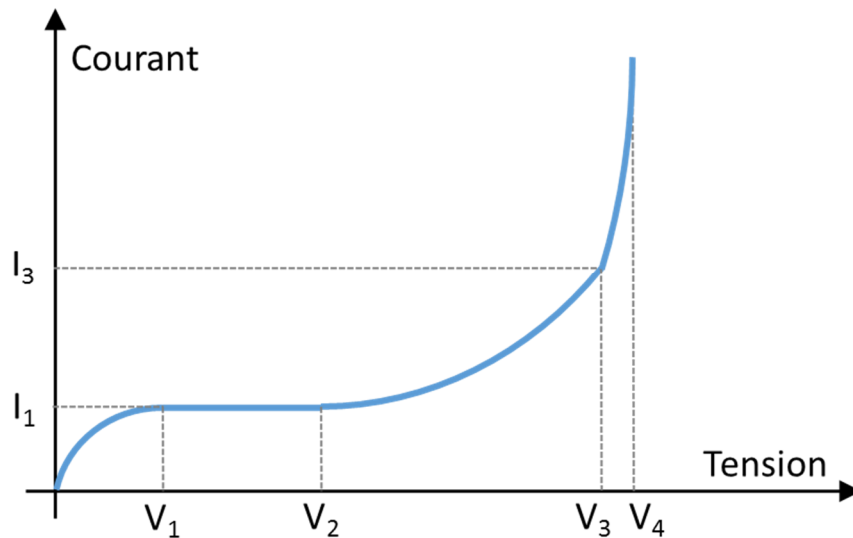


Figure 4 : Caractéristique courant-tension dans un gaz sous tension continue en champ uniforme (d'après [10]).

→ Décharges non autonomes sans multiplication électronique

Les seuls porteurs de charge mis en mouvement par le champ électrique sont engendrés par des agents d'ionisation extérieurs (rayons cosmiques, émission photoélectrique, etc.), si bien que l'on n'observe que de très faibles courants ($I \leq I_1$ sur la Figure 4).

Pour les faibles valeurs du champ électrique, le courant croît avec la tension, et c'est pourquoi on parle parfois de régime ohmique ($V \leq V_1$ sur la Figure 4). Pour des tensions plus élevées, cet effet arrive à saturation faute de porteurs de charge disponibles ($V_1 \leq V \leq V_2$ sur la Figure 4).

→ Décharges non autonomes avec multiplication électronique

Sous l'effet d'un champ électrique plus important ($V_2 \leq V \leq V_3$ sur la Figure 4), les électrons sont suffisamment accélérés pour pouvoir ioniser par collision de nouveaux atomes ou molécules neutres du gaz (Figure 5). Les électrons ainsi créés peuvent à leur tour participer au processus d'ionisation en cascade (Figure 5). On parle d'**avalanche électronique**.

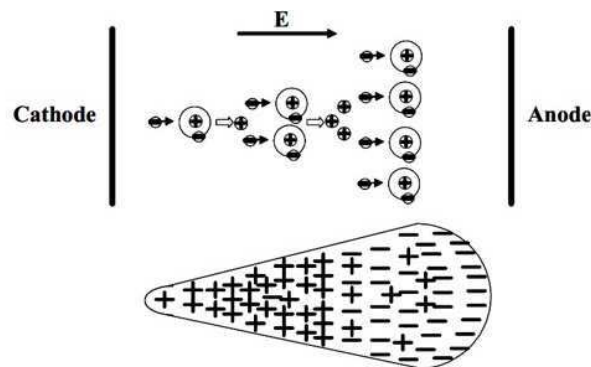


Figure 5 : Ionisation et avalanche électronique dans un champ électrique uniforme

Le premier coefficient de Townsend α permet de quantifier ce phénomène d'avalanche. Il est défini comme le nombre moyen de chocs ionisants qu'un électron produit par unité de longueur dans la direction du champ (équation (1)).

$$\alpha = \frac{N_{\text{électrons créés}}(\Delta l)}{\Delta l} \quad (1)$$

En intégrant l'équation (1) sur toute la distance inter-électrodes, on détermine que chaque électron émis de la cathode vers l'anode produit une avalanche contenant $e^{\alpha \cdot a}$ électrons libres, d'où on déduit que le nombre d'ions positifs créés est :

$$N_{\text{ions positifs}}(a) = (e^{\alpha \cdot a} - 1) \quad (2)$$

→ Décharges autonomes

Dans la suite de ses expériences, Townsend a observé que pour des champs électriques encore plus intenses, ($V_3 \leq V \leq V_4$ sur la Figure 4), la croissance du courant était trop rapide pour être expliquée par la multiplication électronique. Cela signifie qu'un autre mécanisme d'ionisation est entré en jeu. Il s'agit principalement de la libération d'électrons à la cathode par bombardement d'ions positifs.

Le deuxième coefficient de Townsend γ est défini comme le nombre d'électrons émis par la cathode en fonction du nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode (équation (3)). Ce coefficient dépend fortement du métal de la cathode, de la nature du gaz, ainsi que du champ électrique appliqué.

$$\gamma = \frac{N_{\text{électrons émis par la cathode}}}{N_{\text{ions positifs arrivant à la cathode}}} \quad (3)$$

Si les processus d'émission cathodique sont suffisants, on observe l'amorçage d'une décharge autonome. On a vu avec l'équation (2) que chaque électron émis de la cathode vers l'anode produit $(e^{\alpha \cdot a} - 1)$ ions positifs. Quand ces ions rejoignent la cathode, ils libèrent $\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot a} - 1)$ électrons. On peut donc avoir une décharge autonome si :

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot a} - 1) > 1 \quad (4)$$

L'équation (4) est plus connue sous le nom de critère de Townsend. Elle peut s'écrire sous la forme :

$$\alpha \cdot a > \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right) \quad (5)$$

Les études expérimentales de Townsend [10] sur les valeurs du coefficient α en fonction du champ électrique et de la pression du gaz permettent de calculer la tension minimale pour l'apparition d'une décharge autonome comme une fonction du produit $P \cdot a$:

$$U_{\text{claquage}} = \frac{B \cdot P \cdot a}{\ln(A \cdot P \cdot a) - \ln\left(\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right)} = f(P \cdot a) \quad (6)$$

où les coefficients A et B sont déterminés expérimentalement pour chaque gaz. Cette relation (équation (6)) est plus connue sous le nom de loi de Paschen [11]. On en déduit les courbes de Paschen qui permettent d'évaluer la tension de claquage pour un gaz donné en fonction du produit $P \cdot a$. Un exemple est donné en Figure 6.

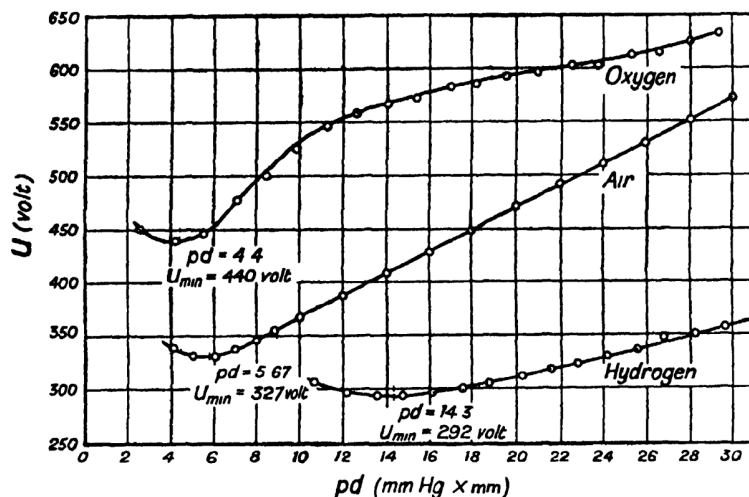


Figure 6 : Tension de claquage dans l'oxygène, l'air, et l'hydrogène [12].

La théorie de Townsend atteint ses limites lorsque le produit $P \cdot a$ du système étudié est trop important ($a > 1$ cm pour l'air à pression atmosphérique). On introduit alors les notions de *streamers*, puis de *leaders* que nous présentons dans les paragraphes qui suivent.

1.1.2.2 Streamers

Le modèle de décharge de type *streamer* a été introduit par Loeb et Meek [13]. Il permet de décrire l'influence de la charge d'espace dans le développement des décharges. Il intègre également d'autres mécanismes de libération d'électrons secondaires qui interviennent pour les produits $P \cdot a$ plus importants, notamment la photoémission et la photo-ionisation [7].

Selon ce modèle, lorsqu'une avalanche électronique est présente dans l'intervalle inter-électrodes, des paires électron-ions sont formées. Or la mobilité des électrons est environ 100 fois supérieure à celle des ions [14]. Les électrons se déplacent donc rapidement vers l'anode, pendant que les ions dérivent lentement vers la cathode, formant la queue de l'avalanche. Quand la densité d'électrons est suffisamment grande, le champ électrique est localement suffisamment élevé (Champ de Laplace) pour entraîner l'ionisation [15]. Cette ionisation permet l'émission de rayonnements lumineux, surtout ultraviolets. Les photons produits peuvent alors initier de nouvelles avalanches par photo-ionisation [16]. Des avalanches secondaires sont créées (Figure 7) entraînant à leur tour la formation d'une charge d'espace.

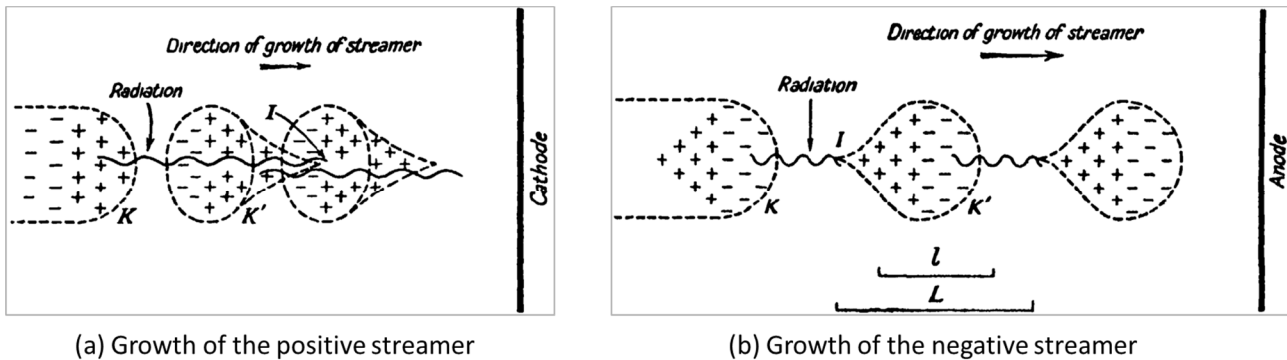


Figure 7 : Schéma de développement de la décharge streamer par avalanches photo-ionisantes [12].

Quand le champ électrique généré par la charge d'espace devient aussi important que celui qui est établi entre les électrodes, la décharge devient autonome. A partir de ce moment-là, la cathode ne joue plus le rôle principal dans le mécanisme d'ionisation, ce qui explique pourquoi sa composition (nature du métal) n'a plus d'influence sur la formation des décharges.

La décharge prend alors la forme d'un canal de plasma dans la direction de l'axe des électrodes. Ce stade de la décharge est appelé **streamer**. Ce phénomène ayant pour intermédiaire des photons, on comprend qu'il puisse avoir lieu plus rapidement que les décharges de Townsend alors que la distance inter-électrodes est plus grande.

Si le streamer court-circuite l'intervalle inter-électrodes, on obtient un amorçage (Figure 8).

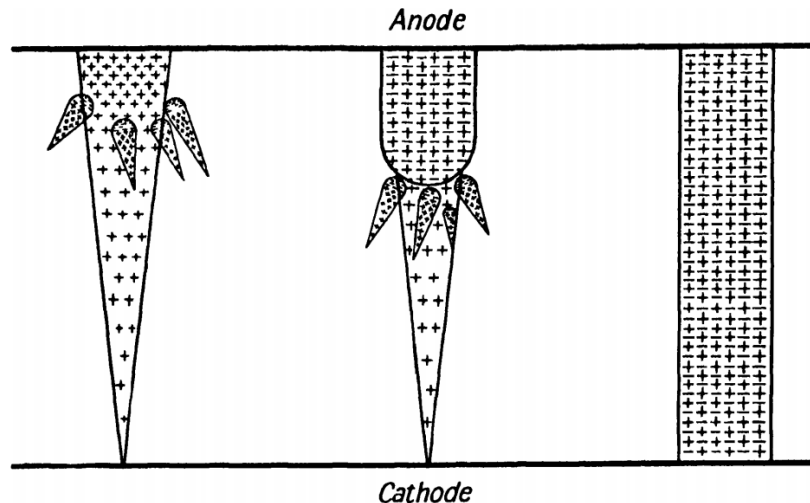


Figure 8 : Transition entre une avalanche électronique et un streamer jusqu'à franchir la distance inter-électrodes [12].

Cela entraîne une rapide augmentation de la densité de porteurs de charge, ce qui a de multiples effets. On observe notamment une augmentation locale de la température et de la pression, suffisante pour entraîner une forte ionisation. Ces phénomènes se renforcent mutuellement jusqu'à obtenir un canal conducteur entre les deux électrodes qui permet l'apparition d'une étincelle. Si la source peut fournir la puissance nécessaire, un arc électrique se forme.

1.1.2.3 Leaders

Pour des grandes distances inter-électrodes ($a > 1$ m pour l'air à pression atmosphérique), le phénomène d'ionisation thermique évoqué pour les *streamers* peut se produire avant même d'avoir franchi la distance inter-électrodes. L'emballement thermique conduit alors au développement rapide du canal conducteur, jusqu'au claquage. Ces décharges sont appelées *leader*.

On dit souvent que les décharges de type *leader* sont filamenteuses, que les décharges de type *streamer* sont buissonnantes, et que les décharges de type Townsend sont diffuses.

1.1.3. Défauts à l'origine des décharges partielles dans les PSEM

Les PSEM sont conçus pour éviter la présence de décharges partielles. On n'en mesurera donc seulement si des défauts sont présents. Ces défauts peuvent être de différentes natures.

1.1.3.1 Protubérances fixes - *Corona*

L'effet couronne est un phénomène bien connu dans le domaine de la haute-tension [14], [17] ; il prend naissance aux endroits où le champ est localement important (en AC comme en DC). Cette augmentation locale du champ peut être due à de nombreux facteurs, dont le plus connu est l'effet de pointe.

Les phénomènes sont différents si le défaut se situe sur le conducteur haute-tension ou sur l'enceinte du poste blindé où le champ électrique est plus faible. On distingue en outre deux types de décharges couronnes en fonction de la polarité : le corona positif et le corona négatif. Les différences de comportement entre les deux types de corona viennent du fait que la charge d'espace engendrée par le fort champ électrique n'a pas les mêmes conséquences. Une pointe négative crée une hétéro-charge qui accentue le renforcement local du champ électrique, ce qui favorise l'apparition de décharges partielles. Au contraire, une pointe positive engendre une homo-charge qui rend le champ électrique plus homogène, ce qui retarde l'apparition des décharges, mais conduit plus facilement à l'amorçage. C'est ce que l'on observe sur la Figure 9 : la tension d'apparition des décharges négatives est plus faible que celles des décharges positives, mais la tension de claquage est plus faible en polarité positive qu'en polarité négative. On retient que l'effet de la charge d'espace est incontournable dans les mécanismes de décharges *corona* [14].

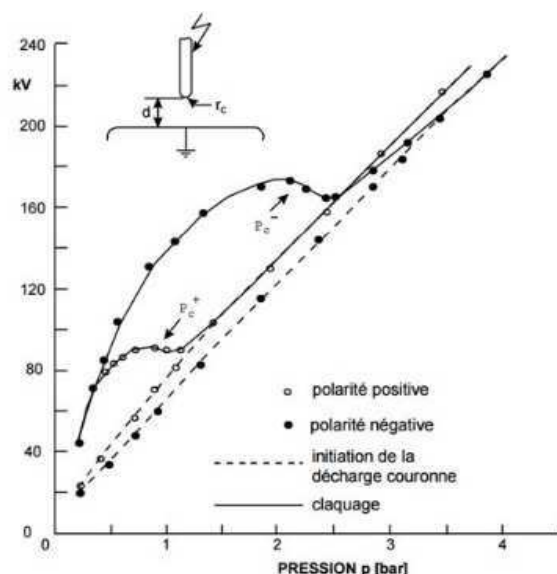


Figure 9 : Evolutions des seuils d'amorçage de la décharge couronne et du claquage en géométrie pointe-plan dans du SF_6 en fonction de la pression. Distance inter-électrodes : 40 mm ; rayon de courbure de la pointe : 5 mm [17]

→ Corona négatif

Lorsqu'une décharge couronne prend naissance par le biais d'une pointe de polarité négative, on parle d'effet couronne négatif. La décharge couronne est initiée si l'on dépasse une certaine tension seuil et si un électron libre est présent. Ensuite, une décharge de type Townsend a lieu près de l'électrode négative. Les ions positifs créés atteignent la cathode et génèrent de nouveaux électrons, par le bombardement de la surface du métal. A une plus longue distance de la pointe, les électrons se recombinent avec des molécules électronégatives dans le gaz. Une charge d'espace négative est formée. Entre les charges négatives qui s'éloignent et les ions positifs qui restent à proximité de la pointe, se crée une zone de faible champ électrique, appelée « espace sombre de Faraday », dans laquelle aucune ionisation n'a lieu [18] (Figure 10). Cette zone se comporte comme une impédance RC qui entraîne l'extinction de la décharge pendant un temps de l'ordre de la μs . Lorsque les ions négatifs s'éloignent à leur tour, les décharges reprennent.

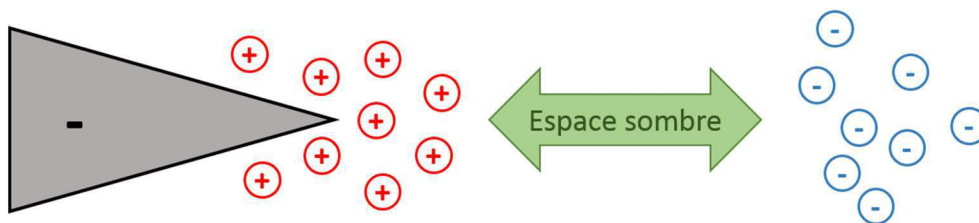


Figure 10 : Corona négatif engendré par une pointe ; espace sombre de Faraday

Le caractère récurrent des impulsions de décharges sur une pointe négative dans certaines conditions a été observé pour la première fois par Trichel [3] et a pris le nom d' « impulsions de Trichel ».

A partir d'un certain niveau de tension qui dépend notamment de la nature du gaz et de sa pression, les décharges n'ont plus lieu sous forme d'impulsion, mais de manière diffuse. On parle alors de *glow discharge* [4]. Par exemple dans l'air, les zones grisées de la Figure 11 sont les régions où apparaît une forme de décharge sans impulsions.

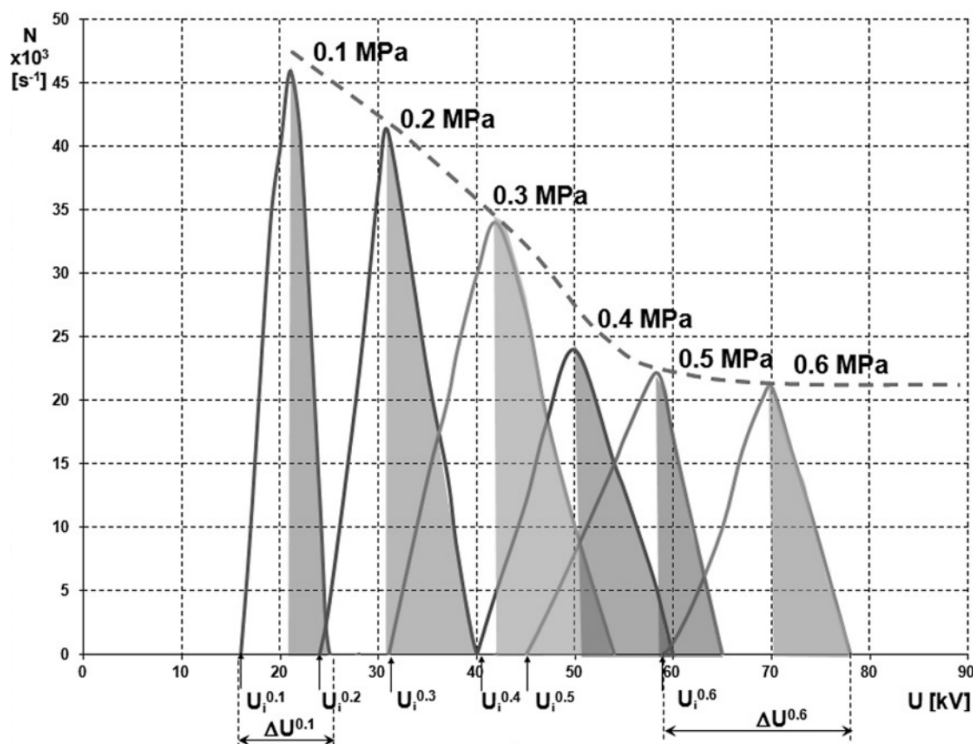


Figure 11 : Profils de la densité d'impulsions de DP en fonction de la tension pour différentes pressions (dans l'air, configuration pointe-plan, polarité négative) [19]

→ Corona positif

Lorsque qu'une décharge couronne prend naissance sur une pointe en polarité positive, on parle d'effet couronne positif. Les décharges de ce type apparaissent à un niveau de tension supérieur aux décharges corona négatives. Les électrons, attirés par l'électrode positive (anode), se concentrent à proximité du défaut, tandis que les ions positifs sont repoussés. Les décharges couronne se produisent alors essentiellement de la manière suivante [14]:

- Des streamers se développent dans le gaz près de la pointe et laissent, lors du déplacement des électrons, un nuage d'ions positifs près de la pointe.
 - Pour de courtes distances inter-électrodes, ce nuage peut entraîner directement l'amorçage.
 - Pour des plus grandes distances inter-électrodes, l'effet engendré par ce nuage est une sorte de bouclier qui tend à arrêter la décharge en rendant le champ électrique plus homogène.

- Lorsque la charge d'espace formée par les ions positifs s'éloigne de la pointe, les décharges peuvent reprendre avec la création de l'avalanche électronique, et ainsi de suite.

Comme les décharges couronne négatives, les décharges couronne positives génèrent donc des impulsions de courant répétées, sauf quand elles conduisent directement à l'amorçage.

Les nombreuses études menées sur la formation du corona positif ont mis en évidence l'influence de la nature et de la pression du gaz employé [20]–[23]. On relève notamment que pour certains gaz purs sous pression élevée, les streamers tendent à disparaître pour laisser la place à des *bursts* sporadiques. En présence d'impuretés, même en faibles quantités, le mode de décharge dominant redevient le *streamer*.

1.1.3.2 Particules flottantes

La présence de particules libres métalliques dans l'enceinte du poste conduit également à la réduction de la tenue diélectrique [24].

Sous l'effet du champ électrique, une particule métallique peut se charger et entrer en mouvement. La nature et les caractéristiques de ce mouvement dépendent de nombreux paramètres, notamment la position, la géométrie, le matériau et la masse de la particule, mais aussi le signe, l'intensité et la répartition du champ électrique dans le poste.

Lorsque le PSEM est sous tension DC dans une certaine polarité, la particule se charge au contact de la cuve qui est l'électrode de polarité opposée. Elle est alors principalement soumise à deux forces : son poids et la force de Coulomb. Tant que le poids domine, la particule reste posée au fond du poste. L'augmentation de la tension continue entraîne à la fois l'augmentation de la charge de la particule et celle du champ électrique auquel elle est soumise, jusqu'à ce que la force de Coulomb devienne supérieure au poids de la particule.

La particule entre alors en mouvement. Ce mouvement peut prendre différentes formes : la particule peut faire des petits bonds, ou dériver à la surface de la cuve, ou encore se mettre à tourner sur elle-même [25].

Si le champ électrique le permet, la particule peut même décoller et se diriger vers le conducteur haute-tension, d'autant plus vite que le champ électrique s'accroît en se rapprochant du centre du poste. La particule chargée atteint ainsi l'électrode HT, où sa charge s'inverse. Elle est maintenant attirée vers la cuve sous l'action conjointe de son poids et de la force de Coulomb. Le rebond sur le conducteur peut également avoir une influence sur la vitesse de la particule. En chutant sur la cuve, la charge de la particule est à nouveau inversée, ce qui lui permet de repartir vers le conducteur central. Finalement, on assiste à un **mouvement d'allers - retours entre les deux conducteurs** [26].

→ Mouvement de *firefly*

Quand le conducteur central est l'électrode négative, un type de mouvement supplémentaire peut être observé : le *firefly*.

Quand une particule chargée positivement arrive au contact de l'électrode négative, la particule acquiert une charge négative. Si la particule présente des arêtes vives, le champ électrique sur ces arêtes peut être assez intense pour entraîner une ionisation du gaz [6]. Les électrons sont alors rapidement évacués vers l'électrode positive, mais les ions positifs restent sur place. Quand la particule s'éloigne du conducteur HT, elle rencontre cette charge d'espace. Les ions positifs peuvent ainsi inverser la charge de la particule, qui est à nouveau attirée vers l'électrode centrale [24], [26], [27]. Une particule en *firefly* réalise finalement des **allers - retours de faible amplitude à proximité de l'électrode négative**.

Les phénomènes d'ionisation provoquent souvent une émission de lumière [24], d'où le nom de *firefly*.

1.1.3.3 Autres types de défauts

D'autres types de défauts peuvent produire des décharges partielles dans un PSEM, mais ils ne seront pas étudiés dans cette thèse. Parmi ces défauts, on trouve notamment les éléments flottants, les cavités et les défauts conduisant à des décharges de surface. Leur comportement est tout de même sommairement décrit dans les lignes qui suivent.

→ Éléments flottants

Des éléments mal fixés ou dévissés dans les PSEM peuvent perdre le contact électrique avec le conducteur ou l'enceinte. Ces éléments sont dès lors caractérisés par un potentiel intermédiaire défini par les capacités parasites que forme cette pièce avec les autres éléments métalliques qui l'entourent.

Les variations de potentiel des éléments flottants se font par l'intermédiaire de décharges partielles.

→ Décharges internes

Les décharges dites internes ont tendance à apparaître dans des cavités présentes au sein de diélectriques solides (cônes isolants, câbles) et liquides (huiles). Ces défauts dans l'isolation ont une rigidité diélectrique différente de celle du matériau, que l'on peut modéliser grâce à un schéma électrique résistif et capacitif équivalent :

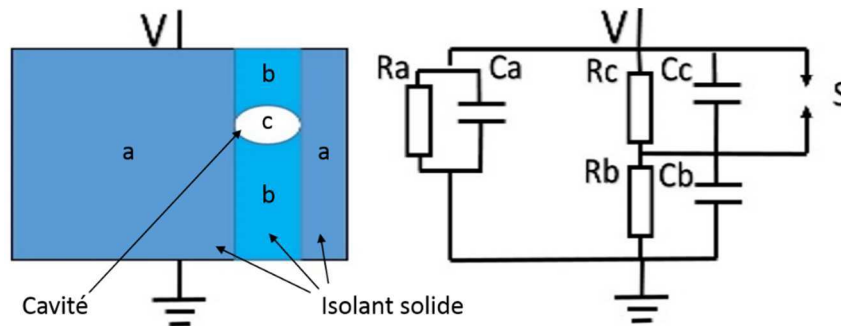


Figure 12 : Modèle équivalent « a-b-c » pour les cavités en DC [28]

Dans ce circuit (Figure 12), les impédances R_a et C_a représentent les caractéristiques du matériau, la résistance R_b et la capacité C_b représentent le matériau qui est en série avec le défaut. La cavité est représentée par sa capacité C_c ainsi que sa résistance de surface R_c . Le processus de décharge est quant à lui défini par l'éclateur S [28].

Une décharge partielle se produit chaque fois que la cavité est soumise à une tension supérieure à sa tension de claquage et qu'un électron initiateur est présent.

→ Décharges surfaciques

Les décharges de surfaces ont lieu sur l'interface entre des diélectriques solide et gazeux, lorsque la composante tangentielle du champ électrique devient importante et crée un chemin préférentiel en surface pour la relaxation des charges. Dans les PSEM, elles se produisent sur les supports isolants. Ces éléments sont donc critiques dans la conception des postes.

La tension d'apparition en DC dépend des propriétés du diélectrique solide (résistivité, présence d'additifs), de la nature et de la pression du gaz (Figure 13), ainsi que de la polarité et de l'amplitude de la tension appliquée. Bien entendu, la géométrie de l'interface solide-gaz est déterminante pour la distribution du champ électrique. En AC et en tension impulsionnelle, la répartition du champ est principalement capacitive, déterminée par la permittivité relative des isolants solides et gazeux [29].

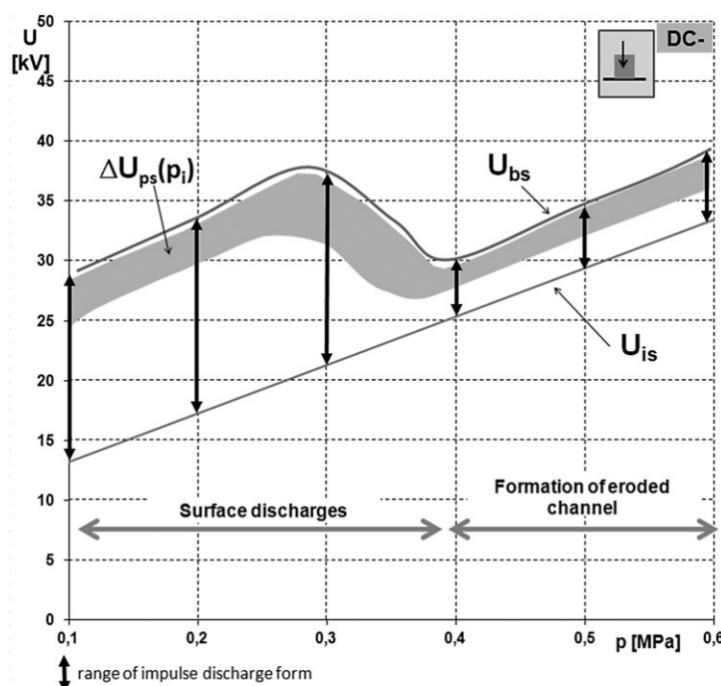


Figure 13 : Profils du seuil d'apparition des DP et de la tension d'amorçage en fonction de la pression pour une décharge surfacique dans l'air en polarité négative [19].

Les charges surfaciques générées par les décharges ont aussi une influence sur la formation des décharges ultérieures. Cette accumulation de charges cause une diminution du champ électrique là où la décharge a lieu, ce qui cause l'extinction de la décharge. Certains matériaux peuvent garder la trace des décharges : des sillons qui sont autant de canaux qui favorisent les décharges suivantes [19].

1.2. Méthodes de mesure des décharges partielles

La décharge partielle est un phénomène rapide, qui perturbe le milieu dans lequel elle se produit. Les perturbations sont de diverses natures, qui sont autant d'opportunités de détecter ou de mesurer la décharge. Il est ainsi possible de réaliser des mesures acoustiques, électriques, électromagnétiques, chimiques, ou encore visuelles.

Grâce au cadre normatif dont elle est dotée, la mesure électrique des décharges partielles est incontournable. Le premier paragraphe de cette partie la présentera en détail. Particulièrement adaptée aux PSEM, la mesure des ondes UHF sera ensuite exposée. Les autres méthodes seront ensuite sommairement évoquées. Pour finir, le thème du filtrage des données sera abordé.

1.2.1. Méthode conventionnelle – IEC 60270

La méthode conventionnelle consiste à mesurer les impulsions de courant produites par les décharges partielles. La norme IEC 60270 encadre cette technique de mesure [30].

Dans ce paragraphe, le circuit de mesure des décharges partielles est présenté. On s'attardera ensuite sur les fréquences concernées par cette mesure conventionnelle, avant d'exposer la notion de charge apparente.

1.2.1.1 Circuits de mesure

Lors d'une décharge dans un système de type PSEM il est pratiquement impossible d'avoir accès directement à l'emplacement précis où a eu lieu la décharge et de mesurer le courant produit. Les impulsions de courants sont donc mesurées par l'intermédiaire d'une capacité de couplage placée en parallèle de l'objet de test. La norme fournit des schémas pour la réalisation du circuit de mesure (Figure 14), qui comprend notamment :

- ➔ l'impédance de blocage Z_n
- ➔ la capacité C_a représentant l'objet sous test
- ➔ la capacité de couplage C_k , parfois appelée « capacité étalon »
- ➔ l'impédance de mesure Z_m
- ➔ le système d'analyse des DP (M_i).

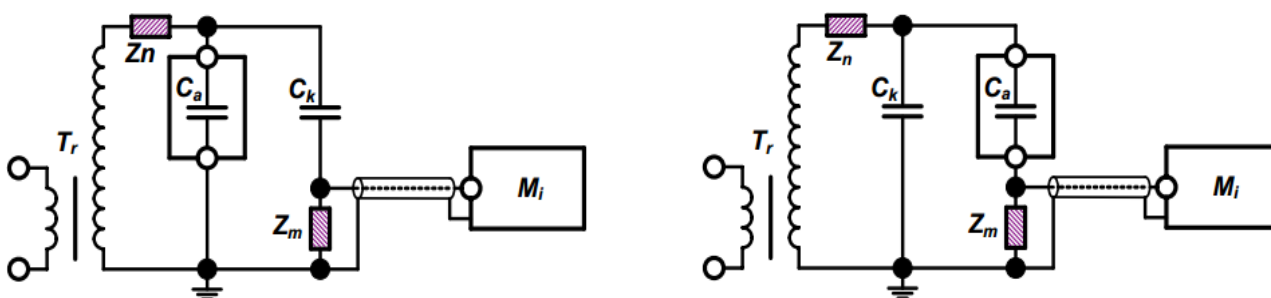


Figure 14 : Montages pour détection de décharges partielles suivant la norme IEC 60270. A gauche : impédance de mesure en parallèle avec l'objet de test ; à droite : impédance de mesure en série avec l'objet de test [31]

Le fait de choisir le montage sur lequel l'impédance de mesure est en série avec l'objet de test permet d'accroître la sensibilité de détection des décharges mais possède l'inconvénient d'être dangereux pour l'impédance de mesure si le courant de décharge est fort. Cette dernière remarque est surtout valable pour les câbles, qui ont des capacités très élevées, contrairement aux PSEM. En fait, il est souvent impossible de mettre l'impédance de mesure en série avec l'objet de test pour plusieurs raisons pratiques : mises à la terre multiples, essais sur site.

Lors de la décharge dans le poste, le courant impulsionnel qui est généré transite jusqu'au quadripôle via la capacité de couplage. Le quadripôle contient une impédance de mesure qui forme avec la capacité de couplage un filtre passe-haut de sorte que les courants de DP sont convertis en tensions équivalentes qui sont lues par l'unité d'acquisition, et analysées par la suite. En tension alternative, on peut obtenir une image de la haute tension (pour afficher les DP selon la phase) grâce à une capacité de mesure dans le quadripôle qui forme avec le condensateur de couplage un diviseur capacitif.

Ci-dessous les détails des composants du circuit de mesure :

→ Impédance de blocage Z_n :

> Cette impédance permet à la fois de filtrer les composantes hautes fréquences pouvant provenir de la source et d'empêcher les signaux de décharges partielles de circuler vers la source. Les impulsions de courant produites dans la branche de l'objet à tester circulent ainsi exclusivement dans la branche de détection.

→ Capacité de couplage C_k :

> La capacité de couplage permet aux impulsions de courant engendrées dans l'objet de test de circuler dans la branche de détection, pour passer par l'impédance de mesure.

> Afin de mesurer une charge apparente la plus proche possible de la charge qui a réellement transité lors de la décharge, il est important que la capacité de couplage soit d'une valeur élevée (500pF à 1nF) pour être plus importante que les parasites du circuit. De plus, le rapport signal à bruit, donc la précision de la mesure, est conditionné par le rapport entre la valeur de la capacité de couplage et celle de l'objet testé. A minima, on doit avoir $C_k/C_a > 0.1$, mais la norme IEC 60270 préconise $C_k/C_a \approx 10$.

> La capacité de couplage doit posséder une inductance très faible pour ne pas dégrader le signal de DP. Elle doit également être exempte de décharges partielles.

→ Impédance de mesure Z_m :

> L'impédance de mesure ou quadripôle est composée de plusieurs éléments passifs permettant de convertir le courant issu d'une décharge en une sortie en tension mesurable par l'appareil d'analyse des décharges. Cet appareil permettra d'intégrer le signal de décharge pour ensuite déterminer la charge apparente émise lors de chaque décharge. Le quadripôle de mesure est structuré autour d'un filtre passe-haut RC série. On lui adjoint une inductance en parallèle de la résistance pour couper aussi les hautes fréquences (Figure 15). Les quadripôles de mesure pour les systèmes DC possèdent en outre une résistance de forte valeur en parallèle de la capacité.

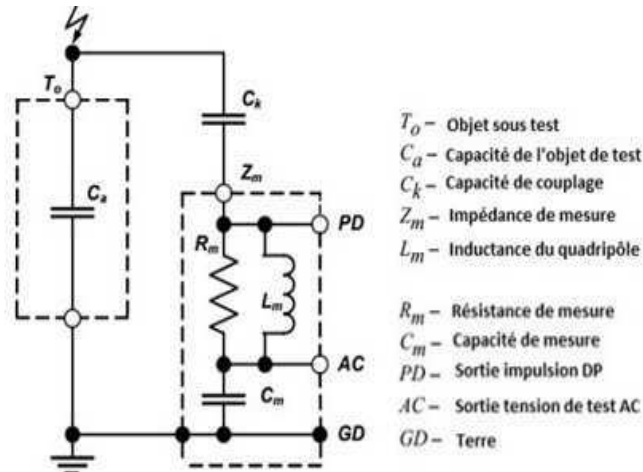


Figure 15 : Représentation du quadripôle de mesure [31]

1.2.1.2 Bande de fréquence

L'impédance de mesure possède une certaine bande passante. Dans le cadre de la mesure de DP dite « à large bande », la norme IEC 60270 [30] recommande de fixer les fréquences limites inférieures et supérieures f_1 et f_2 de cette bande passante de la façon suivante :

$$30 \text{ kHz} \leq f_1 \leq 100 \text{ kHz} \quad (7)$$

$$f_2 \leq 1 \text{ MHz} \quad (8)$$

tout en veillant à ce que la largeur de bande Δf reste comprise entre 100 kHz et 900 kHz :

$$100 \text{ kHz} \leq \Delta f \leq 900 \text{ kHz} \quad (9)$$

Cette mesure « large bande » est la plus couramment utilisée.

Dans le cas d'environnements bruités, il est également possible de réaliser une mesure de DP « à bande étroite », où la largeur de bande Δf est comprise entre 9 kHz et 30 kHz. Restreindre la bande de fréquence de mesure possède l'avantage d'éliminer un grand nombre de perturbations, mais cela comporte aussi des inconvénients :

- ➔ Cela réduit la résolution temporelle, qui est inversement proportionnelle à la largeur de bande. La détection de décharges successives en pâtit.
- ➔ La détection de la polarité nécessite aussi une bonne résolution fréquentielle. En effet, plus le signal ressemble à une sinusoïde, plus il est difficile de reconnaître si une impulsion est positive ou négative.
- ➔ La réponse fréquentielle de l'objet de test est bien souvent inégale en fonction des fréquences scrutées. Une détection faible bande court le risque de tomber sur une fréquence déjà complètement atténuée. Le choix de la fréquence centrale est donc primordial.

1.2.1.3 Charge apparente

La déformation de l'impulsion de courant tout au long de la chaîne de mesure produit des observations beaucoup moins nettes que les profils d'impulsions théoriques bi-exponentielles. La forme d'onde est en effet impactée par de nombreux paramètres allant de la position du capteur de courant à la longueur des câbles en passant par les autres capacités parasites du montage, sans compter que la bande de fréquence des appareils de mesure n'est jamais infinie. L'appauvrissement du spectre conduit notamment à l'observation d'impulsions de courant amorties, qui oscillent en s'atténuant.

Aucune comparaison ne saurait donc être faite entre les impulsions de courant, et c'est pourquoi la valeur restituée est l'intégrale du courant par rapport au temps. En effet, moyennant une calibration du système, la valeur de cette intégrale reste constante d'un circuit de mesure à l'autre. On parle de charge apparente, parfois notée q_{IEC} :

$$q_{IEC} = \int i(t)dt \quad (10)$$

La charge apparente est souvent exprimée en pico-coulomb ($1 \text{ pC} = 10^{-12} \text{ C}$) ou en nC ($1 \text{ nC} = 10^{-9} \text{ C}$).

1.2.2. Mesure UHF des décharges partielles

La méthode UHF de mesure des décharges partielles consiste à mesurer les ondes électromagnétiques émises lors d'une décharge partielle dans l'enceinte du PSEM. Lors de la décharge, le front de montée de l'impulsion étant très rapide (quelques picosecondes), elle peut être captée dans une bande de fréquences pouvant aller jusqu'à quelques gigahertz [32]. La bande de mesure UHF est habituellement définie par :

$$300 \text{ MHz} \leq f \leq 3 \text{ GHz} \quad (11)$$

Ce paragraphe commencera par quelques considérations physiques sur les ondes électromagnétiques dans les PSEM. Les principes et les caractéristiques de la mesure UHF seront ensuite exposés. Enfin, le potentiel pour l'identification des défauts sera évoqué.

1.2.2.1 Ondes électromagnétiques dans les PSEM

L'apparition d'une décharge partielle dans un PSEM est caractérisée par une impulsion possédant un temps de montée se mesurant en picosecondes et une durée de l'ordre de la nanoseconde, si bien que le spectre fréquentiel de ces décharges se situe dans la bande ultra-haute fréquence [32] et peut même atteindre 20 GHz [33].

Les ondes UHF émises lors d'une décharge se déplacent aisément dans le poste car sa structure forme un système coaxial qui agit comme un guide d'ondes pour les hautes fréquences [34][35]. Il y a ainsi peu de pertes d'ondes à l'intérieur du poste, contrairement au cas du transformateur où l'on retrouve une conception interne beaucoup plus complexe favorisant les mécanismes de réflexions. L'onde électromagnétique est toutefois atténuée à

chaque fois que le poste présente une discontinuité : hublot, cône isolateur (Figure 16), jonction en L ou en T, etc.

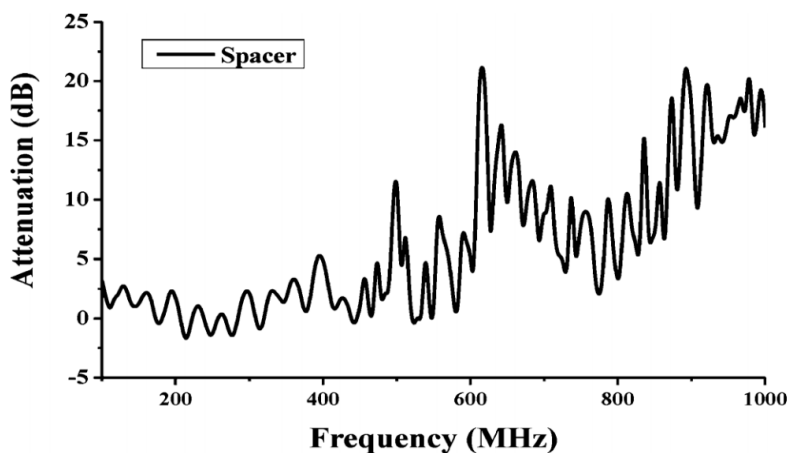


Figure 16 : Atténuation d'une onde électromagnétique causée par la propagation à travers un cône isolateur entre 100 MHz et 1 GHz [36]

En basse fréquence, le mode de propagation principal est le mode transverse électromagnétique (TEM), où les composantes magnétique et électrique de l'onde sont transverses à la direction de propagation de celle-ci. Les ondes TEM ne peuvent se propager que si le conducteur central (barre conductrice) et le conducteur extérieur (virole) sont présents [35]. Pour les plus hautes fréquences, apparaissent les modes transverse électrique (TE) et transverse magnétique (TM) (Figure 17). Le mode TE (respectivement TM) est le mode pour lequel le champ électrique (respectivement magnétique) seul est orthogonal à la direction de propagation. La Figure 17 illustre ce phénomène pour différentes dimensions de PSEM. On voit que lorsque les dimensions sont plus grandes (c'est-à-dire quand la tension nominale du PSEM est plus élevée), les fréquences de coupure des modes TE et TM sont plus basses.

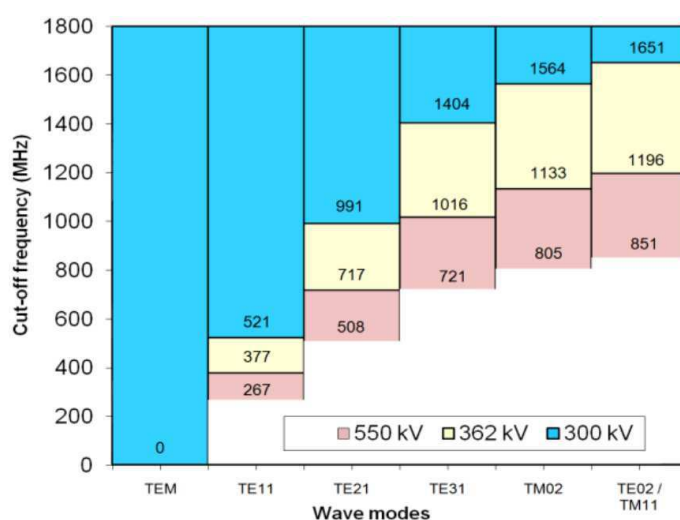


Figure 17 : Fréquence de coupure pour différents modes de propagation dans des PSEM de différentes tensions nominales [34]

On note également que dans le repère cylindrique (r, θ) du poste, la répartition du champ électrique n'est uniforme en θ que pour le mode TEM. Dans les autres modes TE, le champ

électrique adopte une distribution plus complexe, comme on peut le voir sur la Figure 18. En conséquence, la position du capteur UHF peut avoir une forte influence sur les amplitudes mesurées.

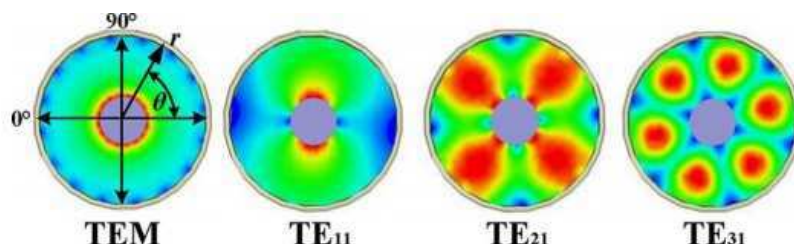


Figure 18 : Répartition du champ électrique pour différents modes TE [36]

1.2.2.2 Mesure UHF dans les PSEM

Un système de détection de type UHF est avant tout composé d'un ou plusieurs capteurs installés à l'intérieur ou à l'extérieur du poste blindé. Ces capteurs sont de simples antennes dont la sortie typique est une impulsion haute-fréquence. Un préamplificateur est parfois nécessaire pour améliorer la sensibilité avant d'entrer dans un système d'analyse permettant d'enregistrer et de traiter les données.

Le recours à la méthode UHF permet d'obtenir une certaine immunité aux bruits pouvant perturber les mesures. En effet, étant donné que la bande de mesure commence à 300 MHz, on limite les perturbations issues des fréquences inférieures, notamment les corona dans l'air dont le spectre est principalement compris dans le voisinage de 100 MHz. La mesure des ondes UHF est donc particulièrement adaptée à la détection des défauts dans le SF₆.

La mesure UHF des DP ne permet pas d'obtenir directement la charge apparente en pico-Coulomb. D'ailleurs le mot « calibration » ne revêt pas le même sens dans le contexte UHF que pour la mesure conventionnelle des DP (§1.2.1.3). Ici, il s'agit plutôt d'une procédure de vérification de la sensibilité du système. Cette procédure est détaillée dans les recommandations de la CIGRÉ [37].

De manière générale, il est difficile d'établir une corrélation directe entre les mesures réalisées en méthode conventionnelle et non-conventionnelle, tant les résultats de cette dernière sont sensibles à la géométrie des équipements [34]. Il n'y a pas en effet de relation claire entre la puissance émise par la décharge et la puissance reçue par l'antenne [38]. La relation entre la charge apparente (en pC) et l'information mesurée dans le domaine UHF (en mV) dépend notamment :

- ➔ Du type de défaut.
- ➔ De la géométrie des équipements.
- ➔ De la position angulaire de la décharge par rapport à celle du capteur dans la structure coaxiale.
- ➔ De la réponse fréquentielle du capteur UHF.

S. Blufpand a mené une étude détaillée [18] qui lui a permis d'identifier des coefficients de régression permettant d'établir une relation linéaire entre les tensions crête à crête des ondes engendrées par les décharges et leur charge apparente. Toutefois, les coefficients obtenus sont différents pour tous les types de défauts et selon les bandes de fréquences. Finalement, ils ne sont guère généralisables, d'autant qu'ils ne sont pas applicables à d'autres dispositifs expérimentaux.

1.2.2.3 Potentiel pour l'identification des défauts

L'identification des défauts grâce à la méthode UHF est déjà une pratique éprouvée en courant alternatif [32], [35], [39]–[41]. La méthodologie la plus classique est la suivante :

- 1- On choisit une bande de fréquence de détection contenue dans le spectre émis par les défauts que l'on cherche à détecter et transmis dans le poste que l'on surveille. S'il n'existe pas de fréquence commune aux spectres de tous les types de défauts que l'on veut détecter, il faut en choisir plusieurs et réaliser plusieurs mesures en parallèle. Cette étape est détaillée par la CIGRÉ dans sa brochure technique sur les mesures non-conventionnelles de DP [32].
- 2- On détecte des impulsions et on extrait pour chacune d'elles deux informations : l'amplitude (en Volt) et la phase de la tension AC à l'instant de la détection.
- 3- On intègre l'ensemble des impulsions enregistrées à un diagramme de phase comparable à celui qu'on utilise pour identifier les défauts avec la méthode conventionnelle (§1.3.1.1). La charge apparente en pC est simplement remplacée par une amplitude en Volt.
- 4- La forme des nuages de points obtenus est interprétée de la même manière que pour la méthode conventionnelle.

Les données spectrales peuvent également être exploitées en vue de l'identification des défauts. Elles sont présentées au §1.3.1.4.

Il est à noter que la mesure des ondes UHF est dépendante des conditions de détection, et particulièrement de la géométrie des équipements. L'intensité et même la fréquence des rayonnements transmis peuvent être radicalement différentes d'un poste à l'autre, ou d'une position du capteur à l'autre.

1.2.3. Mesure de la lumière émise par les DP

Pour peu qu'elles se produisent dans un milieu transparent, les décharges partielles émettent de la lumière qui peut être détectée. Dans un environnement sombre, les décharges les plus importantes peuvent être observées à l'œil nu. Des dispositifs photo ou vidéo peuvent également être utilisés dès 1 pC. Enfin, pour détecter des décharges de très faible intensité (0,05 pC), un photomultiplicateur peut être nécessaire [42].

Lors des premières études sur les décharges corona, les chercheurs affectionnaient particulièrement les techniques photographiques qui leur permettaient d'observer le développement d'une décharge sur toute la distance inter-électrodes [2], [21], [24], [43], [44]. Les dispositifs à photomultiplicateur ont également été utilisés pour enregistrer des profils d'impulsions de DP [20], [45]–[47].

De manière générale, il est couramment admis dans la littérature que la présence d'un rayonnement lumineux prouve la présence de décharges partielles.

Les principaux avantages des mesures optiques sont leur bonne sensibilité quand le milieu est très sombre, et leur insensibilité aux perturbations électriques. En revanche, ces mesures ne permettent pas de connaître la charge apparente des DP.

1.2.4. Autres méthode de détection des DP

Dans son annexe F, la norme IEC 60270 [8] évoque d'autres manières de détecter une activité de décharges partielles, notamment la détection acoustique et l'analyse chimique des produits de décomposition résultant de l'action des DP sur les matériaux de l'équipement surveillé. Il existe aussi des méthodes de détection des DP fondées sur l'observation de la pression du gaz ou de la chaleur [42].

Le principal inconvénient de ces méthodes est leur incapacité à fournir une information sur l'intensité des décharges partielles. Les grandeurs mesurées sont en effet des conséquences des DP sur l'environnement ; elles dépendent donc d'un grand nombre de facteurs extrinsèques au phénomène de DP et ne se prêtent pas à une calibration.

Cela n'empêche pas d'utiliser ces méthodes pour détecter des décharges partielles. L'analyse des produits de décomposition des huiles est d'ailleurs un indicateur très utilisé pour le monitoring des transformateurs [48].

1.2.5. Amélioration du rapport signal/bruit (*pre-processing*)

L'analyse des signaux de décharges partielles est souvent difficile car on cherche à détecter des faibles amplitudes qui sont facilement noyées dans diverses sources d'interférences électromagnétiques, parmi lesquelles [38]:

- ➔ Les systèmes de communication (radio FM, *Digital Audio Broadcasting* (DAB), TV numérique, téléphonie mobile (GSM), Wi-Fi) qui produisent une perturbation sinusoïdale et régulière (Figure 19).
- ➔ Un bruit aléatoire, produit par des phénomènes comme les effets couronne dans l'air ou les amorçages.
- ➔ Le bruit de commutation de l'électronique de puissance, principalement dans les alimentations régulées.

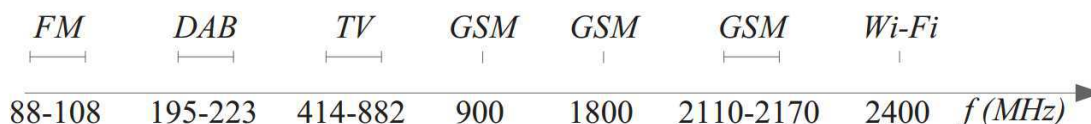


Figure 19 : Bandes de fréquence des différentes ondes électromagnétiques ambiantes [38]

La première étape de l'analyse est donc souvent un filtrage dont les objectifs sont :

- Un haut rapport signal/bruit
- Une faible réduction d'amplitude
- Une faible distorsion des impulsions

Les méthodes de filtrage sont nombreuses et variées. Nous en récapitulons ici quelques-unes, parmi les plus populaires dans la communauté de l'analyse des décharges partielles.

1.2.5.1 Transformation de Fourier

La transformation permet d'éliminer un bruit contenu dans une bande de fréquence étroite, comme les émissions radio FM [49]. Cet outil bien connu est encore performant même si l'amplitude du bruit est grande par rapport à celle des signaux de décharges partielles.

En revanche, si le bruit est réparti sur une large bande, le procédé est inefficace, et il faudra se tourner vers d'autres méthodes, comme celles qui sont présentées dans les paragraphes suivants.

La transformation de Fourier comporte aussi plusieurs inconvénients liés à l'échantillonnage des données et à l'emploi d'algorithmes discrétisés : repliement (et pseudo-repliement), effet de palissade, fuites, etc. [50]

1.2.5.2 Transformation en ondelettes

Alors que les techniques classiques d'analyse du signal opèrent dans le domaine fréquentiel (transformation de Fourier) ou temporel, la transformée en ondelettes permet la décomposition d'un signal en composantes représentatives des deux domaines à la fois. Cette transformation permet en effet d'obtenir à partir d'un signal temporel un tableau de coefficients à deux dimensions, chacune étant représentative d'un des deux domaines. Cela est nécessaire car les techniques classiques peinent à rendre compte des phénomènes non-périodiques et à régime transitoire rapide que contiennent les signaux de décharges partielles.

Pour continuer la comparaison avec l'analyse de Fourier, là où la fonction de base était la sinusoïde $\sin(t)$, la transformation en ondelettes emploie une ondelette $\Psi(t)$, fonction localisée temporellement et en fréquence. Là où l'analyse de Fourier balayait les fréquences grâce à des fonctions de base de la forme $\sin(f \cdot t)$, les ondelettes prennent en compte à la fois la fréquence par dilatation ou compression de l'ondelette de base : $\Psi(t/a)$ et la localisation temporelle par translation dans le temps de l'ondelette de base : $\Psi(t - b)$. La transformée en ondelettes $F(a, b)$ d'une fonction f est définie par l'équation (12) :

$$F(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (12)$$

On réalise le filtrage en suivant les étapes suivantes [51], [52] :

- On choisit une ondelette « mère » $\Psi(t)$ dont seront extraites toutes les autres $\Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$.
- On applique la transformée en ondelettes pour obtenir les coefficients du signal bruité, dans la région concernée par les décharges.
- On choisit des seuils en-deçà desquels on supprime le bruit.
- On applique la transformée en ondelettes inverses sur les coefficients restants.

Comme il s'agit de conserver les signaux de DP, La séparation sera d'autant plus efficace que l'ondelette mère permettra de décrire les impulsions de DP avec des coefficients les plus élevés possible, c'est-à-dire un nombre de coefficients significatifs le plus petit possible. On recherchera donc une ondelette mère qui maximise la valeur des coefficients situés au-dessus du niveau de bruit [53]. Si le problème du choix de l'ondelette de base a toujours été évoqué et empiriquement résolu, ce n'est que récemment que certains auteurs ont pu avancer une vraie méthode de sélection :

- X. Ma cherche à maximiser la corrélation entre l'ondelette et une impulsion de DP [54]. Plus simple et plus ancienne que ses concurrentes, cette méthode est aussi moins rapide en calcul.
- J. Li maximise l'énergie des premiers produits de la décomposition en ondelettes [55].
- C. Cunha maximise le rapport signal/bruit obtenu par la décomposition [52].

Il est également possible d'utiliser simultanément plusieurs ondelettes de base en fonction des échelles utilisées [52][55]. C'est ainsi que dans son article [56], T. Lin propose d'utiliser pour ondelette mère l'ondelette bi-orthogonale de paramètres (2,4) pour les plus hautes fréquences, et l'ondelette de Daubechies d'ordre 4 pour les plus basses fréquences (Figure 20).



Figure 20 : (a) Ondelette biorthogonale d'ordre 4 (b) Ondelette de Daubechies de paramètres (2,4)

Dans la plupart des cas, on préfère utiliser la transformée en ondelettes discrète (DWT) que la transformée continue (CWT) car cette dernière est plus difficile à calculer et génère beaucoup de données non-pertinentes [57].

1.2.5.3 Analyse en composantes indépendantes (ICA)

L'analyse en composantes indépendantes (ICA) est capable de proposer pour un ensemble de N observations $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)^T$ une décomposition $x = A \cdot y$ où les M composantes de $y = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$ sont statistiquement indépendantes. A est une matrice de mélange de dimension $M \times N$.

La distribution des points des signaux de décharges partielles étant très différente de celle d'un bruit (exemple avec un bruit blanc en Figure 21), on peut facilement admettre que ces deux composantes du signal mesuré sont bien statistiquement indépendantes. On a donc de bonnes chances de les séparer effectivement grâce à l'ICA [58].

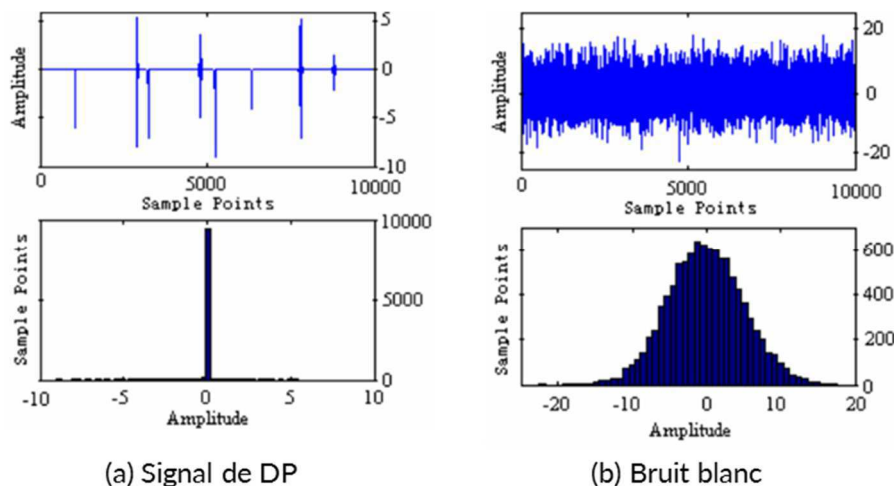


Figure 21 : Signal temporel et distribution des amplitudes (a) Pour un signal de DP ; (b) Pour un bruit blanc [58].

1.3. Reconnaissance des défauts

Les différents types de défaut dans un PSEM n'ont pas la même gravité et n'évoluent pas de la même manière. Il est donc important pour l'utilisateur de pouvoir connaître le type de défaut qui génère des DP pour pouvoir réagir de manière adéquate.

Or, le PSEM est un environnement fermé, et il est impossible de constater la nature du défaut par une simple observation visuelle. L'information sur la nature du défaut doit donc être recherchée dans les données de décharges partielles qu'il a engendrées.

Dans cette partie, on s'attarde d'abord sur les différents indicateurs capables d'apporter des informations sur la nature des défauts qui génèrent des DP. Dans un deuxième temps, les techniques qui permettent de rendre automatique l'identification des défauts sont présentées.

1.3.1. Extraction d'une signature

Pour pouvoir identifier la nature d'un défaut à partir de l'enregistrement des décharges partielles, il faut extraire de l'enregistrement de DP une donnée synthétique qui soit caractéristique des défauts. Dans ce paragraphe, les plus classiques de ces indicateurs sont exposés.

1.3.1.1 En AC : le diagramme de phase (*Phase-resolved PD pattern, PRPD*)

D'un usage extrêmement répandu pour tous les appareils à courant alternatif, le diagramme de phase est obtenu en représentant toutes les décharges selon deux coordonnées : la phase de l'onde de tension au moment de leur occurrence, et leur charge apparente. La charge apparente peut être remplacée par l'amplitude des décharges obtenue avec une autre méthode de mesure, notamment la mesure UHF [59]–[61].

Le diagramme de phase est aussi connu sous le nom de « *Point On Wave* » (POW).

Ce diagramme présente des formes caractéristiques qu'un œil expert peut rattacher à un type de défaut. La Figure 22 montre un exemple d'un tel diagramme obtenu en présence d'un défaut de type pointe.

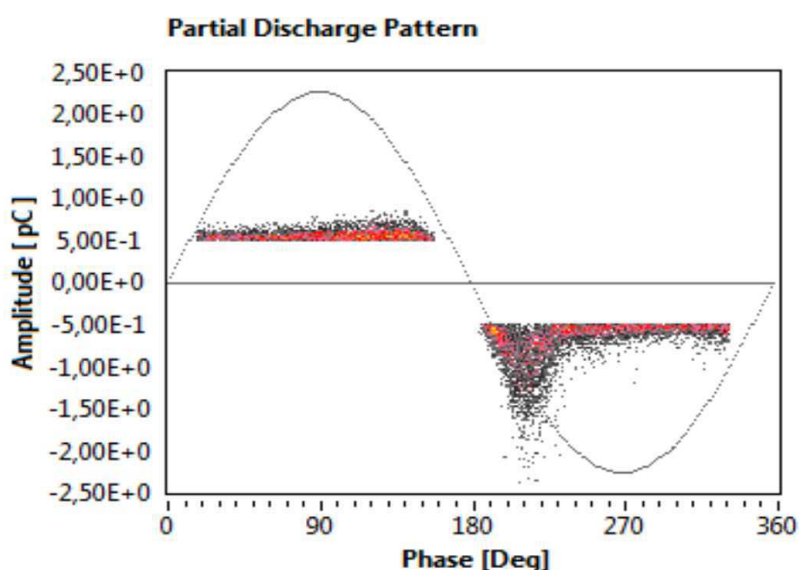


Figure 22 : Diagramme de phase pour un défaut de type pointe (dans du SF₆) [62]

On trouve aussi couramment une représentation tridimensionnelle de la densité des décharges en fonction de la phase et de leur amplitude : $H_n(\varphi, q)$, comme sur la Figure 23.

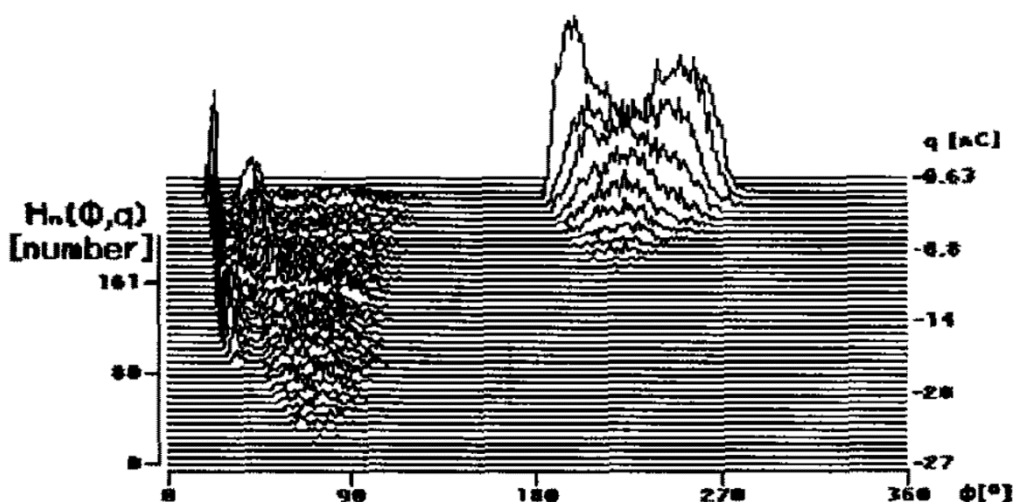


Figure 23 : $H_n(\varphi, q)$ pour une décharge de surface dans l'air [63]

De nombreux dérivés du diagramme de phase peuvent être construits en faisant intervenir les valeurs moyennes, maximales ou encore les distributions de toutes les grandeurs impliquées [63].

Dans le cadre d'une reconnaissance automatique de défaut, les diagrammes de phase peuvent être assimilés à des images et soumis à des algorithmes de reconnaissance. Il est toutefois possible de décrire de manière synthétique les diagrammes de phase ou les distributions des amplitudes des DP grâce à un nombre réduit de paramètres. Ces paramètres sont présentés dans la suite de ce paragraphe. Leur calcul permet l'implémentation d'algorithmes de complexité plus raisonnable.

→ Maxima

Les valeurs maximales que prend une distribution donnent une première information sur la distribution.

→ Moments

Les moments sont les paramètres les plus classiques pour caractériser une distribution. Les premiers moments (moyenne, variance) sont bien connus, mais nombreux sont les auteurs qui utilisent aussi les moments d'ordre 3 et 4 : l'asymétrie (en anglais : *skewness*) et l'aplatissement, ou *kurtosis* [64]–[69]. Ces deux indicateurs, et particulièrement leur signe donnent une indication sur la forme des distributions par rapport à une gaussienne (Figure 24).

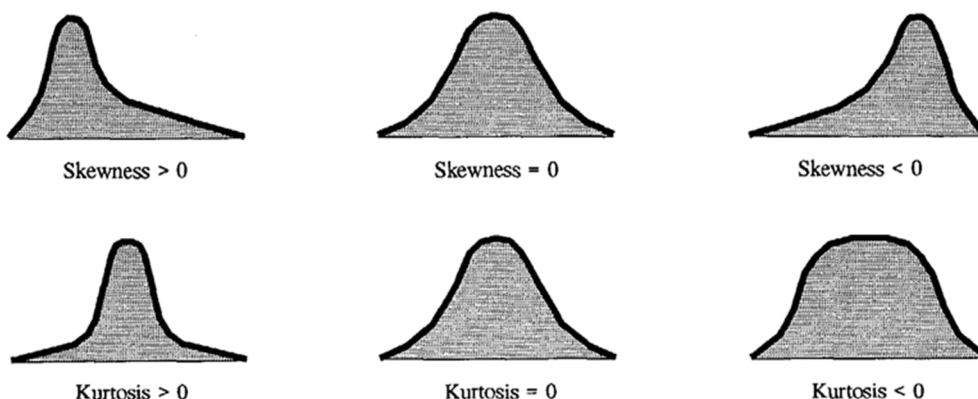


Figure 24 : Différentes formes de distributions et leur moments d'ordre 3 (skewness) et 4 (kurtosis) [5]

Ces mêmes auteurs utilisent fréquemment aussi le coefficient de corrélation croisée (*cross-correlation* ; CC).

→ Loi de Weibull

Dans la référence [70] et dans ses précédents travaux, A. Contin analyse l'adéquation de la distribution de l'amplitude des décharges partielles avec une loi de Weibull à 2 ou 5 paramètres.

La loi de Weibull de paramètres $\alpha > 0$ et $\beta > 0$ a pour densité de probabilité :

$$f(q) = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (13)$$

Et pour fonction de répartition :

$$F(q) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{q}{\alpha}\right)^{\beta}\right] \quad (14)$$

Le paramètre α est un paramètre d'échelle, mais c'est surtout le paramètre β , un paramètre de forme qui est le plus employé pour la classification.

→ Paramètres fractals

Certains auteurs utilisent des techniques connues dans le domaine de l'analyse d'images. Parmi elles, on trouve l'utilisation des paramètres fractals comme la dimension fractale. Ce terme générique a en fait de multiples définitions. Toutes cherchent à exprimer la manière dont un signal remplit l'espace, et en particulier son comportement face à un changement d'échelle. On utilise aussi la lacunarité, qui décrit l'homogénéité des distributions, c'est à dire la texture [71].

Le caractère aléatoire et la forte intermittence des signaux de décharges partielles rend prometteuse l'utilisation d'outils d'analyse fractale. C'est ainsi que plusieurs auteurs mettent en évidence la possibilité de discriminer les types de défauts grâce au calcul de la dimension fractale et de la lacunarité des diagrammes tridimensionnels $H_n(\varphi, q)$ [72], [73].

→ Opérations morphologiques

Les diagrammes de phase peuvent être traités de manière à les simplifier grâce à des opérations morphologiques. Ces techniques sont habituellement utilisées pour le traitement d'image. La dilatation morphologique équivaut à tracer tous les points parcourus par le centre d'un disque que l'on roulerait au-dessus de la courbe. L'érosion morphologique quant à elle, consisterait à déterminer les points parcourus par le centre d'un disque qui roulerait en dessous de la courbe. Dans sa publication [59], Hamilton applique différentes combinaisons de ces deux opérations, ce qui conduit à une courbe lissée (Figure 25).

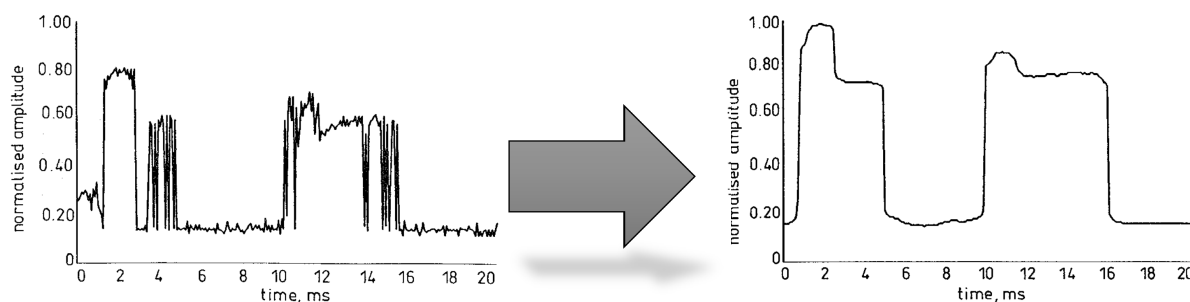


Figure 25 : Courbe POW avant et après opérations morphologiques [59]

Le grand défaut du diagramme de phase est d'être spécifique aux mesures AC. En effet, l'information de phase n'existe pas lors des mesures de DP en courant continu ou impulsionnel.

1.3.1.2 En DC : analyse temporelle des décharges partielles

L'analyse selon la phase est l'outil le plus populaire pour l'analyse des décharges partielles en AC, mais cette représentation ne peut pas être calculée en DC. Il est donc nécessaire de mettre au point des indicateurs adaptés aux situations en DC.

Pour cela, une stratégie courante consiste à remplacer la phase de la tension par une information temporelle issue de l'analyse temporelle des décharges partielles. L'analyse temporelle des DP a été introduite par l'équipe de Van Brunt [74], [75] et rendu populaire dans les années suivantes grâce aux travaux de Fromm et Galski [28] sur les décharges partielles dans des cavités de l'isolation solide en DC.

→ Le modèle de *time lag/recovery*

Le modèle de *time lag/recovery* a tout d'abord été défini dans les cavités [28] avant d'être étendu aux décharges corona et aux décharges en surface [5], [64]. Sa teneur peut être résumée de la façon suivante : pour qu'une décharge partielle se produise, il faut que le champ électrique dépasse un certain seuil E_{min} et qu'un électron initiateur soit présent.

L'attente de cet électron introduit un délai t_L (time lag) entre le moment où le champ électrique atteint E_{min} et l'apparition de la décharge. La décharge qui a lieu entraîne la création d'une charge d'espace, dont la nature diffère en fonction du type de décharge. Cette charge d'espace a invariablement pour effet la diminution du champ électrique au voisinage du défaut, jusqu'à une valeur inférieure à E_{min} . La charge d'espace est ensuite évacuée, ce qui permet au champ électrique de croître. Au bout d'un certain temps t_R (recovery time), le champ électrique atteint à nouveau E_{min} . Ces grandeurs sont représentées en Figure 26.

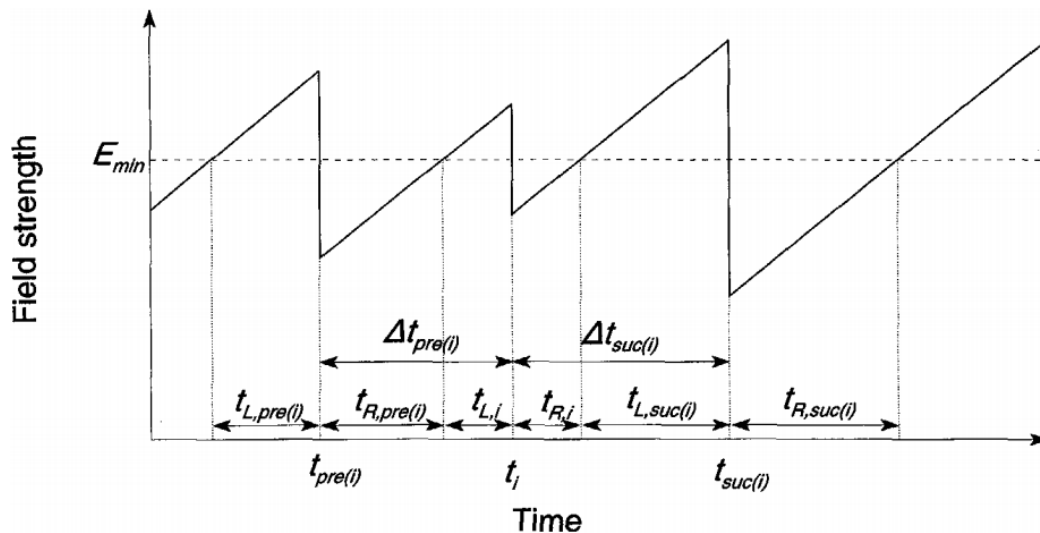


Figure 26 : Evolution du champ électrique à l'emplacement du défaut pour des décharges successives, et définition de grandeurs temporelles caractéristiques [5]

Lors des mesures de DP les seules grandeurs accessibles sont les instants des décharges, qui permettent de calculer les intervalles de temps entre les décharges. Or ces valeurs sont corrélées avec les grandeurs t_L et t_R qui en sont des composantes. Ce lien est visible sur la Figure 26, où sont définis Δt_{pre} et Δt_{suc} qui désignent respectivement l'intervalle de temps qui sépare la décharge considérée de la décharge précédente, et celui qui sépare la décharge de la décharge suivante.

→ Indicateurs fondés sur ce modèle

On peut caractériser les décharges partielles en surveillant la distribution des amplitudes des décharges ou du couple $(q, \Delta t_{suc})$, mais aussi $\Delta t_{pre} = f(q)$, $\Delta t_{suc} = f(q)$ ou encore $\overline{q_{suc}} = f(q)$. En fait, toutes les représentations en fonction de la phase utilisées en AC (§1.3.1.1) peuvent être remplacées par des représentations en fonction de Δt_{suc} ou de Δt_{pre} [67], [72], [76], [77]. Dans [68], P. Morshuis propose encore l'analyse de la plus grande amplitude ou de l'amplitude moyenne des décharges en fonction de Δt_{suc} ou de Δt_{pre} , ou la distribution de Δt . On peut même utiliser un diagramme tridimensionnel $H_n(q, \Delta t)$ qui décrit la relation entre le nombre, l'amplitude et l'intervalle entre les décharges (Figure 27).

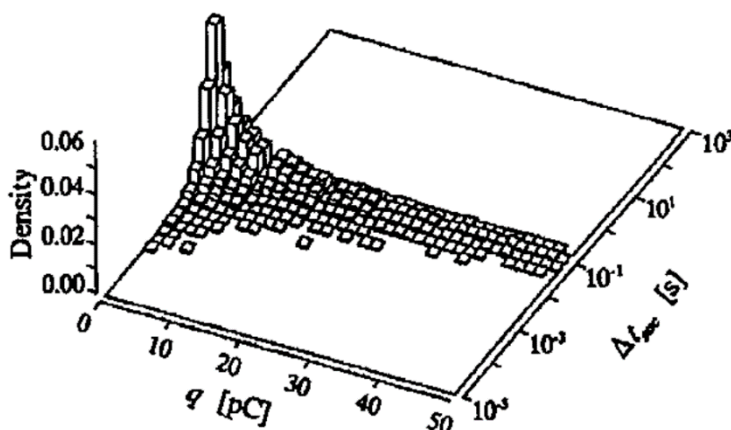


Figure 27 : $H(q, \Delta t)$ pour une décharge interne [77]

Plus récemment les différences de charge apparente entre les décharges successives ont également été utilisées pour la construction de signatures appelées « NoDi* patterns » [78].

1.3.1.3 Défauts multiples

Si les résultats caractéristiques présentés aux paragraphes 1.3.1.1 et 1.3.1.2 permettent à l'œil de l'expert ou à une machine de pronostiquer le type de défaut présent, la présence simultanée de plusieurs défauts peut conduire à des observations moins canoniques. Ces comportements peuvent même se produire avec un unique défaut de grande dimension. En présence de plusieurs défauts, on mesure la superposition des mesures de chacun des défauts présents. Il est difficile de les séparer s'il n'y a pas de défaut dominant.

La stratégie la plus répandue est une séparation des sources de décharges partielles en amont de leur reconnaissance, au même moment que le dé-bruitage par exemple (voir le §1.2.5). En fait, la plupart des méthodes de dé-bruitage peuvent aussi bien être utilisées pour séparer les signaux provenant de différentes de DP. Dans la littérature, on retrouve pour cette application divers algorithmes de séparation aveugle de sources [79], [80], notamment l'analyse en composantes principales [81].

Une autre stratégie consiste à identifier le défaut d'origine impulsion par impulsion. C'est l'objet du paragraphe suivant (§1.3.1.4).

1.3.1.4 Signatures polyvalentes : analyse individuelle de chaque impulsion

D'autres signatures possèdent l'avantage de n'être pas spécifiquement liées à un contexte AC ou DC. Il s'agit de celles qui s'intéressent aux impulsions individuellement, notamment par l'analyse temporelle ou spectrale du signal de DP.

Ces signatures sont adaptables à toute méthode de mesure qui enregistre un signal haute fréquence de DP, notamment la méthode UHF. De plus, elles sont adaptées à la détection de défauts multiples.

→ Forme des impulsions

Il est possible de scruter la forme des impulsions de décharges partielles en AC comme en DC, en méthode conventionnelle et non-conventionnelle [39], [82], [83], et d'en extraire en plus de l'amplitude des paramètres tels que le temps de montée ou de descente [84]. Dans ses travaux de thèse [15], Morshuis va jusqu'à employer les distributions de la largeur des impulsions H_{rw} et du temps de montée H_{tr} .

L'utilisation de fonctions issues du signal même de l'impulsion de courant de décharge partielle n'a été proposée que récemment. Dans [85] par exemple, les auteurs extraient l'énergie cumulée (*Cumulative Energy, CE*) des signaux dans le domaine temporel et dans le domaine fréquentiel, puis le gradient morphologique mathématique (*Mathematical Morphological Gradient, MMG*) de ces grandeurs.

→ Spectre

Une caractéristique évidente d'un signal est le spectre, pris sur toute la largeur de bande mesurée. Plusieurs auteurs [41], [60] ont pu montrer que les différents défauts produisaient des spectres distincts dans la bande UHF.

Une méthode similaire est proposée par la société *Omicron electronics GmbH* qui emploie trois filtres numériques de fréquences centrales différentes. Les amplitudes d'une décharge dans les trois bandes de fréquences définissent les coordonnées de celle-ci dans une représentation tridimensionnelle. Les décharges ainsi ordonnées peuvent faire apparaître des clusters, dont chacun regroupe les décharges engendrées par un défaut. Le nombre de bandes de fréquence a été fixé à trois pour permettre une visualisation, mais on peut très bien imaginer choisir un nombre de bandes différent et utiliser des méthodes d'apprentissage non-supervisées pour séparer les classes. Notons que cette approche n'est ni plus ni moins qu'une méthode de réduction de la dimension du spectre de chaque décharge.

Dans sa thèse [18], S. Blufpand propose plusieurs caractéristiques intéressantes des spectres UHF obtenus lors des mesures de DP. La signature la plus discriminante est le relevé de la fréquence moyenne détectée en fonction la charge apparente ou en fonction de l'énergie spectrale (Figure 28). Cette relation peut être mise à profit pour la discrimination de défauts multiples.

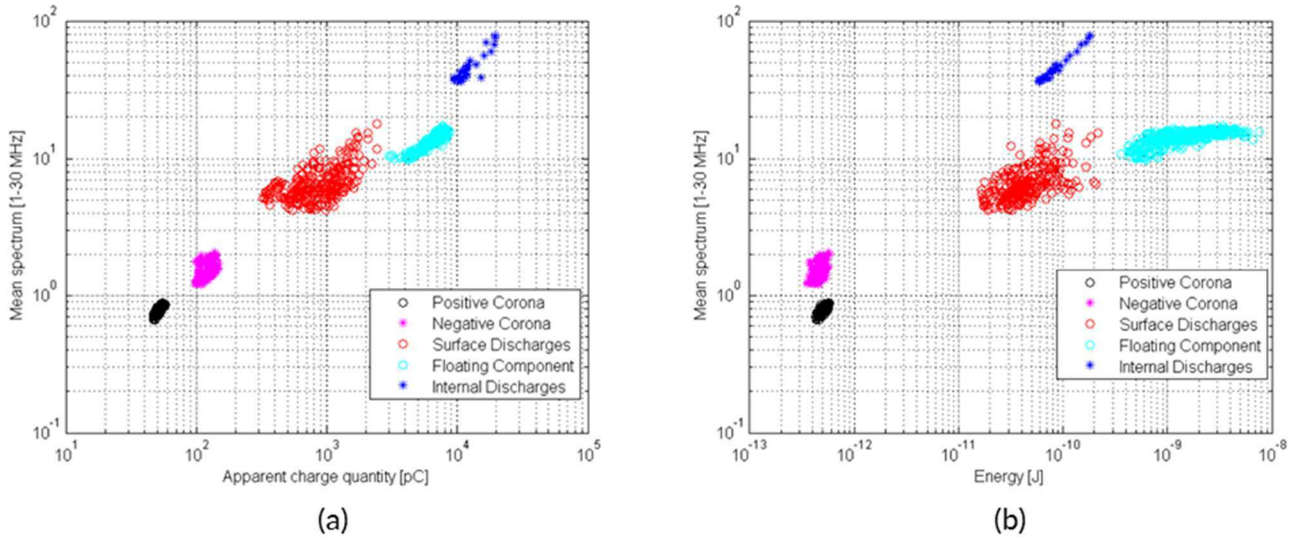


Figure 28 : Maximum de fréquence sur la bande 1-30 MHz en fonction a) de la charge apparente ; b) de l'énergie spectrale, pour différents types de défauts [18]

→ Energie spectrale

Plus que le maximum de l'amplitude de l'onde électromagnétique, l'énergie qu'elle transporte est représentative de la charge apparente de la décharge qui l'engendre. Pour un signal dont la tension V est échantillonnée tous les Δt , on la calcule de la manière suivante (R est l'impédance d'entrée du système de mesure) [18] :

$$E = \frac{\Delta t}{R} \sum_i V_i \quad (15)$$

On calcule le rapport de puissance (PR) d'un signal $s(t)$ sur une bande de fréquence $[f_1, f_2]$ de la manière suivante :

→ On normalise le signal :

$$\tilde{s}(t) = \frac{s(t)}{\sqrt{\int_0^T s(t)^2 \cdot dt}} \quad (16)$$

→ On calcule la transformée de Fourier rapide (FFT) $\tilde{S}(f)$ du signal normalisé $\tilde{s}(t)$

→ On extrait l'énergie spectrale sur la bande de fréquence $[f_1, f_2]$

$$\%PR = \sum_{f=f_1}^{f_2} |\tilde{S}(f)|^2 \times 100 \quad (17)$$

(L'énergie du signal normalisé est 1)

→ Fréquence équivalente, largeur équivalente

En conservant les notations précédentes pour les grandeurs normalisées, Peiqing [86] calcule la fréquence équivalente σ_W d'une impulsion s :

$$\sigma_W = \sqrt{\sum_{i=0}^k f_i^2 \cdot |\tilde{s}(f_i)|^2} \quad (18)$$

ainsi qu'une fréquence centrale équivalente f_0 selon la formule :

$$f_0 = \sum_{i=0}^k f_i \cdot |\tilde{s}(f_i)|^2 \quad (19)$$

De la même manière, l'auteur obtient un barycentre t_0 de l'impulsion UHF :

$$t_0 = \sum_{i=0}^k t_i \cdot \tilde{s}(t_i)^2 \quad (20)$$

Ce dernier paramètre permet de calculer une largeur équivalente σ_T :

$$\sigma_T = \sqrt{\sum_{i=0}^k (t_i - t_0)^2 \cdot \tilde{s}(t_i)^2} \quad (21)$$

Les paramètres permettent à l'auteur de classer individuellement les impulsions grâce à une méthode d'apprentissage non-supervisée.

→ Largeur efficace des impulsions

La largeur effective d'une impulsion t_{eff} est la largeur d'un signal rectangulaire de même amplitude maximale qui fournirait la même énergie que le signal de l'impulsion (équation (22)).

$$t_{eff} = \frac{\int_0^T \tilde{s}(t)^2 \cdot dt}{\tilde{s}(t)_{max}^2} = \frac{1}{\tilde{s}(t)_{max}^2} \quad (22)$$

La comparaison du ratio de puissance (PR) sur différentes bandes et de t_{eff} permet la discrimination de plusieurs sources de rayonnement électromagnétique (Figure 29).

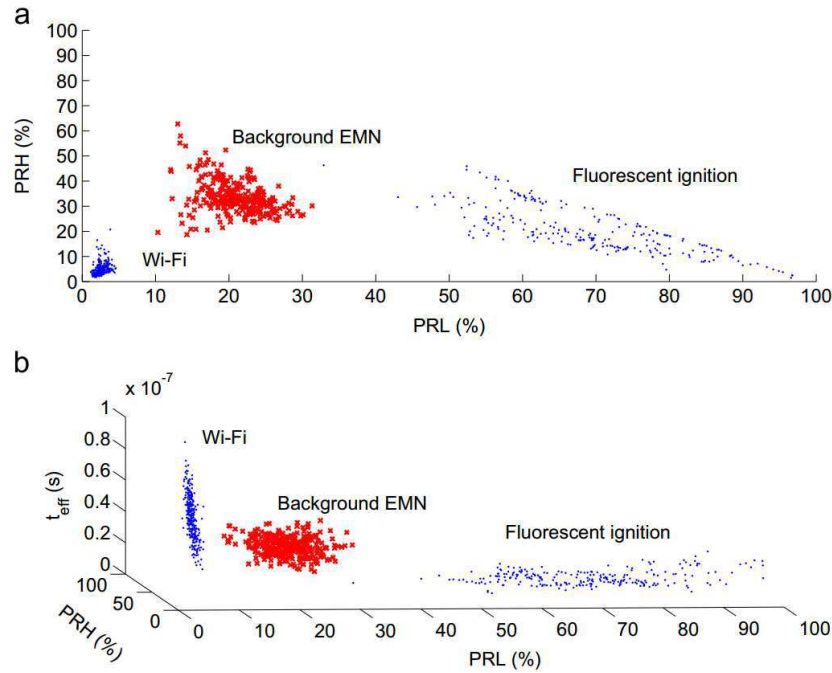


Figure 29 : Comparaison des PR et de t_{eff} sur différentes bandes de fréquences pour différentes sources de rayonnement EM [38]

→ Transformée en ondelettes

Les défauts peuvent être caractérisés sur la base de la transformée en ondelettes (voir le §1.2.5.2). Plusieurs auteurs proposent ainsi des signatures comprenant la transformée en ondelettes [87], [88] ou les maxima de cette transformée [89].

→ Méthodes de Prony et de Pisarenko

En 1795, Prony proposa une méthode de modélisation des signaux comme une somme d'exponentielles complexes amorties (équation (23)).

$$y[k] = \sum_{i=1}^p h_i z_i^k \quad (23)$$

où les coefficients h_i sont des amplitudes complexes : $h_i = \rho_i \cdot \exp(j\theta_i)$, et les fréquences amorties sont représentées par des exponentielles complexes : $z_i = \exp(\alpha_i + j2\pi f_i)$.

Les paramètres $(\alpha_i, f_i, \rho_i, \theta_i)_{i=1}^p$ peuvent être utilisés comme descripteurs pour la classification [90], [91], ou pour calculer la densité d'énergie spectrale [90].

Plus récemment (1973), Pisarenko assimila un signal à une série de raies, auxquelles on ajoute un bruit blanc gaussien (équation (24)):

$$y[k] = \sum_{i=1}^m h_i \cos(2\pi f_i k + \varphi_i) + u_k \quad (24)$$

Les raies sont caractérisées par leur fréquence f_i et leur amplitude h_i , et le bruit par sa variance σ^2 . Les variables aléatoires φ_i suivent une loi uniforme sur $[0, 2\pi[$.

1.3.2. Méthodes automatiques de classification

Quand les signatures présentées dans les paragraphes précédents sont bien choisies, elles permettent de reconnaître le type de défaut qui a engendré les décharges partielles. Cette reconnaissance peut être rendue automatique grâce à des algorithmes d'apprentissage. Cela est particulièrement intéressant pour les tâches de monitoring, ou bien pour les cas où les signatures obtenues ne semblent pas caractéristiques au premier abord.

Dans ce paragraphe, les principales méthodes d'apprentissage automatique (*Machine Learning*) applicables à la reconnaissance des décharges partielles sont présentées.

1.3.2.1 Les réseaux neuronaux (*Artificial Neural Networks, ANN*)

Les réseaux de neurones sont un grand classique de la classification automatique, appliqué à la classification des défauts par de nombreux auteurs [59], [65], [88], [92], [93]. La forme la plus courante est le perceptron multicouche qui sera développé dans ce paragraphe.

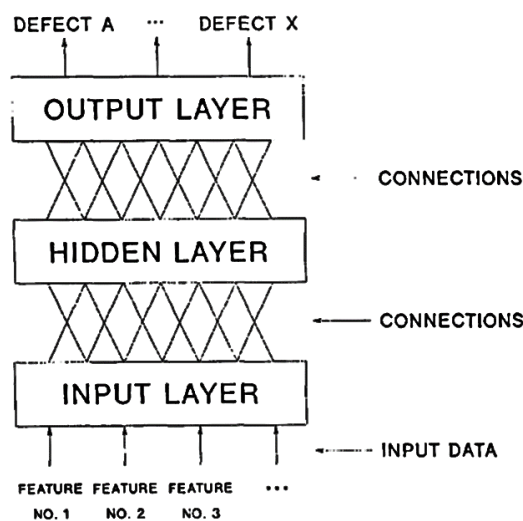


Figure 30 : Structure d'un réseau de neurones [63]

Un réseau de neurones est un graphe orienté et pondéré dont les nœuds sont répartis sur au moins trois niveaux ordonnés : la couche d'entrée, les couches cachées et la couche de sortie. Les liens entre les nœuds de deux couches successives servent à transmettre des grandeurs numériques. Comme des neurones, les nœuds sont dotés de plusieurs entrées et d'une sortie. Les entrées sont connectées aux sorties des nœuds de la couche précédente, et la sortie est connectée aux entrées des nœuds de la couche suivante. Chaque nœud est doté d'une fonction d'activation f , qu'il applique à une combinaison linéaire des entrées, pour transmettre le résultat en sortie (Figure 31).

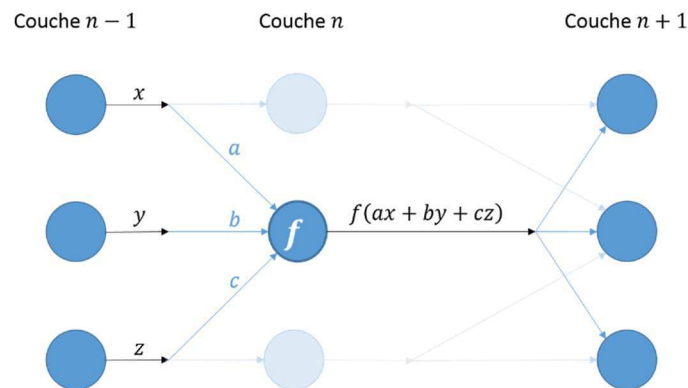


Figure 31 : Fonctionnement d'un nœud dans un réseau de neurones

Les coefficients de pondération de la combinaison linéaire ainsi que les paramètres des fonctions appliquées à chaque nœud sont déterminés lors de l'apprentissage. Les fonctions d'activation les plus courantes sont :

- ➔ La fonction seuil : $f(x) = \begin{cases} -1 & \text{si } x < \theta \\ 1 & \text{si } x \geq \theta \end{cases}$
- ➔ La fonction linéaire : $f(x) = \alpha \cdot x$
- ➔ La fonction sigmoïde : $f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}}$

La couche d'entrée doit permettre d'introduire dans le modèle une observation complète. Sa dimension est donc celle des descripteurs utilisés. La couche de sortie possède un nœud par classe utilisée. Lorsqu'une observation est introduite, le nœud de la couche de sortie correspondant à la bonne classe doit retourner à 1 et les autres à 0. La couche cachée peut être plus ou moins complexe, selon la complexité du comportement des données. La conception de cette couche cachée (nombre de couches intermédiaires, nombre de nœuds dans les couches, fonctions non-linéaires attachées aux nœuds, liens entre les nœuds) est une tâche difficile, car le risque de surdimensionnement est grand.

Dans la plupart des cas, on a une unique couche cachée, et tous les nœuds sont reliés à tous ceux des couches voisines.

➔ Apprentissage par rétro-propagation (*Back propagation neural networks, BPNN*)

C'est la méthode d'apprentissage la plus classique ; la plupart des réseaux utilisés sont des réseaux de neurones à rétro-propagation, également appelés *feed-forward back propagation neural network* (FFBPNN).

➔ L'algorithme d'apprentissage par rétro-propagation peut se résumer ainsi :

- Les poids sont initialisés.
- On répète les étapes suivantes jusqu'à convergence :
 - on présente la base de données au réseau de neurone.
 - on calcule la sortie pour tous les exemples (propagation vers

l'avant).

- on compare avec la sortie attendue (il s'agit d'un apprentissage supervisé) pour calculer une erreur.
- on propage vers l'arrière l'erreur calculée : on modifie les poids de la dernière couche en fonction de cette erreur, puis ceux de la couche précédente, et ainsi de suite jusqu'à l'entrée du réseau.

→ Plusieurs algorithmes permettent de réaliser la rétro-propagation proprement dite, c'est-à-dire cette dernière étape de correction des coefficients en fonction de l'erreur constatée [93] :

- Méthode du gradient conjugué de Fletcher-Powell (CGF)
- Rétro-propagation à taux d'apprentissage variable (GDX)
- Algorithme de Levenberg-Marquardt (LM)
- *Resilient Back propagation (RB)*
- *Gradient descent weight and bias (GD)*
- *Gradient descent with momentum weight and bias (GDM)*

→ Au lieu de calculer l'erreur pour toute la base de données, on peut la calculer successivement pour chaque exemple de la base, et réaliser la rétro-propagation pour cette valeur de l'erreur. Cette méthode dite « en ligne » ou « stochastique » permet d'accélérer la convergence pour des bases de données très volumineuses.

Les réseaux de neurones sont très appréciés pour leur polyvalence. Il a même été démontré que le perceptron multicouche à une couche cachée était un **approximateur universel** [94]. Cela signifie que toute fonction continue des entrées peut être obtenue en sortie avec une précision arbitraire par un perceptron comportant un nombre fini de neurones dans la couche cachée.

En contrepartie, la classification par réseaux de neurones est une méthode non-paramétrique : on n'y fait pas d'hypothèses sur la structure des données [65]. Philosophiquement, il s'agit toujours d'une « boîte noire » qui fournit un résultat intéressant mais qui est généralement incapable de donner un sens aux paramètres du modèle employé.

1.3.2.2 Support Vector Machine (SVM)

Très populaire, la classification par SVM consiste à séparer l'espace en deux par un hyperplan, en tenant les éléments des ensembles ainsi partitionnés le plus loin possible de l'hyperplan séparateur (Figure 32, Figure 33a). Les éléments qui sont les plus proches de l'hyperplan sont appelés les « vecteurs supports ». La principale caractéristique de la frontière dessinée entre les deux classes est qu'elle est caractérisée par les points les plus excentrés de leur classe, et non par ceux qui sont bien à l'intérieur de la frontière, comme par exemple les centroïdes, utilisés dans beaucoup d'autres méthodes.

La distance entre les vecteurs supports et l'hyperplan séparateur est appelée « marge », c'est la quantité que les algorithmes qui cherchent la meilleure orientation de l'hyperplan doivent maximiser. Dans le cas de deux classes qui se chevauchent, on ajoute au problème d'optimisation une pénalité proportionnée à l'incursion de chaque point dans le demi-espace de la classe opposée.

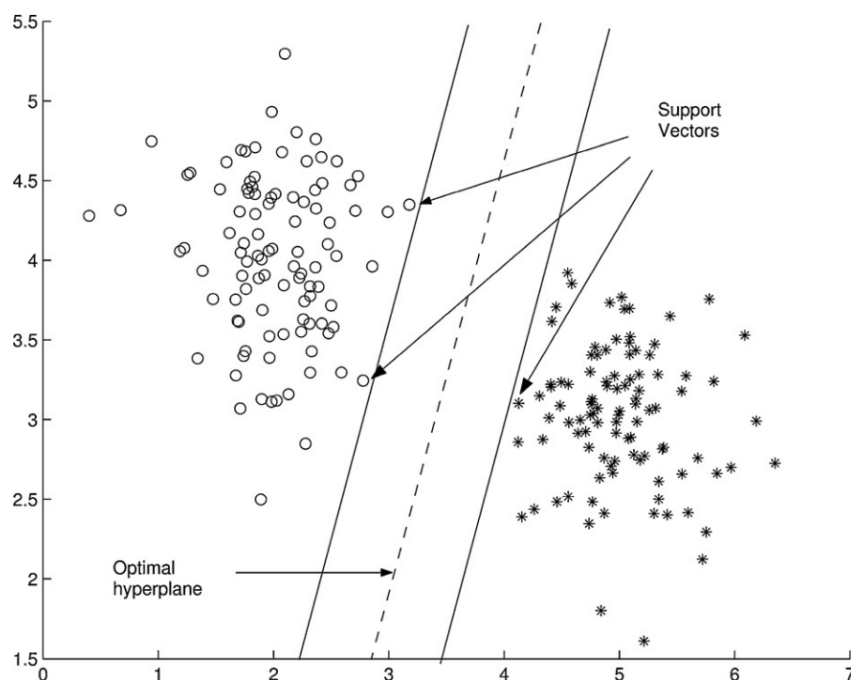
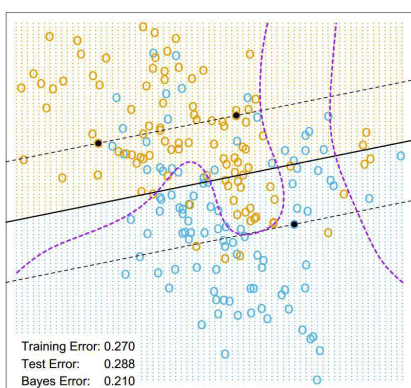
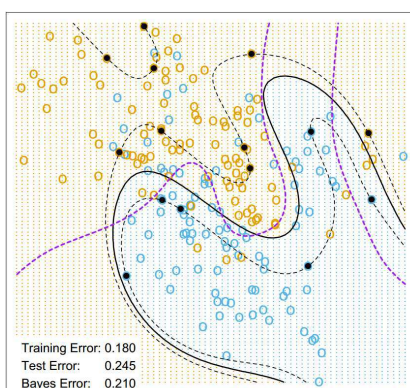


Figure 32 : SVM pour un exemple à deux dimensions ; l'hyperplan optimal figure en pointillés, les marges en trait plein [95].

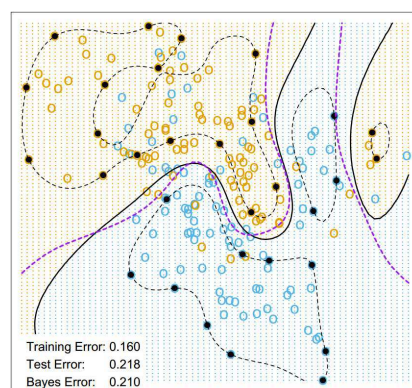
On peut généraliser en considérant des frontières offrant plus de degrés de libertés comme des polygones (Figure 33b) ou des splines, le cas extrême étant l'utilisation de noyaux non-linéaires [96] (Figure 33c).



(a)



(b)



(c)

Figure 33 : SVM pour deux classes se recouvrant partiellement pour différents types de frontières.
(a) Hyperplan ; (b) Polynôme de degré 4 ; (c) Noyau radial [96].

Les SVM sont des outils de classification binaire, mais on peut faire de l'apprentissage multi-classes en combinant plusieurs classificateurs [66], [81], [97]. Pour cela, on fait une classification binaire d'une classe contre toutes les autres. Après cette étape, si l'on n'a pas

trouvé directement la classe, on en a tout de même éliminé une, et on peut poursuivre avec une nouvelle classification binaire d'une des classes restantes contre celles qui demeurent. On élimine ainsi les classes possibles une à une jusqu'à trouver la bonne. Ce processus est symbolisé par l'arbre de la Figure 34.

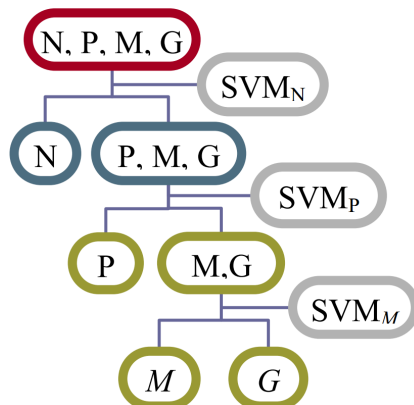


Figure 34 : Arbre binaire de SVMs pour la classification multi classes [97]

1.3.2.3 Hidden Markov Models (HMM)

L'information contenue dans les signaux de décharges partielles réside plus dans la succession des événements que dans la forme du signal lui-même. Ceci nous conduit à utiliser les HMM, bien connus pour leur utilisation en reconnaissance du langage, où c'est bien l'ordre des syllabes qui importe [98].

Les HMM reposent sur le modèle des chaînes de Markov où le système peut être décrit par un ensemble d'états. On passe d'un état à un autre suivant une loi probabiliste. Pour la classification, on entraîne dans un premier temps séparément un HMM pour chaque type de défaut, pour obtenir à chaque fois le modèle qui le caractérise le mieux. Vient ensuite la phase de test où l'on confronte une séquence inconnue à tous les modèles préalablement construits. Le modèle qui a le plus de chances de produire la séquence obtient le meilleur score.

Cette méthode de classification présente l'avantage de supporter facilement l'ajout d'un type de défaut : il suffit alors d'entraîner une nouvelle chaîne de Markov, et non pas le système de reconnaissance entier comme dans les méthodes à base de réseaux de neurones. Le système de score facilite aussi l'évaluation d'un niveau de confiance envers les résultats obtenus [99].

1.3.2.4 Apprentissage non-supervisé (clustering)

L'apprentissage non-supervisé consiste à identifier une structure dans les données sans utiliser de connaissance préalable de la signification des groupes qui seront formés. Les exemples sont regroupés selon la proximité de leurs caractéristiques. Par rapport à l'apprentissage supervisé, la démarche est inversée. Là où nous regroupons les échantillons

en fonction de la classe pour identifier quel élément de structure permet la séparation, nous cherchons maintenant avant tout une structure qui permet d'identifier des groupes séparables. Libre à nous d'identifier ensuite les groupes à des classes de défauts.

Les algorithmes d'apprentissage non-supervisé existent par dizaines, parmi lesquels on retrouve notamment :

- La méthode des k-means, certainement la plus intuitive de toutes (utilisée dans [97]). Voici comment fonctionne cette méthode :
 - > On choisit a priori le nombre k de clusters que l'on souhaite former.
 - > On définit arbitrairement k centres de gravité
 - > On alterne les deux étapes suivantes jusqu'à convergence :
 - Pour chaque centre, on forme un cluster composé de tous les exemples qui sont plus proches de ce centre que de n'importe quel autre.
 - La moyenne des points regroupés dans chaque cluster est calculée, et ces points deviennent les nouveaux centres.
- La quantification vectorielle (learning vector quantization, LVQ), utilisée dans [65]. Voici le principe de cette méthode :
 - > Comme pour les k-means, on choisit le nombre k de clusters, et on définit arbitrairement autant de centres $(c_i)_{i=1}^k$.
 - > On répète les étapes suivantes jusqu'à convergence, en diminuant le taux d'apprentissage ϵ au fil des itérations, en tendant vers 0.
 - On présente un exemple x , et on détecte le centre c_i qui en est le plus proche.
 - On rapproche le centre de l'exemple, proportionnellement à la distance qui les sépare : $c_i \leftarrow c_i + \epsilon(x - c_i)$.
- Les cartes auto-organisatrices de Kohonen, utilisées dans [65], [100]
- Les méthodes connues, revisitées par la logique floue, où tous les exemples appartiennent à tous les clusters à la fois, avec un degré d'appartenance différent que l'on quantifie ([63], [86], [101]).

1.3.2.5 Le *boosting*

Le *boosting* est une technique utilisée pour augmenter la (faible) performance d'un algorithme de classification [96].

→ Adaboost

Né en 1997 [102], Adaboost.M1 est le premier algorithme de *boosting*. Dans cet algorithme, on choisit une méthode de classification que l'on entraîne avec une suite de versions

pondérées d'un même jeu de données. Les pondérations successives permettent d'accentuer l'apprentissage là où la reconnaissance échoue. La classification se fait de la manière suivante : on présente un exemple à toutes les versions du prédicteur et on organise un vote entre ceux-ci, en pondérant les différentes voix en fonction des performances de chacun. On attribue finalement à l'exemple la classe qui a obtenu le plus de voix.

Adaboost a été conçu pour des classificateurs binaires faibles, c'est-à-dire dont le taux d'erreur s'approche de 50%. Au fil des itérations, on obtient des taux d'erreurs de plus en plus intéressants (Figure 35).

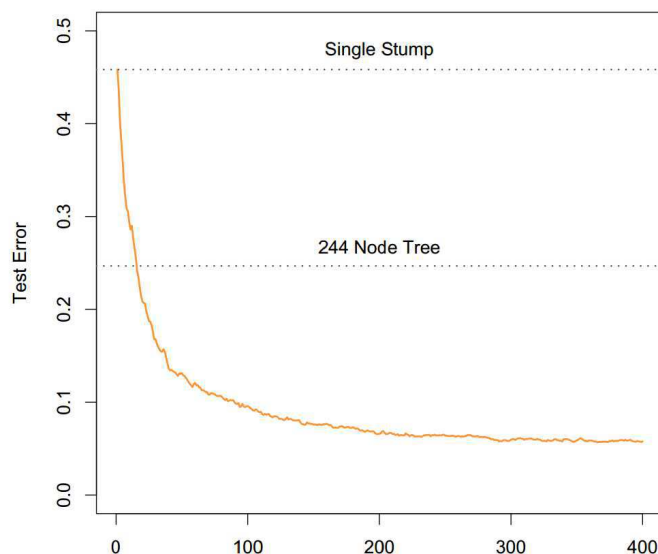


Figure 35 : Taux d'erreur obtenu grâce au boosting en fonction du nombre d'itérations [96]

→ Autres formes de **boosting**

Dans [103], A. Mas'ud utilise également un système de vote, entre plusieurs réseaux de neurones. C'est le principe des *ensemble neural networks* (ENN), également décrits dans [100]. Cette fois-ci les classificateurs utilisés sont déjà performants, ce qui permet d'en employer un nombre réduit (6). Cela permet toujours une augmentation des performances de la classification, avec un taux d'erreur qui passe de 10% à 3%.

→ Discussion : opportunité de multiplier les descripteurs sans sur-dimensionner

L'emploi du *boosting* permet d'utiliser divers classificateurs simultanément. En entraînant chaque modèle indépendamment avec des descripteurs différents et adaptés à l'algorithme sous-jacent, on a l'opportunité d'utiliser des descripteurs variés tout en réduisant localement le risque de surdimensionnement, pour rassembler a posteriori tous les résultats de classification pour une performance accrue.

Toutefois, le fait de dissocier les descripteurs doit se faire avec discernement : il ne s'agit pas de séparer des associations discriminantes. Certains descripteurs particulièrement

performants pourraient même bien gagner à être employés simultanément à plusieurs endroits.

L'accroissement de la performance reste à vérifier, mais on peut espérer qu'avec des descripteurs différents, les exemples mal classés ne seront pas les mêmes selon les différents algorithmes agrégés, et que le système de vote sera efficace. Ceci pourrait même être un avantage par rapport au *boosting* classique où les différents algorithmes analysent toujours une base de données similaire.

1.4. Conclusion

Cette étude bibliographique a d'abord permis de collecter des connaissances de base sur les décharges partielles et sur les phénomènes physiques associés. Nous avons abordé différentes théories des décharges, permettant ainsi de comprendre comment s'initient et se développent les différents types DP dans l'isolation gazeuse des postes.

Cette étude a permis également d'identifier les différents défauts qui mettent en danger les PSEM et qui produisent des décharges partielles.

Nous avons aussi pu recenser les facteurs qui ont une influence sur la formation des DP : la polarité et le niveau de la tension, la nature et la pression du gaz, la distance inter-électrodes, la nature et la géométrie des défauts.

Afin d'assurer le bon fonctionnement des PSEM, il est important de pouvoir détecter les décharges partielles engendrées par les défauts. Pour cela, plusieurs méthodes de mesures ont été présentées, parmi lesquelles l'incontournable méthode conventionnelle encadrée par la norme IEC 60270, la mesure des ondes UHF et la mesure de la lumière.

Nous avons aussi mis en évidence la diversité des solutions déjà proposées pour extraire des descripteurs à partir des mesures de DP et pour classifier les défauts à l'origine des décharges partielles.

L'état de l'art est très complet en courant alternatif, où l'on dispose de techniques bien éprouvées à tous les stades de l'analyse. Il n'en est pas de même en courant continu.

- ➔ Les études fondamentales se concentrent sur des dispositifs expérimentaux de taille réduite. Il est donc difficile de généraliser les résultats aux systèmes de PSEM qui sont de grande dimension.
- ➔ La méthode conventionnelle de mesure des DP elle-même a été principalement conçue pour la mesure en AC. La pertinence des résultats de cette mesure en DC est encore à prouver. Elle est même remise en cause par certains observateurs [104].

- Les travaux sur la classification des défauts ont surtout cherché à adapter le format des données expérimentales en DC pour utiliser les techniques de classification identifiées en AC.

Les études de laboratoire ont toujours été une méthode très prisée des chercheurs. Elles permettent en effet de bien maîtriser les conditions expérimentales, et offrent souvent des facilités de manipulation que ne possèdent pas des équipements réels. Toutefois, de telles études introduisent une question récurrente : dans quelle mesure les résultats obtenus sont-ils applicables à des systèmes industriels ? Dans le cas des DP, l'effet de la distance inter-électrodes suggère que ce n'est pas possible.

A partir de ces constats, il semble important de réaliser la caractérisation des décharges partielles engendrées par différents défauts en DC dans des conditions réelles, c'est-à-dire dans un PSEM. Les défauts étudiés eux-mêmes doivent avoir des dimensions réalistes.

Ce sera l'objet du Chapitre 2.

Cette caractérisation devra permettre de décrire l'influence des différents paramètres d'expérimentation, notamment la nature du défaut et la polarité de la tension, mais aussi le niveau de tension, la pression et la nature du gaz.

Pour cela, plusieurs méthodes de mesure pourront être employées. Les informations apportées par la mesure conventionnelle des DP pourront être analysées. Les capacités de cette méthode pour la mesure en DC devront être éprouvées. D'autres méthodes de mesure pourront être employées pour obtenir des informations supplémentaires sur le comportement des décharges partielles.

Cela fera l'objet des Chapitre 3 et 4.

Pour la classification, le choix des descripteurs devra se faire autant que possible en lien avec le comportement des données analysées. Ensuite, le choix et les réglages de l'algorithme de reconnaissance devront prendre en compte le format des descripteurs choisis.

La variété des comportements de DP possibles pour un même type de défaut montre la nécessité de constituer une base de données complète. Cette base de données devra contenir des mesures de DP réalisées pour différents types de défauts dans des conditions expérimentales les plus variées possibles. Ce n'est qu'à cette condition qu'une reconnaissance automatique des défauts performante pourra être réalisée.

Cela fera l'objet du Chapitre 5.

Chapitre 2. Dispositif expérimental

L'objectif de ce travail est de caractériser les décharges partielles produites par différents défauts dans un poste sous enveloppe métallique (PSEM). Pour cela, on utilise pour objet de test un tronçon réel de PSEM utilisé sous contrainte DC, et on réalise différentes mesures en présence de défauts artificiels.

Dans ce chapitre, l'objet de test sera présenté avec ses principales caractéristiques, ainsi que les défauts introduits. Les différentes chaînes de mesures employées seront ensuite décrites : mesure conventionnelle des décharges partielles, mesures de courant, mesure de l'émission de lumière et mesure des ondes UHF. Enfin, le protocole expérimental utilisé pour les expériences sera détaillé.

2.1. Un véritable PSEM HVDC

Cette partie présente le cadre matériel dans lequel les expériences ont été réalisées. En premier lieu, y sera exposé le système d'alimentation haute-tension DC. Le tronçon de PSEM étudié sera ensuite présenté. Pour finir, on expliquera comment des défauts artificiels ont été introduits.

2.1.1. Source HVDC

La tension a été appliquée sur l'objet de test grâce à deux alimentations haute-tension continue de marque Technix (modèle SR 200-X-600). La première peut fournir des tensions de 0 à 200 kV DC en polarité positive, tandis que la deuxième peut fournir 0 à -200 kV DC en polarité négative. Le niveau de tension est réglé grâce à un potentiomètre manuel situé en face avant de la source DC (Figure 36).



Figure 36 : Photographie de la face avant de l'alimentation haute-tension (polarité négative).

Une particularité des alimentations utilisées est le fait que la sortie haute-tension se fasse par l'intermédiaire d'un câble. Le câble haute-tension a une structure coaxiale, où le conducteur central est au potentiel haute-tension, tandis que le conducteur extérieur est relié à la terre. L'arrivée de la tension dans le poste se fait par l'autre extrémité du câble à travers une traversée de paroi isolée (photographie en Figure 37, schéma en Figure 38). En conséquence, il n'est pas nécessaire d'installer une traversée aérienne. En plus de leur encombrement, ces traversées haute-tension introduisent des perturbations haute-fréquence dans le poste car elles se comportent comme une antenne pour les ondes électromagnétiques ambiantes. Au contraire, le montage final est compact et entièrement blindé, ce qui est bénéfique pour la qualité des mesures.



Figure 37 : photographie de l'entrée de la haute-tension dans le poste.

A l'intérieur du poste, une résistance de $10\text{ M}\Omega$ est placée en série avec la source pour protéger cette dernière des pics de courant en cas d'amorçage dans le poste. Cette résistance est également représentée en Figure 38.

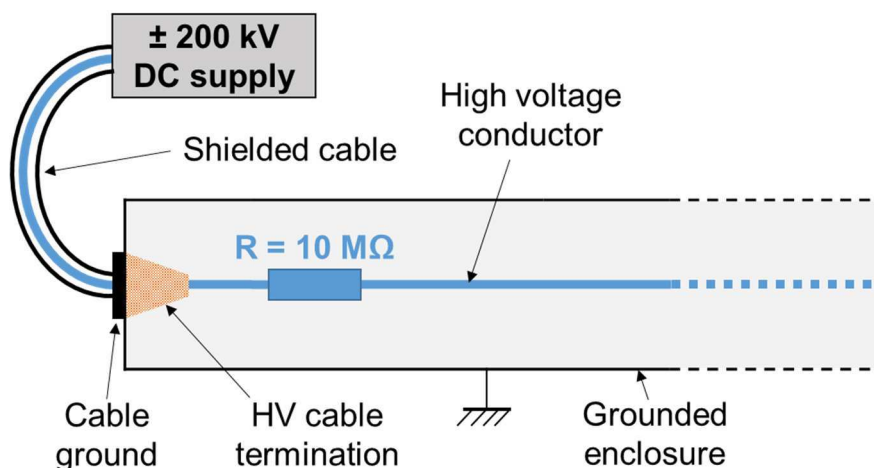


Figure 38 : Schéma de principe de l'alimentation haute-tension du poste.

Au cours des expériences, le niveau de tension est enregistré grâce à une sortie analogique située en face arrière de l'alimentation (Figure 39). Cette sortie analogique donne entre 0 et 10 V une image de la tension entre 0 et $\pm 200 \text{ kV}$ en sortie de l'alimentation. On obtient le niveau réel de la haute tension en multipliant par $\pm 20\,000$ la tension donnée par cette sortie analogique.

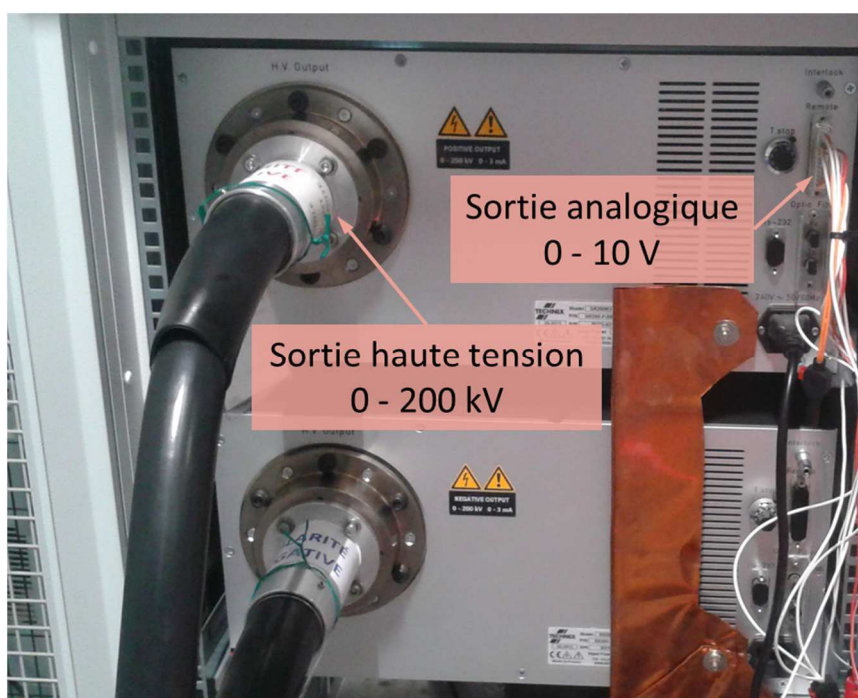


Figure 39 : Photographie de la face arrière de l'alimentation haute-tension.

2.1.2. Objet de test

Pour accueillir les mesures de décharges partielles, un poste sous enveloppe métallique a été choisi. La distance inter-électrodes est de 144 mm.

Au bout de la barre conductrice se trouve une boule terminus (photographie en Figure 41, schéma en Figure 40). Elle a été conçue de telle sorte que le champ électrique à sa surface soit moins important que sur le reste de la barre. De cette manière, l'endroit où se formeront les décharges partielles sera d'abord le reste de la barre, et non l'extrémité qui n'existe pas dans les postes réels.

Le conducteur haute-tension est soutenu par des isolants solides.

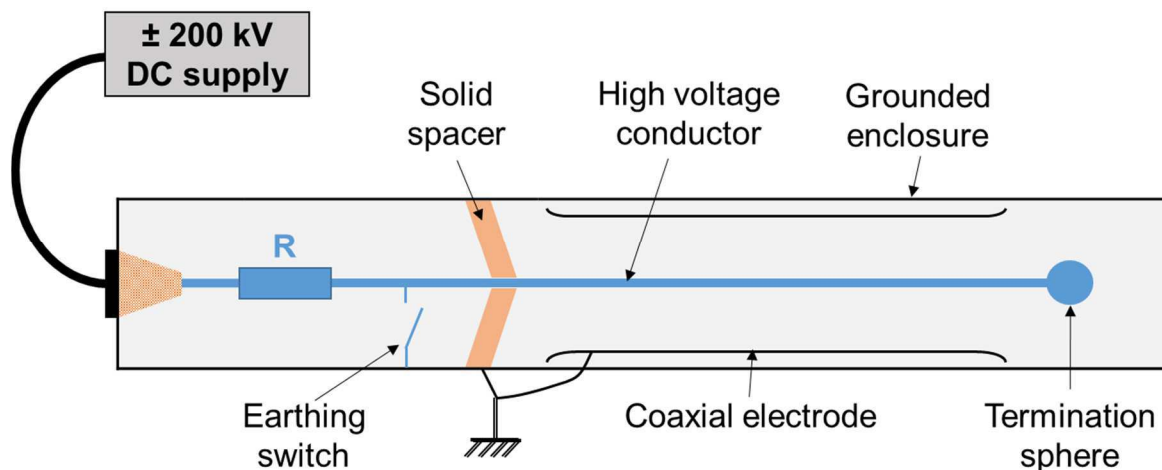


Figure 40 : Schéma de l'objet de test, incluant le capot coaxial amplificateur de champ électrique.

Les premières expériences en présence de particules libres métalliques ont montré que le champ électrique à la surface de l'enveloppe métallique n'était pas toujours suffisant pour faire décoller les particules. Afin de faciliter le décollage, un capot coaxial relié à la terre a donc été ajouté à l'intérieur du poste (schéma en Figure 40, photographie en Figure 41). Il permet d'amplifier le champ électrique dans le poste en réduisant la distance inter-électrodes, pour la porter à 98,5 mm. Ce capot a été conçu de manière à augmenter de 60 % le champ électrique à sa surface et de 30 % sur la barre sous 200 kV DC. Le champ électrique atteint ainsi respectivement 3,75 kV/mm et 1,2 kV/mm sur la barre et sur le capot.

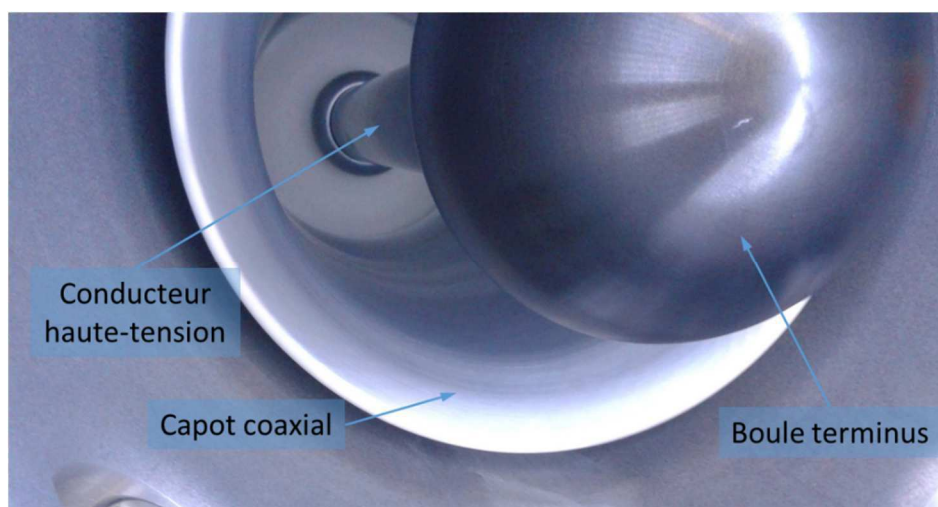


Figure 41 : Photographie du compartiment d'essai.

2.1.3. Introduction de défauts artificiels

Pour pouvoir caractériser le comportement des décharges partielles en présence d'un défaut, il faut réaliser des mesures en présence de ce défaut. Pour cela, on introduit un défaut artificiel dans le poste. Deux types de défauts sont étudiés dans cette thèse : les pointes sur le conducteur haute-tension et les particules libres métalliques. Ce sont en effet les défauts les plus courants dans les PSEM (§1.1).

Pour les défauts de type pointe, on utilise du fil de cuivre fixé sur le conducteur haute-tension de manière à ce que la pointe soit orthogonale à la surface de la barre. La longueur choisie pour les pointes est 5 mm, et deux diamètres ont été utilisés : 500 μm et 250 μm . Ces pointes sont représentées en Figure 42-a-b. Comme on le voit en Figure 42-c, les pointes sont fixées sur la barre au moyen d'un adhésif isolant.

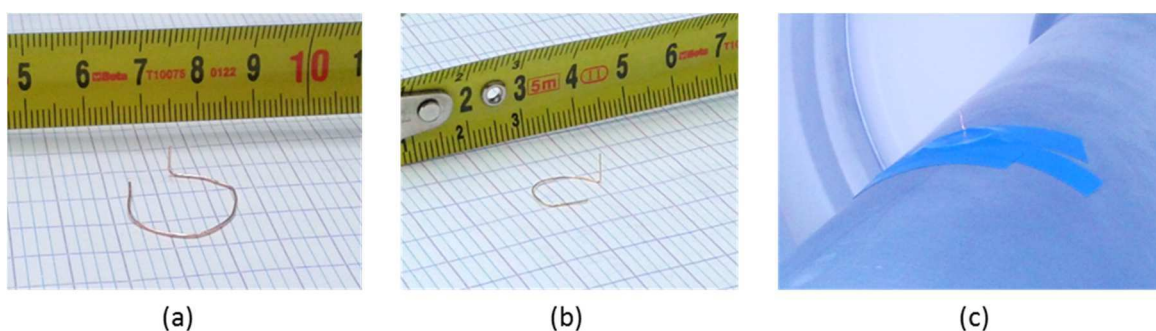


Figure 42 : Défauts artificiels de type pointe utilisés lors de ces travaux.
(a) $\varnothing = 500 \mu\text{m}$; (b) $\varnothing = 250 \mu\text{m}$; (c) Pointe fixée sur le conducteur haute-tension.

Pour les défauts de type particule, on utilise des filaments de cuivre ou des copeaux d'aluminium. Les filaments de cuivre ont un diamètre de 250 μm et une longueur de 4 mm (Figure 43-b). Les copeaux d'aluminium ont approximativement des dimensions de 5×0,5 mm (Figure 43-c-d-e-f-g). Une sphère en aluminium d'un diamètre de 0,25 mm a également été utilisée.

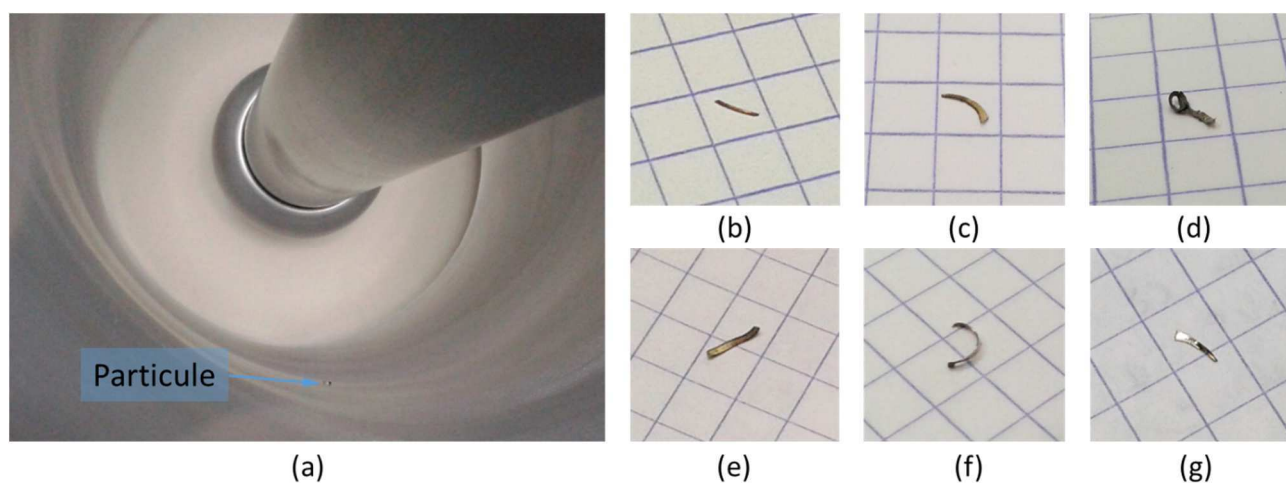


Figure 43 : (a) Implantation d'une particule dans le compartiment de test ;
(b) Filament de cuivre ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) ; (c, d, e, f, g) copeaux d'aluminium. Les carreaux ont un côté de 5 mm.

En début d'expérience pour un défaut de type particule, on pose la particule sur l'électrode extérieure, au milieu du capot coaxial (Figure 43-a). Afin de pouvoir observer le mouvement des particules, des hublots ont été montés en bout de maquette, et un système d'éclairage à diodes a été installé à l'intérieur du poste. On retrouve ces éléments dans le schéma récapitulatif de la Figure 44.

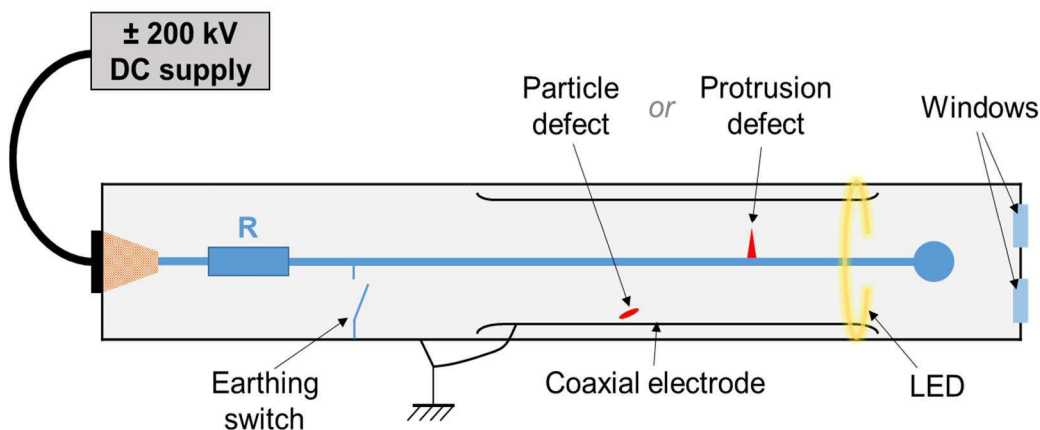


Figure 44 : Implantation des défauts artificiels dans le poste - schéma de principe.

2.2. Mesure conventionnelle des décharges partielles

La caractérisation des défauts entreprise dans ce travail commence par la mesure des décharges partielles en conformité avec la norme internationale IEC 60270 (§1.2.1, [30]). Les résultats obtenus avec cette chaîne de mesure sont présentés dans le Chapitre 3.

2.2.1. Chaîne de mesure conventionnelle des DP

Pour pouvoir réaliser la mesure conventionnelle des décharges partielles, le montage est modifié pour introduire dans le poste une capacité de couplage de 500 pF en parallèle du compartiment de test. L'impédance de mesure est connectée à l'extrémité de la capacité de couplage grâce à une traversée de paroi isolante. On retrouve ces différents éléments sur la Figure 45 : la capacité de couplage y est notée C_k , et l'impédance de mesure Z_m .

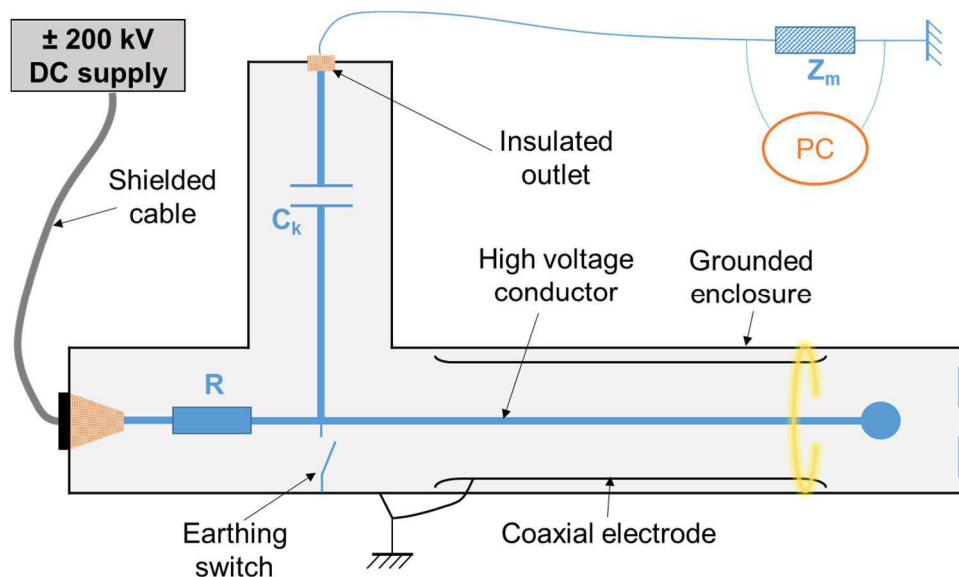


Figure 45 : Schéma du montage permettant de réaliser la mesure conventionnelle des décharges partielles.

L'appareil de mesure utilisé est le MPD 600 produit par Omicron. La bande de fréquence choisie pour la mesure est 100-400 kHz, ce qui permet une résolution de double impulsion de 6,25 μ s. La calibration est réalisée grâce au CAL 542 en conformité avec la norme IEC 60270:2000 [8].

2.2.2. Caractérisation à vide

Avant toute mesure en présence d'un défaut, il faut réaliser une caractérisation du niveau de décharges partielles mesuré dans la maquette sans défaut. Pour cela, toute l'étendue de la plage de tension accessible est balayée tout en enregistrant le niveau de DP. Un exemple de résultat d'une telle caractérisation est présenté en Figure 46. Les valeurs qu'on y lit sont représentatives de toutes les caractérisations à vide réalisées : le bruit ambiant est mesuré à 600 fC environ. L'alimentation DC génère un bruit qui augmente avec le niveau de tension. Ce bruit demeure inférieur à 5 pC.

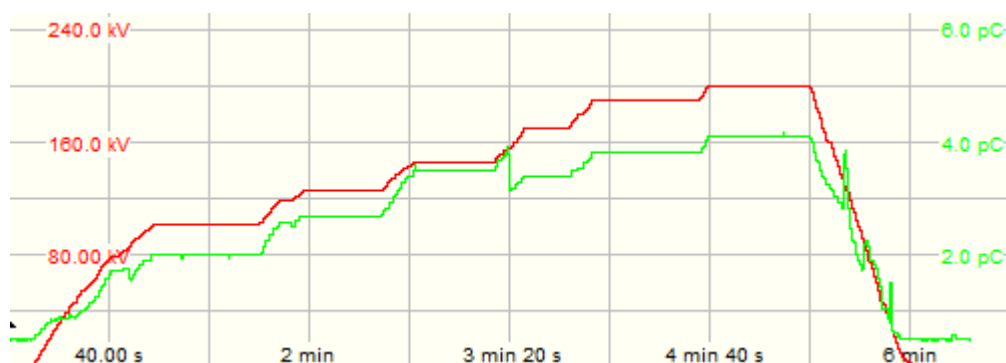


Figure 46 : Evolution du niveau de DP sur toute la gamme de tension dans une maquette sans défaut dans 0,1 MPa de SF₆.

En conséquence, on fixe le seuil de détection des décharges partielles pour la suite des travaux à 5 pC. On s'assure ainsi qu'une décharge partielle enregistrée au-dessus de ce

niveau est bien générée par le défaut en cours d'étude et non par un autre élément de la chaîne de mesure.

Sauf mention expresse du contraire, les mesures et les traitements présentés dans ce document ne porteront que sur les décharges dont la charge apparente est supérieure à 5 pC.

2.3. Mesures de courant

La mesure du courant généré par un défaut peut également donner des informations sur le comportement des décharges partielles causées par le défaut. On cherche donc à enregistrer le courant. Il faut pour cela implanter un ampèremètre sur le chemin du courant. Selon l'appareil utilisé, des mesures de courant stationnaire pourront être réalisées, ou bien des mesure de courant haute-fréquence.

Les résultats obtenus avec ces chaines de mesure sont présentés au paragraphe 4.2.

2.3.1. Montage électrique

Pour réaliser une mesure du courant traversant le défaut, il faut placer un ampèremètre sur le chemin de ce courant. Pour cela, on met à profit la présence du capot coaxial dans la maquette. Le courant qui traverse le défaut pour se propager dans le gaz est en effet collecté par le capot qui est sur son chemin vers l'enveloppe métallique mise à la terre. L'ampèremètre est donc placé sur le chemin électrique entre le capot et l'enveloppe. Pour cela, le capot est isolé électriquement de l'enveloppe, et relié par un fil à une traversée de paroi isolante pour sortir du poste. L'ampèremètre est branché entre ce fil et l'enveloppe. L'implantation de l'ampèremètre est schématisée en Figure 47.

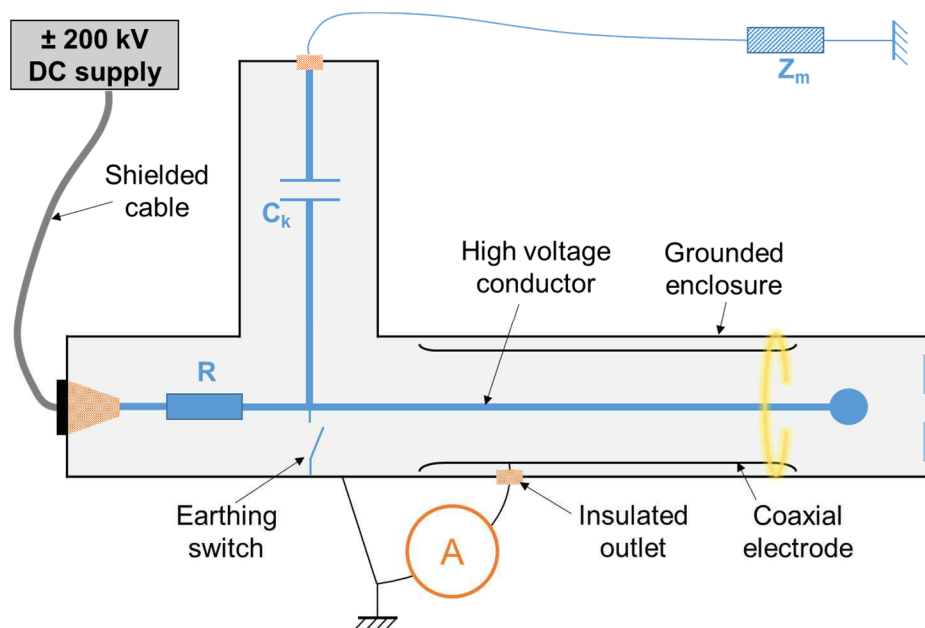


Figure 47 : Schéma de principe de la mesure de courant par l'intermédiaire du capot coaxial.

2.3.2. Mesure de courant stationnaire

Le premier type de mesure de courant est une mesure de courant stationnaire. Elle permet d'obtenir la valeur moyenne du courant continu qui passe dans le défaut.

Cette mesure est réalisée grâce à un électromètre Keithley 6514 placé entre le capot coaxial et l'enveloppe métallique, conformément à la description donnée dans le paragraphe 2.3.1. Cet appareil peut mesurer le courant avec une précision de 20 pA. L'inconvénient de cet appareil sensible est sa vulnérabilité aux surintensités que l'on rencontre en cas d'amorçage dans le poste. En conséquence, le protocole de mesure a été conçu de manière à arrêter les mesures de courant avant le claquage quand cet électromètre est utilisé (voir à ce sujet le §2.6.2).

Comme la période d'échantillonnage des mesures de courant et d'intensité lumineuse est égale à 1 seconde et que la tension est montée à 1 kV/s au maximum (§2.6.2), les caractéristiques courant-tension sont obtenues avec une erreur de tension inférieure à $\pm 0,5$ kV.

Une mesure de courant stationnaire est également possible par une lecture sur la façade de l'alimentation haute-tension. Cette mesure a l'avantage de pouvoir être effectuée sans danger pour le matériel jusqu'à la tension de claquage.

La résolution de la mesure de courant sur la façade de la source haute-tension est de 10 μ A, pour une résolution en tension de ± 1 kV.

Toutefois, le courant ainsi mesuré est le courant total débité par l'alimentation, qui n'est pas forcément constitué du seul courant passant par le défaut. En fait, les mesures préliminaires réalisées en l'absence de défaut indiquent que les autres composantes du courant débité par l'alimentation sont inférieures à la résolution de la mesure et peuvent donc être négligées. La Figure 48, montrant le courant mesuré simultanément avec l'électromètre et au niveau de la source HT, confirme ce phénomène en présence d'un défaut. On constate en effet que la mesure obtenue par lecture sur l'alimentation haute-tension prend les mêmes valeurs que la mesure de l'électromètre. On déplore seulement l'imprécision de la mesure sur l'alimentation haute-tension pour les courants inférieurs à 100 μ A.

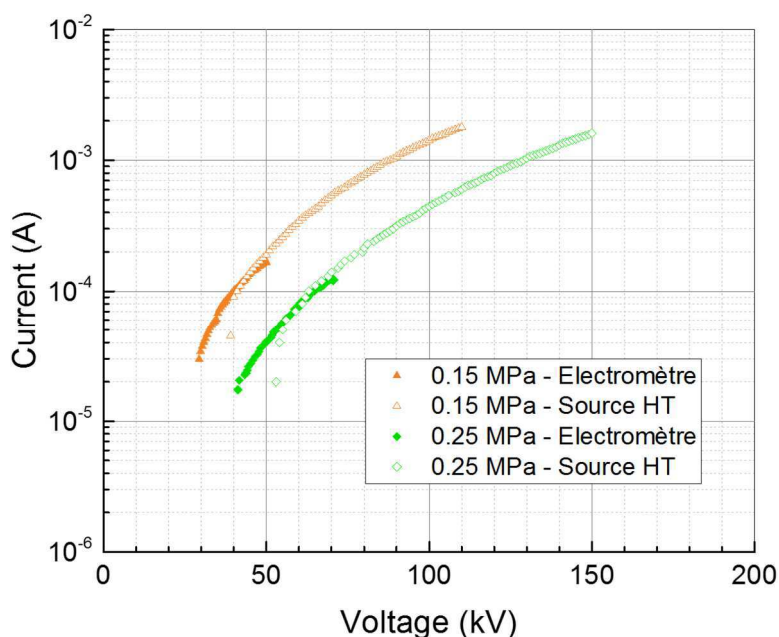


Figure 48 : Caractéristiques courant-tension obtenues en présence d'un défaut grâce à deux méthodes de mesure, sous deux pressions d'azote différentes.

2.3.3. Mesure haute-fréquence

Il est également possible d'observer les composantes haute-fréquence du courant de décharge partielle. Pour cela, on utilise un oscilloscope qui mesure la tension aux bornes d'une résistance de 1 k Ω placée à la place de l'ampèremètre (§2.3.1). L'impédance d'entrée de l'oscilloscope est réglée à 1 M Ω .

L'oscilloscope utilisé est le modèle DPO7254 produit par Tektronix. Il offre une bande passante de 2,5 GHz. Etant donné la durée des signaux que l'on observe, la période d'échantillonnage a été fixée à $2 \cdot 10^{-7}$ s. D'après le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon [105], le signal ne sera correctement représenté que pour les fréquences inférieures à 2,5 MHz.

En cas d'amorçage dans le poste, la surintensité provoque une surtension aux bornes de la résistance de mesure. Cette surtension est susceptible d'endommager l'oscilloscope. Pour se prémunir de toute dégradation, un circuit de protection à diodes a été placé en amont de la résistance de mesure. Le circuit électrique de la chaîne de mesure haute-fréquence du courant de décharge est reproduit en Figure 49.

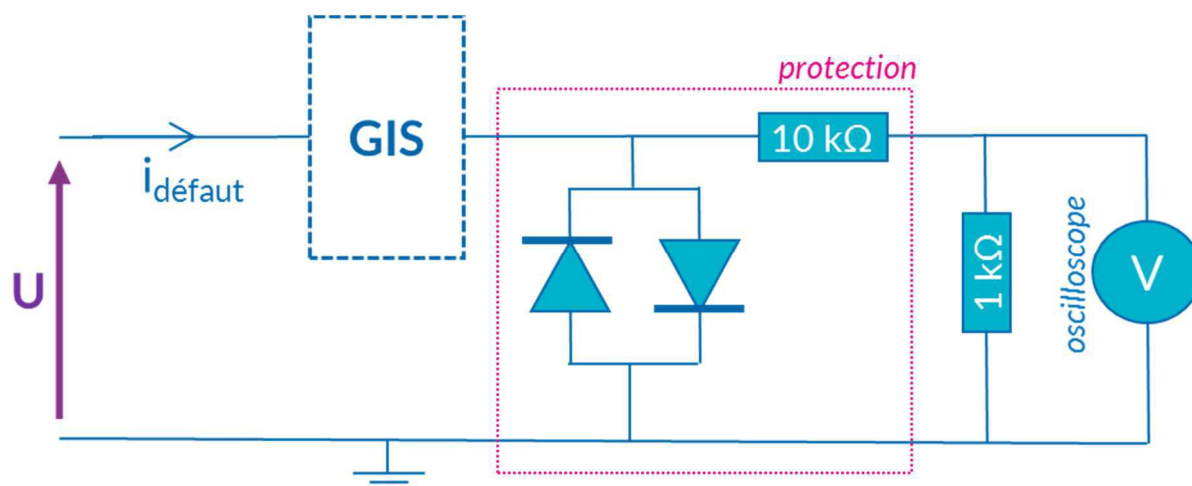


Figure 49 : Schéma électrique de la chaîne de mesure directe de courant de décharge haute-fréquence incluant la protection de l'oscilloscope contre les surtensions.

Les diodes étant légèrement capacitives, elles forment avec la résistance qui vient ensuite un filtre RC du premier ordre. Le circuit de protection contre les surtensions induit donc un filtrage passe-bas. La fréquence de coupure de ce filtre a été mesurée à 10 MHz.

2.4. Mesure du rayonnement lumineux

Une manifestation classique de l'effet couronne est l'émission lumineuse [8], particulièrement dans la gamme des ultraviolets. La détection et la mesure de l'intensité lumineuse pour les longueurs d'onde correspondantes (400 à 700 nm pour la lumière visible, 100 à 400 nm pour les UV) permettent donc d'obtenir des informations sur l'activité des décharge partielles de type couronne. L'émission de rayons lumineux peut être détectée de manière qualitative, comme on le verra dans le premier paragraphe. Elle peut aussi être mesurée de manière quantitative, ce qui fera l'objet du paragraphe suivant.

Les résultats obtenus avec ces chaînes de mesure sont présentés au paragraphe 4.1.

2.4.1. Détection qualitative des UV - caméra UV

Les caméras UV sont utilisées pour la détection de l'effet couronne sur tous types les d'installations haute-tension. Ces appareils sont capables de localiser les rayonnements UV et de les représenter en temps réel par des taches blanches superposées à l'image de la zone visée.

Dans le cadre de cette étude, une caméra CoroCAM 6D produite par UViRCO a été employée. Placée en face d'un des hublots disposés en bout de maquette (Figure 50), elle permet de superviser le voisinage d'une pointe fixée sur la conducteur haute-tension.

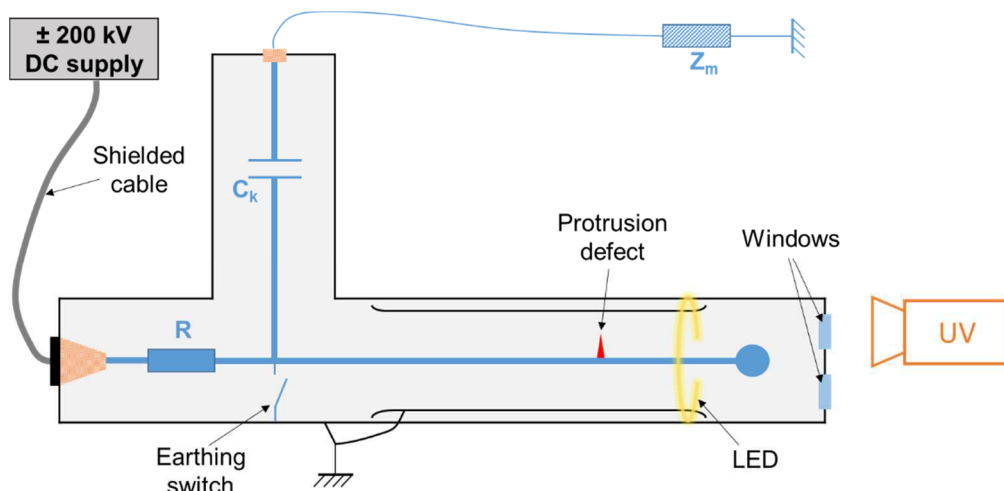


Figure 50 : Schéma du positionnement de la caméra UV en face d'un hublot.

La caméra UV opère une détection pour des longueurs d'onde allant de 240 à 280 nm.

2.4.2. Mesure quantitative de la lumière – Photomultiplicateur

La détection des rayons ultraviolets avec une caméra UV fournit une information qualitative. Il est aussi possible de mesurer précisément l'émission de lumière. Le matériel utilisé à cette fin est un photomultiplicateur (PM) de type Hamamatsu H10721-113, capable de mesurer l'intensité lumineuse dans la gamme 185 – 700 nm.

Les rayonnements émis par un défaut sont collectés grâce à une fibre optique placée à l'intérieur du compartiment de test et dont l'extrémité est dénudée sur 10 mm (Figure 51-b). L'autre extrémité de la fibre optique est extraite du poste et connectée au photomultiplicateur (Figure 51-a). Quand des mesures sont réalisées avec cet appareil, les LED sont éteintes et les hublots placés en bout de maquette sont remplacés par un couvercle fermé, de sorte que la seule lumière mesurée soit celle qui est émise par les DP.

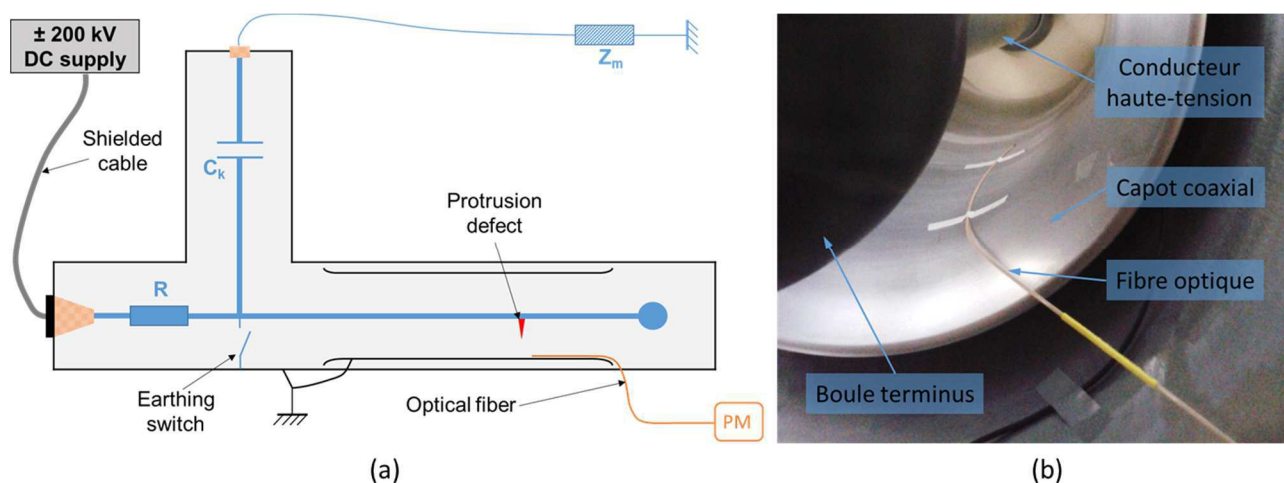


Figure 51 : (a) Schéma de l'implantation du système de mesure des émissions UV avec fibre optique et photomultiplicateur. (b) Photographie de l'implantation de la fibre optique dans le compartiment de test.

La sortie du photomultiplicateur est ensuite reliée à l'électromètre présenté au §2.3.2. On mesure donc finalement un courant qui est l'image de l'intensité de la lumière émise. Les différentes conversions qui interviennent entre ces deux grandeurs sont les suivantes :

- L'intensité lumineuse émise par l'activité couronne est omnidirectionnelle. Elle se mesure en candela (cd). Seule une partie de cette émission parvient à la face optique de la fibre optique. La fibre optique transporte en fait un flux lumineux qui se mesure en lumen (lm). On passe de l'intensité lumineuse au flux lumineux en multipliant par l'angle solide (en stéradian, sr) par lequel la face optique de la fibre optique voit la source du rayonnement.
- Le flux lumineux est amplifié par le photomultiplicateur. Dans ce travail, le gain a été fixé à $2 \cdot 10^6$.
- Le flux lumineux est conduit vers un système d'électrodes qui génère un courant électrique dont l'intensité est proportionnelle à la valeur du flux lumineux. Le facteur de conversion est typiquement $105 \mu\text{A/lm}$. En fonction de la longueur d'onde, la sensibilité varie, comme on peut le voir en Figure 52.

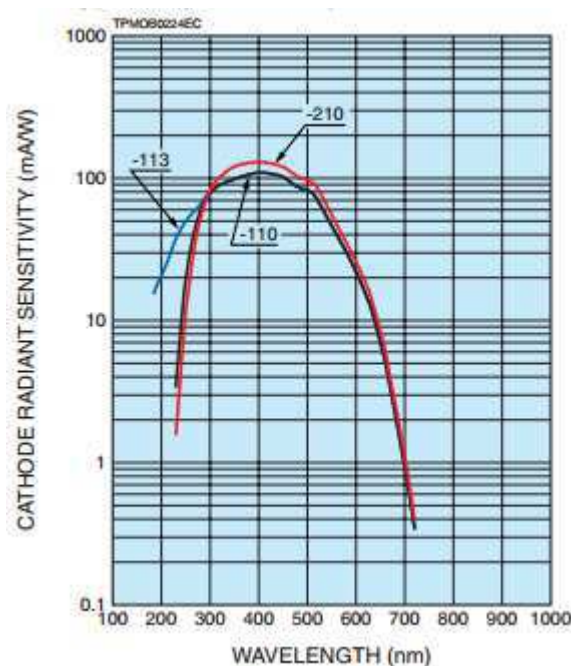


Figure 52 : Sensitivité de la cathode en fonction de la longueur d'onde (courbe bleue -113)

Comme l'angle solide par lequel la fibre optique collecte l'intensité lumineuse du défaut peut varier entre les différents essais, la grandeur restituée dans les résultats sera toujours le courant-image de l'intensité lumineuse.

2.5. Mesure des ondes UHF

La mesure des ondes ultra-haute-fréquence (UHF) émises par les décharges partielles est un moyen de détection et d'identification de plus en plus répandu dans les systèmes AC en

service. Pour évaluer le potentiel de cette méthode en DC, une chaîne de mesure a été mise en place sur notre dispositif expérimental.

Les ondes UHF sont collectées au sein du poste par l'intermédiaire d'une antenne conique installée sur un piquage de l'enveloppe métallique du poste. Ce piquage est situé dans le compartiment de test, à proximité de la boule terminus (Figure 53).

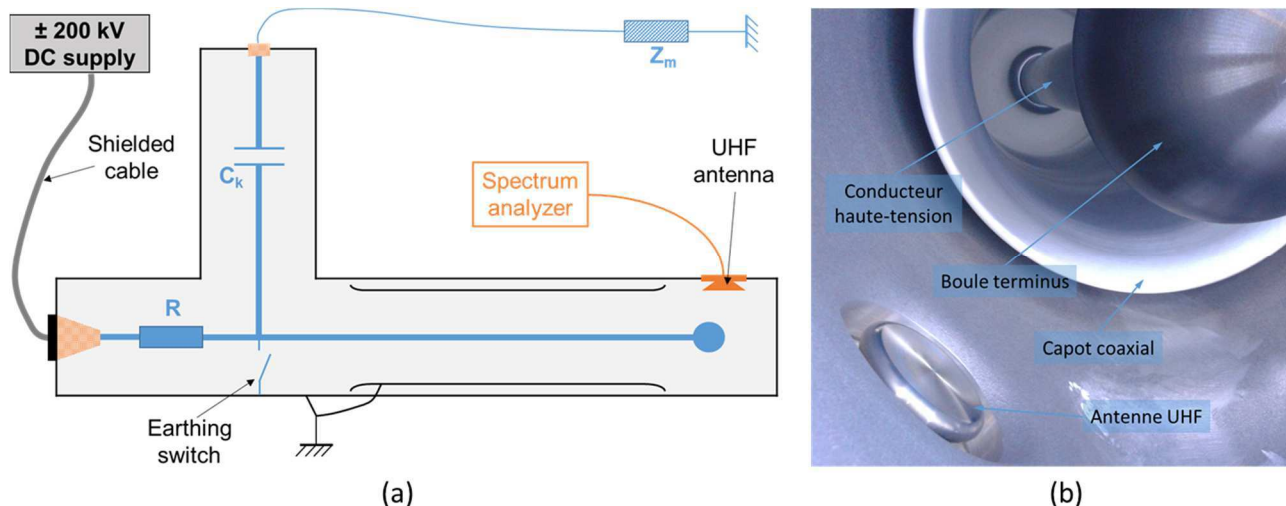


Figure 53 : (a) Schéma de la chaîne de mesure UHF.
(b) Photographie de l'implantation de l'antenne UHF dans le compartiment de test.

Le signal obtenu est traité dans le domaine fréquentiel grâce à un analyseur de spectre HP 8590A. Le spectre du signal est enregistré sur la bande de fréquence 300 – 1800 MHz avec un pas de 3,75 MHz.

Pour un niveau de tension donné, le spectre est acquis pendant 10 secondes grâce à la fonction MaxHold de l'analyseur de spectre. Cette fonction enregistre pour chaque fréquence l'amplitude maximale rencontrée au cours des balayages successifs. L'intérêt de cette manière de procéder est la bonne sensibilité à des impulsions présentant un taux de répétition très faible car toutes les impulsions sont enregistrées. Dans sa thèse, Meijer préconise ce mode de mesure pour des taux de répétition inférieurs à 50 Hz [35]. L'inconvénient est que n'importe quelle perturbation passagère liée à l'environnement a une forte influence sur le résultat de la mesure en faisant apparaître des pics supplémentaires. Pendant ces travaux, les spectres sont relevés plusieurs fois dans chaque configuration. On peut ainsi éliminer un enregistrement qui serait le seul à présenter un pic pour une fréquence où rien n'a été observé dans les autres enregistrements.

Dans certains cas, le signal UHF capté par l'antenne fait l'objet d'une amplification faible bruit de +28 dB sur la bande de fréquence 100 – 3200 MHz. L'amplificateur choisi est produit par R&K sous la référence LA120-OS. Il est alimenté par un système de batterie conçu pendant ces travaux (Figure 54). L'alimentation par batterie a été choisie pour la stabilité de la tension délivrée, contrairement à une alimentation branchée sur le secteur qui peut être sensible aux perturbations électriques.

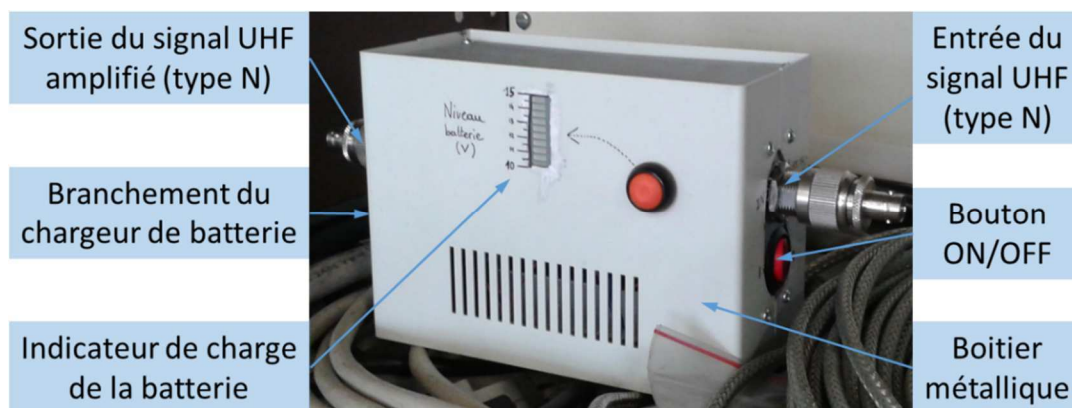


Figure 54 : Intégration du préamplificateur dans un boîtier permettant son alimentation par batterie.

2.6. Protocole expérimental

De nombreux paramètres gouvernent la formation des décharges partielles dans les PSEM. L'influence de la nature du défaut, de la polarité et du niveau de la tension, de la nature et de la pression du gaz sur le comportement des DP sera étudiée dans cette thèse. En conséquence, diverses mesures seront réalisées pour de multiples combinaisons de ces paramètres.

Le protocole expérimental est conçu pour se prémunir contre toute interférence entre des expériences successives, ce qui sera l'objet du premier paragraphe. Dans le second paragraphe, on exposera les dispositions prises pour que toutes les mesures réalisées soient significatives. Le protocole est en effet le garant de la capacité à comparer entre eux les différents résultats obtenus.

2.6.1. Changement de paramètres d'expérimentation

La mise en place de la maquette pour un défaut donné sous une certaine pression de gaz se fait en suivant les étapes suivantes :

- Le compartiment de test est nettoyé grâce à un aspirateur. La présence de poussière ou d'autres particules est ainsi évitée.
- Le défaut choisi est placé dans le compartiment de test (plus de détails au §2.1.3).
- Le compartiment est refermé, et tiré au vide pour atteindre une pression absolue inférieure à 0,1 kPa.
- Le compartiment est rempli avec le gaz désiré (N_2 ou SF_6) à la pression souhaitée, choisie dans la gamme 0,1 – 0,5 MPa.
 - Si le défaut est une particule libre métallique, on veille à ce que le remplissage ne soit pas trop rapide, pour que le flux de gaz ne déplace pas la particule avant le début des essais.

Une fois ces opérations réalisées, les mesures sous tension peuvent avoir lieu. Après les mesures, on réalise les opérations suivantes :

- Si le gaz employé est le SF_6 , le gaz est récupéré jusqu'à ce que la pression absolue dans le compartiment soit inférieure à 0,1 kPa.
- Le compartiment est mis à l'air. La pression en son sein atteint la pression atmosphérique.
- Le compartiment est ouvert, et le défaut retiré.

Dans le cas d'expériences successives réalisées pour le même défaut de type pointe, la procédure est raccourcie. En effet, il n'est pas nécessaire dans ce cas d'ouvrir le compartiment pour retirer le défaut et en placer un nouveau. On peut donc se contenter de changer le gaz. Dans le cas d'un changement de pression du même gaz, le compartiment n'est même pas tiré au vide, et on se contente de modifier la pression en retirant ou en ajoutant du gaz. Quand plusieurs mesures successives sont réalisées avec la même pointe dans le même environnement gazeux, aucune manipulation n'est effectuée.

2.6.2. Application de la tension et mesures

Avant de réaliser des mesures avec des appareils sensibles, il convient de rechercher la tension de claquage. On pourra ainsi rester éloigné de cette tension, pour éviter d'endommager le matériel. Pour déterminer la tension de claquage, le seul appareil qui peut être branché sans danger est l'appareil de mesure conventionnelle des décharges partielles. Une fois la mesure lancée, la tension est augmentée avec une vitesse de 1 kV/s, jusqu'à ce que le claquage se produise ou bien que l'on atteigne la tension maximale que la source DC peut fournir. Si un claquage a eu lieu, on note U_{bd} la tension à laquelle il s'est produit. Sinon, on agit par la suite comme si on avait $U_{bd} = 200$ kV.

Au cours de la recherche de la tension, on peut observer le relevé de DP selon la méthode conventionnelle. Si des décharges partielles sont détectées au-dessus du seuil de détection, on relève la tension U_i à laquelle elles sont apparues. Si on ne détecte pas de DP, on agit par la suite comme si on avait $U_i = 0$ V.

Comme on cherche à caractériser le comportement des décharges partielles sous contrainte DC, il ne suffit pas de balayer la plage de tension pour déterminer l'effet de la tension. Au contraire, il faut observer des paliers de tension dont la durée est grande par rapport aux constantes de temps des phénomènes observés. Les constantes de temps des décharges dans le gaz étant très courtes, les paliers de tension ont une durée de base de 1 min. Cette durée est discutée aux paragraphes 3.2.1.3 et 3.2.2.3.

La plage de tension est balayée par paliers de 10 kV jusqu'à une tension maximale définie de manière à ne pas risquer d'amorcer dans le poste en présence d'un appareil de mesure sensible. Cette tension correspond au palier le plus proche de $U_{bd} - 30$ kV. Quand le dernier

palier de tension est terminé, la tension est ramenée directement à 0 V. La tension entre les paliers est montée à une vitesse maximale de 1 kV/s.

Pour gagner du temps de manipulation, les paliers à basse tension peuvent être omis. Toutefois, on veut être sûr de bien réaliser des mesures au voisinage de la tension d'apparition des décharges partielles. Pour cela, le premier palier observé est le plus proche de $U_i - 20$ kV.

Les principales caractéristiques du profil de tension décrit ci-dessus sont représentées en Figure 55.

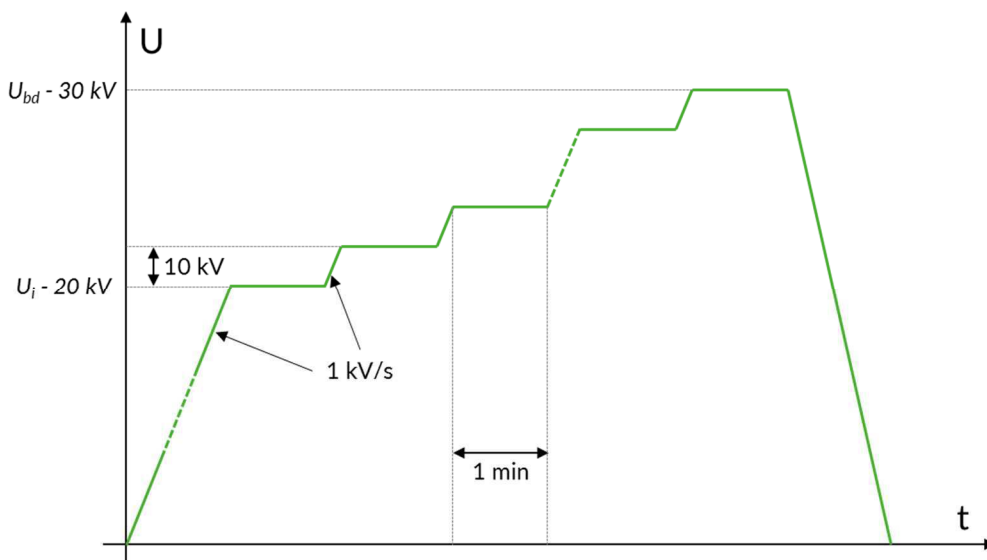


Figure 55 : Profil de tension appliqué pour les mesures sous contrainte DC.

Kreuger souligne d'ailleurs que les régimes transitoires nécessaires à l'établissement de la tension continue produisent des décharges partielles capacitives que l'on doit laisser disparaître avant toute mesure [14]. Cette précaution inutile pour des postes qui fonctionnent sans interruption prend tout son sens lors des essais, raison de plus pour modifier la tension par paliers.

Le fait de réaliser des paliers de tension présente un intérêt supplémentaire quand on réalise des mesures de courant. Comme le dispositif expérimental possède des éléments capacitifs, la variation de tension dans le poste implique un courant capacitif. Les mesures préliminaires ont permis d'établir que le bruit de fond de cette mesure est d'environ 10^{-12} A et que le courant de Townsend ne dépasse pas 10^{-9} A. En comparaison, les courants capacitifs atteignent 10^{-8} à 10^{-7} A, ce qui ne peut pas être négligé. La constante de temps τ du circuit capacitif est le produit de la résistance R et de la capacité C du montage :

$$\tau = R \cdot C \quad (25)$$

Le premier terme est dominé par la résistance de protection de l'alimentation (2.1.1) qui vaut 10 M Ω . Le second terme est composé de la capacité de couplage qui est de 500 pF, et de la

capacité du poste, que l'on estime inférieure à 500 pF. Finalement, cette constante de temps vaut au maximum 10 ms.

La durée des paliers de tension étant grande par rapport à 10 ms, on est assuré que les mesures de courant effectuées pendant les paliers de tension sont bien représentatives du régime stationnaire du courant. Quand le courant généré par le défaut devient grand par rapport au courant capacitif, cette précaution devient superflue.

Chapitre 3. Mesure conventionnelle des décharges partielles en DC

La norme IEC 60270 offre un cadre de référence pour la mesure des décharges partielles, surtout en AC où le retour sur expérience est important. Il est donc naturel de se tourner en premier lieu vers cette méthode de mesure pour étudier le comportement des décharges partielles en DC. L'objectif de ce chapitre est de déterminer quel pourrait être l'apport de cette mesure conventionnelle des décharges partielles en DC pour la détection des défauts dans les PSEM et la compréhension des mécanismes de décharges partielles.

Les résultats obtenus seront comparés avec ceux obtenus par d'autres équipes de recherche dans des dispositifs expérimentaux de taille réduite ou en tension alternative. Cela permettra de mettre en avant d'éventuelles spécificités des décharges partielles mesurées avec la méthode conventionnelle dans un PSEM de taille réelle sous tension continue.

Le premier défaut étudié sera la particule libre métallique. Dans un second temps, le comportement des décharges partielles engendrées par une pointe sur le conducteur haute-tension sera analysé.

3.1. Comportement des particules libres métalliques

L'objectif de ce paragraphe est de caractériser les décharges partielles émises par une particule libre métallique. L'accent sera mis sur les relations entre le mouvement de la particule et le comportement des décharges partielles.

Pour cela, des mesures de décharges partielles selon la norme IEC 60270 ont été réalisées en présence d'une particule libre métallique. La présence de hublots à l'extrémité de la maquette a permis l'observation du mouvement des particules pendant les expériences, de manière à faire le lien avec les décharges partielles mesurées grâce à la méthode conventionnelle.

L'étude débute par l'analyse d'un cas simplifié qu'on ne rencontre pas en conditions réelles : la particule sphérique. On s'intéresse ensuite au comportement de particules filamenteuses plus réalistes. Comme le mouvement des particules filamenteuses est très différent d'une

polarité à l'autre, le cas de la polarité négative et de la polarité positive seront étudiés séparément.

3.1.1. Etude préliminaire : mouvement de va et vient d'une particule sphérique

Afin de mettre en évidence le mouvement de base de va et vient des particules décrit au paragraphe 1.1.3.2, les toutes premières mesures ont été réalisées en présence de particules sphériques en aluminium. Pour ce type de particule, le capot coaxial (§2.1.2) n'a pas été utilisé. Durant ces expériences, les particules ont décollé entre 185 et 200 kV. Le mouvement des particules entre la cuve et le conducteur central était ensuite visible à travers les hublots, et les rebonds sur la cuve étaient clairement audibles par l'opérateur à proximité du poste.

Dans le but de faire le lien entre le mouvement de la particule et les DP, une analyse des décharges partielles a été menée à une pression de SF₆ de 0,5 MPa, en polarité négative. Lors de cette expérience, la particule a décollé à -188 kV. Les intervalles de temps entre les décharges ont été calculés et regroupés dans un histogramme présenté en Figure 56. Sa lecture montre que l'intervalle de temps qui sépare deux décharges successives est distribué autour de 0,14 s, ce qui correspond à une fréquence d'environ 7 Hz.

On interprète le temps de 0,14 s comme le temps d'aller-retour de la particule sphérique entre les électrodes, résultat confirmé par l'analyse initiale de l'opérateur qui entendait le bruit de la particule sur la cuve 6 à 10 fois par seconde. La décharge partielle aurait alors lieu quand la particule est au contact d'une électrode.

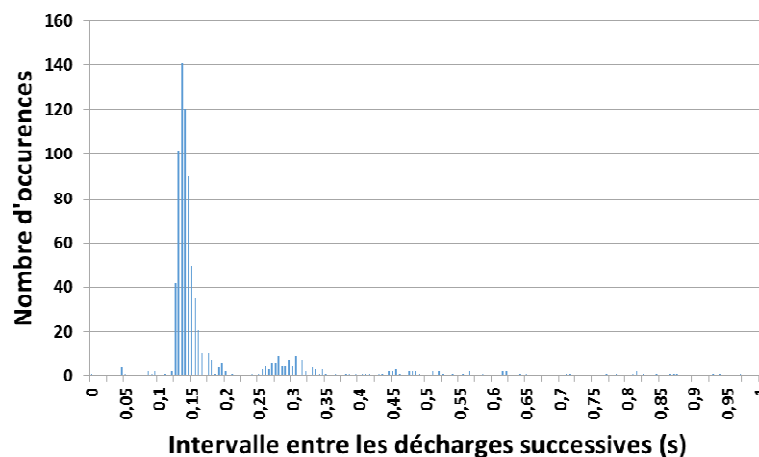


Figure 56 : Distribution des intervalles de temps entre les décharges (> 5 pC) à -200 kV pour une particule d'aluminium sphérique ($\varnothing = 1,5$ mm) sous 0,5 MPa de SF₆.

La deuxième distribution de l'intervalle de décharge observée en Figure 56 autour de 0,28 s peut être expliquée grâce à la Figure 57. L'amplitude des décharges mesurées, aux alentours de 6 pC, étant proche du seuil de détection fixé à 5 pC (§2.2.2), certaines décharges ont pu ne pas être enregistrées à cause de leur trop faible amplitude. Quand une décharge n'est pas détectée, on a l'impression que l'intervalle de temps compris entre la décharge qui la suit et la décharge qui la précède est deux fois plus grand que l'intervalle réel entre deux décharges.

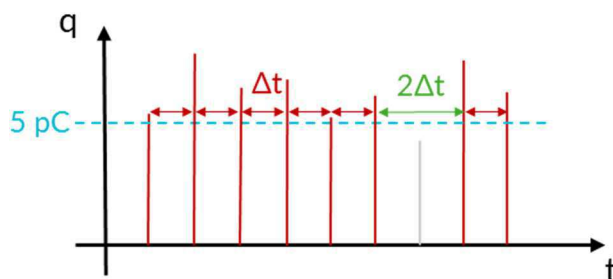


Figure 57 : Mécanisme de doublement de la période mesurée en cas de non-détection d'une décharge.

On conclut de ces observations que le mode de décharge le plus simple pour une particule est le contact avec les électrodes. Ce mode de décharge a une période de l'ordre de 10^{-1} s et n'est pas spécifique à une polarité particulière de la tension.

3.1.2. Comportement des particules filamenteuses en mouvement d'allers-retours (polarité positive)

Les expériences réalisées avec les autres types de particules (fils de cuivre, copeaux d'aluminium, décrits au §2.1.3) en polarité positive permettent également d'observer un mouvement d'aller-retour de la particule entre les électrodes. Ce mouvement est accompagné de décharges partielles mesurées avec la méthode conventionnelle, dont la charge apparente peut atteindre 25 pC. Dans l'azote (N_2), l'amplitude des décharges peut prendre des valeurs plus élevées, jusqu'à 100 pC.

L'analyse des décharges partielles donne un résultat complètement différent des particules sphériques. Toutes les mesures réalisées avec ce nouveau type de particule donnent des intervalles de temps entre les décharges de l'ordre de $10 \mu s$ alors qu'ils étaient supérieurs à 100 ms pour une sphère. Il est peu probable que ce temps très court corresponde à un mouvement d'allers-retours de la particule entre les deux conducteurs, car cela signifierait que la particule se déplace à une vitesse de l'ordre de $10^4 m \cdot s^{-1}$. On en déduit que les décharges mesurées ne correspondent pas uniquement aux contacts de la particule avec le conducteur, mais aussi aux décharges qui se produisent sur les parties saillantes de la particule. Ce phénomène serait favorisé par le fait que de telles particules possèdent des arêtes vives où le champ électrique est localement très fort quand la particule est chargée. C'est également l'hypothèse développée dans [6], [25] sur les décharges générées par des particules filamenteuses en mouvement entre deux électrodes.

L'analyse temporelle des décharges partielles générées par une particule en aller-retour entre les électrodes pourrait nous apporter des informations supplémentaires sur le comportement des DP au cours de ce mouvement. En fait, quand on représente les décharges sur une échelle temporelle, comme en Figure 58 dans 0,1 MPa de SF_6 , les amplitudes et les espacements des décharges semblent aléatoirement répartis. Nous n'avons pas pu dégager de tendances claires quant à l'influence de la pression du gaz sur le comportement des décharges partielles ou sur la tension de décollage des particules.

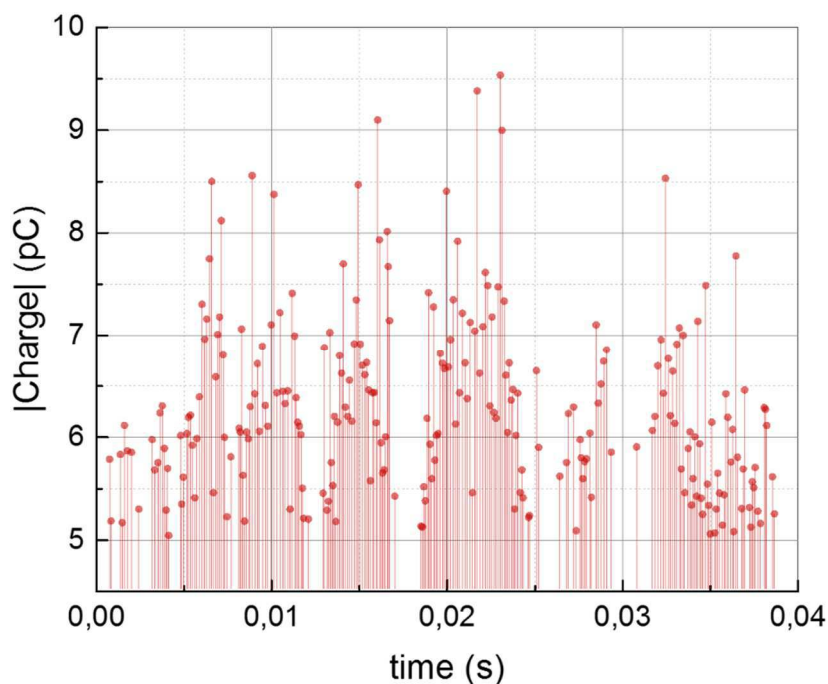


Figure 58 : Décharges partielles enregistrées en présence d'un fil de cuivre ($l = 4 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) en polarité positive dans $0,1 \text{ MPa}$ de SF_6 sous 110 kV .

Les expériences prennent fin lorsque le mouvement de la particule la conduit à un emplacement d'où elle ne peut pas en sortir, notamment les zones de faible champ électrique. Dans le cadre de ces travaux en polarité positive, c'est toujours dans une telle zone que la particule a été trouvée en fin d'expérience. Le cas d'une particule collée en surface d'un isolant solide n'a jamais été rencontré.

Malheureusement, le mouvement de la particule et son piégeage induisent une courte durée d'enregistrement, et donc des données peu abondantes pour chaque expérience. Cela ne nous a pas permis de mener des études sur l'influence des paramètres d'expérimentation, tels que le niveau de tension, la pression du gaz ou encore la forme de la particule.

On retient que le mouvement de la particule a pu être détecté grâce à la mesure conventionnelle des décharges partielles.

3.1.3. Comportement des particules filamenteuses en *firefly* (polarité négative)

Lors des expériences en polarité négative, en présence d'une particule filamenteuse, le principal mouvement observé a été le *firefly* (§1.1.3.2). Les décharges partielles associées ont été mesurées simultanément avec la méthode conventionnelle.

Le mouvement de *firefly* étant plus stable que les allers-retours observés en polarité positive, les données de DP sont un peu plus abondantes. Cela a permis d'analyser l'effet de la tension sur les décharges partielles, puis de chercher un lien entre le mouvement et la production des DP.

3.1.3.1 Effet de la tension sur les DP

Afin de pouvoir étudier l'effet de la tension sur les DP, les mesures ont été réalisées pendant une montée en tension par paliers (protocole défini au §2.6.2). L'enregistrement conjoint au cours du temps de la tension appliquée et des décharges partielles générées par une particule permet de déterminer avec précision l'instant de son décollage et la tension qui était appliquée à ce moment-là. Dans l'exemple de la Figure 59, la particule a décollé à une tension de -141 kV. On détecte cet instant car le niveau de DP passe au-dessus du seuil de détection pour atteindre environ 20 pC à ce moment-là. La charge apparente des DP a tendance à croître avec la tension, jusqu'à 40 pC. Dans l'azote (N_2), l'amplitude des décharges partielles est bien plus importante, puisqu'elle peut atteindre 10 nC. La disparition des décharges partielles quelques minutes plus tard vers -180 kV indique que le mouvement de la particule a cessé. On a constaté à la fin de l'essai qu'elle était piégée dans une zone de faible champ électrique.

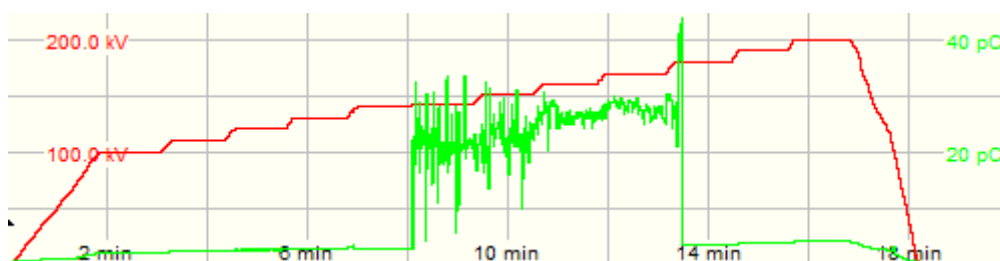


Figure 59 : Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'un copeau d'aluminium ($5 \times 0,5$ mm) dans 0,3 MPa de SF_6 en polarité négative.

Le comportement décrit ci-dessus est celui que l'on observe à chaque expérience effectuée pendant cette thèse : quand la particule tombe dans une zone de faible champ électrique, elle ne décolle plus, et on la retrouve à cet endroit à la fin de l'essai.

On peut s'étonner de n'avoir pas observé en polarité négative d'autres types de mouvement que le *firefly*. Cela tient peut-être au fait que les particules introduites dans le poste ont toujours été posées en position horizontale. Or, on sait que la tension de décollage d'une particule horizontale est plus élevée que la tension de décollage de la même particule en position verticale [24], [106]. La tension de décollage de nos particules serait donc assez élevée pour que le champ électrique à proximité de la barre soit suffisamment intense pour entretenir le phénomène de *firefly*. Cette hypothèse sera confirmée si l'on montre que la tension nécessaire à l'entretien du *firefly* est inférieure à la tension de décollage de nos particules. C'est l'objectif de la démarche décrite ci-dessous :

Nous avons vu comment pouvait être mesurée la tension de décollage d'une particule qui correspond à la tension d'apparition des DP. Afin de déterminer à quelle tension cesse le phénomène de *firefly*, on a modifié le protocole expérimental du §2.6.2 de la manière suivante : au lieu de descendre la tension jusqu'à 0 V à la fin de l'expérience, on a diminué la tension par paliers de 10 kV et 1 min. Un résultat est donné en Figure 60. Lors de cette expérience, on voit que le niveau de DP est resté inférieur au seuil de détection

jusqu'à -180 kV. Quand cette tension est atteinte, on observe des décharges partielles d'amplitude supérieure à 20 pC. On déduit que la particule s'est mise en mouvement. Dans la suite de l'expérience, la charge apparente des décharges partielles garde un niveau haut jusqu'à ce que la tension soit redescendue à -140 kV. On en déduit que le phénomène de *firefly* est entretenu quand la tension redescend jusqu'à -140 kV, tension largement inférieure à la tension de décollage. En fait, le phénomène de *firefly* peut être entretenu pour des niveaux de tension plus faibles que la tension de décollage, car il se produit à proximité du conducteur haute-tension, où le champ électrique est plus élevé que sur l'enveloppe.

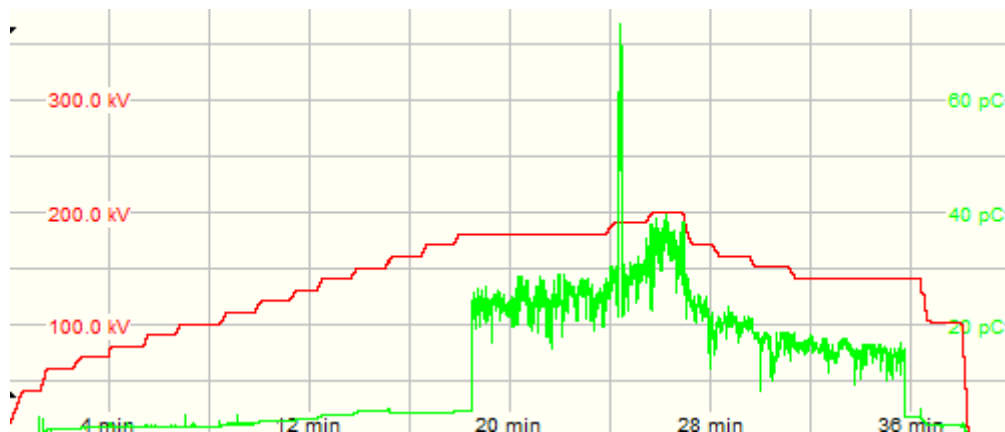


Figure 60: Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'un fil de cuivre ($l = 4 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \text{ }\mu\text{m}$) dans 0,1 MPa de SF_6 en polarité négative.

On explique ainsi que le phénomène de *firefly* ait dominé les résultats de nos expériences.

3.1.3.2 Lien entre le mouvement et les DP

L'analyse temporelle des décharges partielles mesurées pendant un court laps de temps permet de mettre en évidence un comportement particulier. Sur l'exemple de la Figure 61-a, on peut observer que les décharges se produisent par groupes espacés d'environ 20 ms. Les décharges observées au centre de chaque groupe présentent une charge apparente plus faible et une densité plus élevée que les décharges observées au début et à la fin des groupes. En Figure 61-b, on remarque qu'un motif est répété avec une période de 3 ms. Là aussi, les décharges se succèdent plus rapidement quand leur charge apparente est faible.

Hypothèses sur le mouvement :

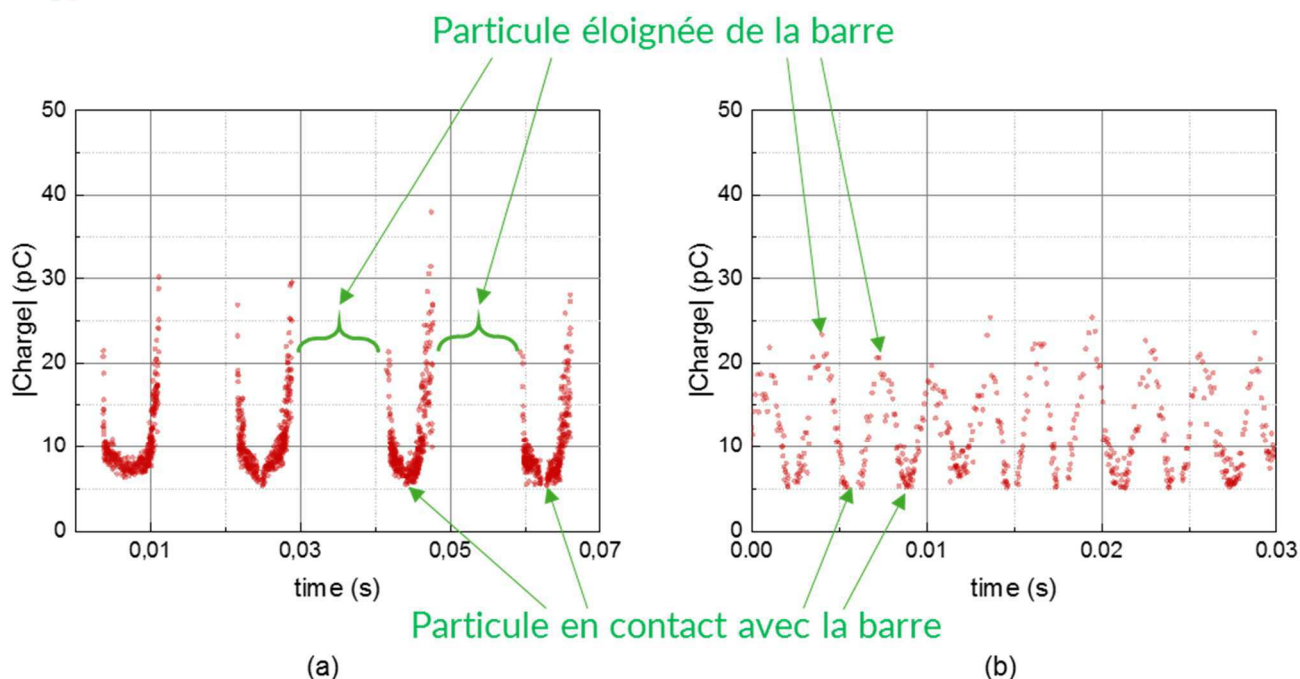


Figure 61 : Décharges partielles enregistrées en présence d'un fil de cuivre ($l = 4 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) en polarité négative
(a) dans 0,1 MPa de SF_6 sous -150 kV ; (b) dans 0,3 MPa de SF_6 sous -200 kV

Or, on sait que le mouvement de *firefly* est composé de courts rebonds de la particule sur le conducteur central [27]. On peut donc formuler l'hypothèse suivante : les périodes de 3 et 20 ms correspondraient à la période du mouvement de la particule à proximité de la barre conductrice pendant les expériences correspondantes. Le comportement commun à la Figure 61-a et à la Figure 61-b étant la présence de décharges soutenues et de faible amplitude, on peut penser que ces épisodes correspondent aux moments où la particule est la plus proche de la barre. Les épisodes où l'on ne mesure pas de décharges ne se produisent que lorsque la période est plus grande (Figure 61-a) ; on suppose donc qu'ils se produisent quand la particule est plus éloignée de la barre.

3.1.3.3 Influence de la nature et de la pression du gaz sur les DP

Afin de comprendre l'influence de la nature et de la pression du gaz sur les DP, des mesures de DP ont été réalisées en présence d'une particule pour différentes pressions de SF_6 et d'azote entre 0,1 et 0,5 MPa.

Dans le SF_6 à basse pression (0,1 à 0,3 MPa), la plupart des enregistrements ont permis de dégager facilement des motifs périodiques. Pour les hautes pressions (0,4 à 0,5 MPa), il est plus difficile de dégager des motifs périodiques à partir des enregistrements de DP, même si les autres caractéristiques des DP (notamment la charge apparente) restent semblables. On suppose donc que le mouvement de *firefly* est simplement moins régulier dans le SF_6 à haute pression.

Dans tous les cas, aucune corrélation n'a pu être établie entre la fréquence des motifs et la pression, ni même avec le niveau de tension.

Dans l'azote, les expériences menées à basse pression (0,1 à 0,3 MPa) n'ont pas permis d'observer de DP car le décolage de la particule entraînait l'amorçage dans le poste. Pour les plus hautes pressions (0,4 à 0,5 MPa), les motifs périodiques ont bien pu être observés, d'autant que l'amplitude des décharges partielles pouvait atteindre plusieurs nC.

Ces comportements peuvent être résumés dans le tableau de la Figure 62 :

		Pression	
		0,1 - 0,3 MPa	0,4 - 0,5 MPa
Gaz	SF ₆	Motifs de DP périodiques (5 - 100 pC)	Périodicité floue des motifs de DP (5 - 100 pC)
	Azote	Amorçage	Motifs de DP périodiques (200 - 10 000 pC)

Figure 62 : Comportement des décharges partielles en fonction de la nature et de la pression du gaz.

La pression du gaz a finalement peu d'influence sur le comportement des DP lors du mouvement de *firefly*.

3.1.4. Bilan

L'objectif de cette partie était d'une part de savoir si la méthode conventionnelle était adaptée à la mesure des décharges partielles produites par une particule libre en DC, et d'autre part d'obtenir grâce à elle un maximum d'informations sur le comportement des décharges partielles.

Dans toutes les configurations étudiées, une particule qui se déplace produit des décharges partielles mesurables par la méthode conventionnelle. Cette méthode semble donc pertinente pour la détection des particules libres métalliques dans les PSEM en DC.

Selon le type de particule et la polarité, le mouvement de la particule est différent. Les particules sphériques font des allers - retours entre les électrodes, de même que les particules filamenteuses en polarité positive. Les particules filamenteuses en polarité négative ont principalement un mouvement de *firefly*.

L'analyse temporelle des décharges partielles a révélé que le mouvement des particules était le premier facteur qui détermine le comportement des décharges partielles. La pression du gaz a peu d'impact sur le comportement des DP.

Le lien particulier des décharges avec le mouvement des particules est une opportunité pour l'identification des défauts. On pourrait en effet identifier le type de mouvement des particules à partir de l'enregistrement des décharges partielles qu'elle produit.

3.2. Comportement des défauts de type pointe sur le conducteur haute-tension

La présence d'une pointe sur le conducteur haute-tension d'un PSEM réduit la tenue diélectrique de ce dernier. Il est donc indispensable de pouvoir détecter la présence d'un tel défaut. On se demande ici si la méthode conventionnelle de mesure des décharges partielles permettrait d'atteindre cet objectif en DC. Plus généralement, on souhaite caractériser le comportement des DP mesurées selon IEC 60270 en présence d'une pointe en DC. Pour cela, des mesures de décharges partielles conformes à la norme IEC 60270 ont été réalisées dans le cadre de cette étude en présence d'une pointe fixée sur le conducteur haute-tension. Les pointes employées sont décrites au §2.1.3.

L'influence de plusieurs paramètres sera explorée, notamment la polarité et le niveau de la tension, la nature et la pression du gaz, et la durée d'application de la tension. On cherchera à comprendre l'influence de ces paramètres sur le comportement général des décharges, mais également sur leur comportement séquentiel.

Il est admis que le corona positif et le corona négatif sont deux phénomènes complètement différents. D'ailleurs, quand les études à ce sujet ne se concentrent pas sur un seul de ces deux phénomènes, elles les traitent dans des parties séparées. Pour cette raison, l'étude des décharges partielles générées par une pointe dans l'azote sera d'abord menée en polarité positive (§3.2.1) puis en polarité négative (§3.2.2). La caractérisation des décharges dans le SF₆ fera l'objet du paragraphe 3.2.3.

3.2.1. Comportement des défauts de type pointe dans l'azote (N₂) en polarité positive

L'objectif de cette partie est la caractérisation des décharges partielles engendrées par une pointe fixée sur le conducteur haute-tension dans de l'azote (N₂) en polarité positive. Cette caractérisation est menée grâce à des mesures de décharges partielles réalisées dans le cadre de ces travaux conformément à la norme IEC 60270.

Plusieurs paramètres qui influencent la formation des décharges partielles seront étudiés. Tout d'abord, on observera l'évolution des DP quand la tension varie entre 0 et 200 kV. On s'intéresse ensuite à l'influence de la pression sur la plage 0,1-0,5 MPa. Puis, l'effet de la durée d'application de la tension sera évalué. La caractérisation sera complétée par une réflexion sur la répétabilité et la reproductibilité des mesures.

3.2.1.1 Influence du niveau de tension sur la formation des DP

On commence par caractériser l'effet de la tension sur la formation et la détection des décharges partielles en présence d'une pointe fixée sur le conducteur haute-tension. On se

place pour cela à une pression d'azote donnée, et on opère une montée en tension positive conforme au protocole du §2.6.2 ; le comportement observé est comme suit:

- Pour les plus faibles tensions, on ne mesure pas de décharges partielles (zone A sur la Figure 63-a).
- A partir d'une certaine tension U_i , on mesure des décharges partielles grâce à la méthode conventionnelle, mais ces décharges sont intermittentes (zone B sur la Figure 63-a). Cela signifie qu'on observe alternativement des périodes de plusieurs secondes où on mesure les DP en grande quantité et des périodes où on n'en mesure pas (Figure 63-b).
- Ce comportement se poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne la tension de claquage U_{bd} .

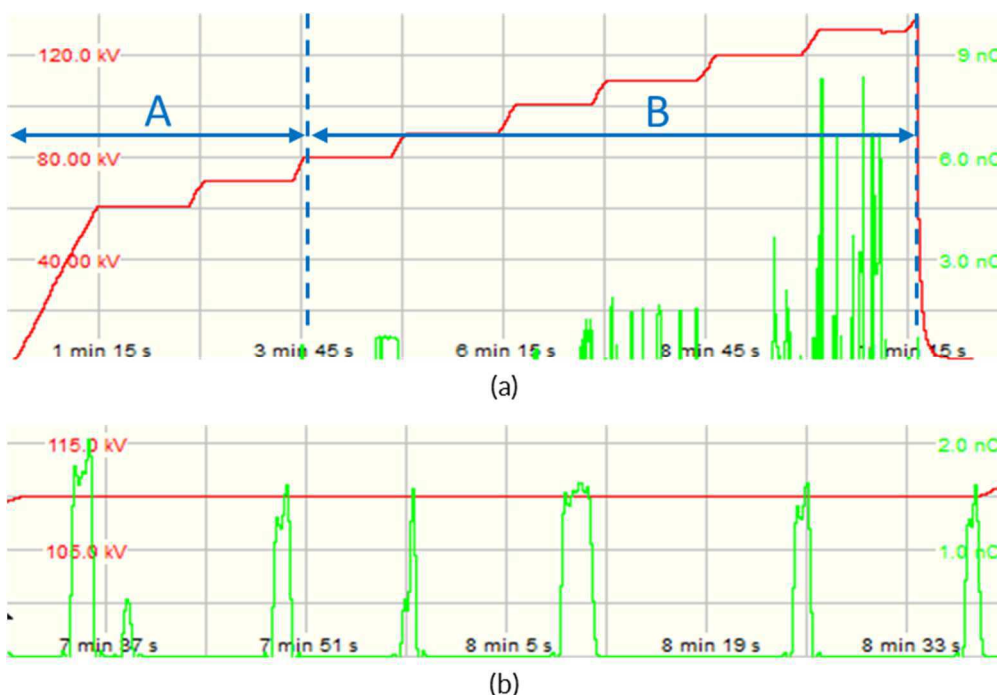


Figure 63 : (a) Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension dans 0,3 MPa d'azote (N_2) en polarité positive ;
(b) Agrandissement du profil précédent pendant le palier à 110 kV.

Le comportement intermittent des décharges dans la deuxième phase décrite ci-dessus ($U_i < U < U_{bd}$) pourrait tirer son origine du caractère aléatoire de l'apparition d'une décharge sous forme d'impulsion quand un défaut de type pointe est soumis à une tension positive. Ce caractère aléatoire résulte du fait qu'un électron libre est nécessaire à la création d'une décharge [107]. Quand une première décharge a eu lieu, la disponibilité des électrons est accrue ce qui permet de déclencher de nouvelles avalanches. On explique ainsi qu'on puisse finalement mesurer des séquences d'impulsions. Cela est confirmé par plusieurs études [2], [22] qui montrent en outre que la présence d'impuretés dans le gaz, notamment l' O_2 , favorise la formation de trains d'impulsions.

De manière expérimentale, on retrouve l'allure générale des décharges partielles par séquences dans les expériences de Liu *et al.* [108] menées dans l'air à pression atmosphérique avec une géométrie proche du montage utilisé dans cette thèse.

→ Effet de la tension sur le comportement séquentiel des DP

Pour étudier l'effet de la tension sur le comportement séquentiel des décharges, on peut tracer pour différents niveaux de tension la caractéristique $q(\Delta t)$, où chaque point représente une décharge, implantée selon les coordonnées suivantes : en abscisse l'intervalle de temps qui sépare la décharge de la précédente, et en ordonnée la charge apparente de la décharge (voir la Figure 98 du §5.1.1). La Figure 64 en est un exemple pour une mesure réalisée dans 0,27 MPa d'azote.

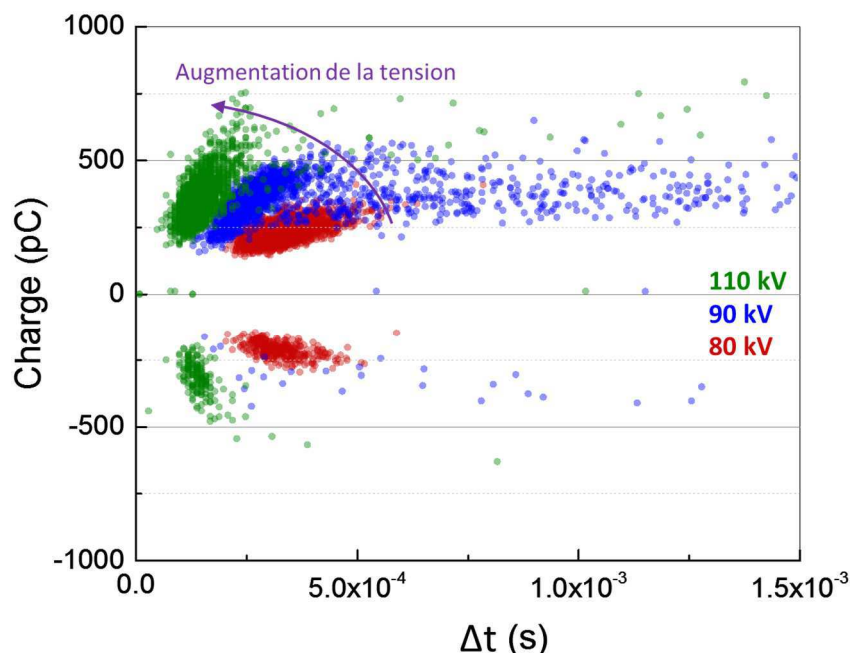


Figure 64 : $q(\Delta t)$: répartition des amplitudes et des intervalles de temps séparant les DP lors d'épisodes de décharges enregistrées sous différentes tensions positives en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \text{ }\mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,27 MPa d'azote (N_2).

On y observe tout d'abord que si l'on considère l'ensemble des DP mesurées lors d'un épisode de décharges, les grandeurs représentées prennent des valeurs dans un certain intervalle. A 80 kV par exemple (le nuage de points rouges), la charge apparente est bornée entre 150 et 300 pC et l'espacement temporel entre 200 et 500 μs . On note ensuite une corrélation entre l'espacement des DP et leur charge apparente, corrélation qui se traduit par des distributions en forme d'ellipse.

Ce constat est une opportunité pour l'identification des défauts. On pourrait grâce à la forme de ce diagramme reconnaître les DP générées par une pointe positive (§5.1.1).

Enfin, l'étude de ces relevés montre que l'augmentation de la tension entraîne une diminution de l'intervalle de temps entre les décharges, c'est-à-dire une augmentation de la fréquence

des décharges. Ce dernier résultat est cohérent avec les résultats d'études réalisées dans des maquettes réduites contenant un défaut de type pointe [46]. Physiquement, Morrow a montré la relation entre la mobilité des ions positifs et la fréquence des décharges de corona positif, qui ont pratiquement un lien de proportionnalité [46]. Or, lorsque la tension augmente, le champ électrique augmente lui aussi. Cela entraîne une hausse de la mobilité des ions positifs, d'où l'accroissement de la fréquence des décharges.

3.2.1.2 Influence de la pression sur les DP en présence d'une pointe positive dans l'azote

Afin de caractériser l'effet de la pression sur la formation des décharges partielles en présence d'une pointe en polarité positive, on applique des montées en tensions identiques (protocole décrit au §2.6.2) pour différentes conditions de pression, entre 0,1 et 0,5 MPa. Pendant chaque expérience, on relève la tension d'apparition des décharges partielles U_i et la tension de claquage U_{bd} . Le relevé de ces tensions caractéristiques pour toutes les pressions permet d'obtenir dans le plan (*Pression, Tension*) les frontières de trois régions distinctes :

- La première se situe avant l'apparition des décharges partielles : $U < U_i$.
- La deuxième se situe au-delà de l'apparition des décharges partielles et en dessous de la tension de claquage : $U_i < U < U_{bd}$.
- La dernière se situe au-delà de la tension de claquage : $U > U_{bd}$.

On trouve en Figure 65 un exemple du tracé de ces frontières dans le cas d'une pointe de longueur 5 mm et de diamètre 500 μm pour des pressions d'azote allant de 0,1 à 0,5 MPa.

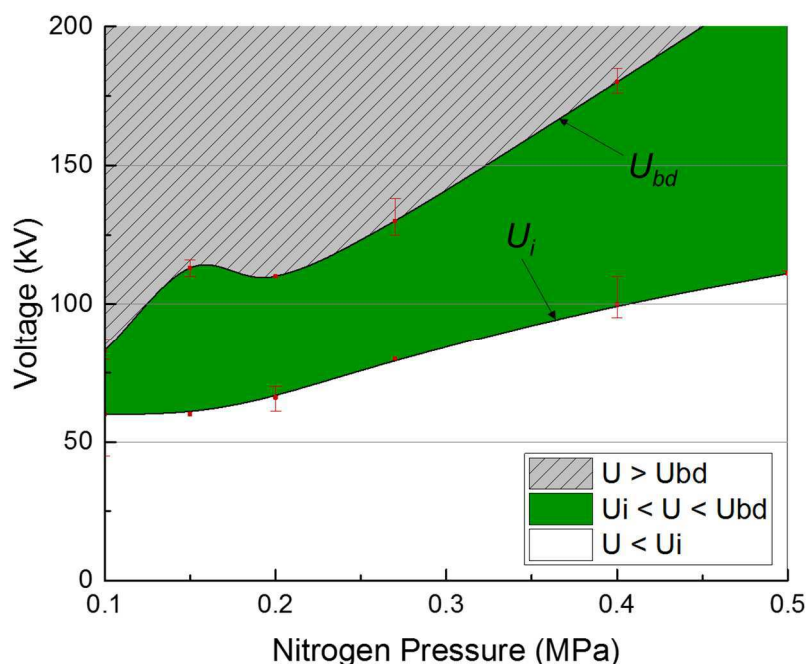


Figure 65 : Régions délimitées par les courbes des tensions d'apparition des DP et de claquage en fonction de la pression d'azote (N_2) en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension en polarité positive.

On y voit que sur la plage 0,1-0,5 MPa, la tension d'apparition U_i des décharges partielles est une fonction croissante de la pression. Ce résultat est cohérent avec les résultats obtenus dans la littérature pour des maquettes réduites de défaut de type pointe [19], [21], [109]. L'allure de la courbe qui donne la tension de claquage U_{bd} en fonction de la pression est également familière puisqu'on la retrouve aussi bien dans l'air [21], [110] que dans des mélanges N_2/SF_6 [47] pour des études réalisées dans des maquettes réduites.

→ Influence de la pression sur le comportement séquentiel des DP

On peut aussi évaluer l'influence de la pression sur le comportement séquentiel des décharges en comparant les décharges produites à un niveau de tension donné pour plusieurs pressions d'azote différentes. Pour cela, on représente le diagramme $q(\Delta t)$ dans différentes conditions de pression pour une tension donnée, par exemple 80 kV en Figure 66. Cette figure montre que l'augmentation de la pression tend à augmenter l'intervalle de temps entre les décharges. D'un point de vue physique, l'augmentation de la pression se traduit par une diminution de la mobilité des ions positifs. Il a été montré que cela impliquait effectivement une baisse de la fréquence des décharges [46].

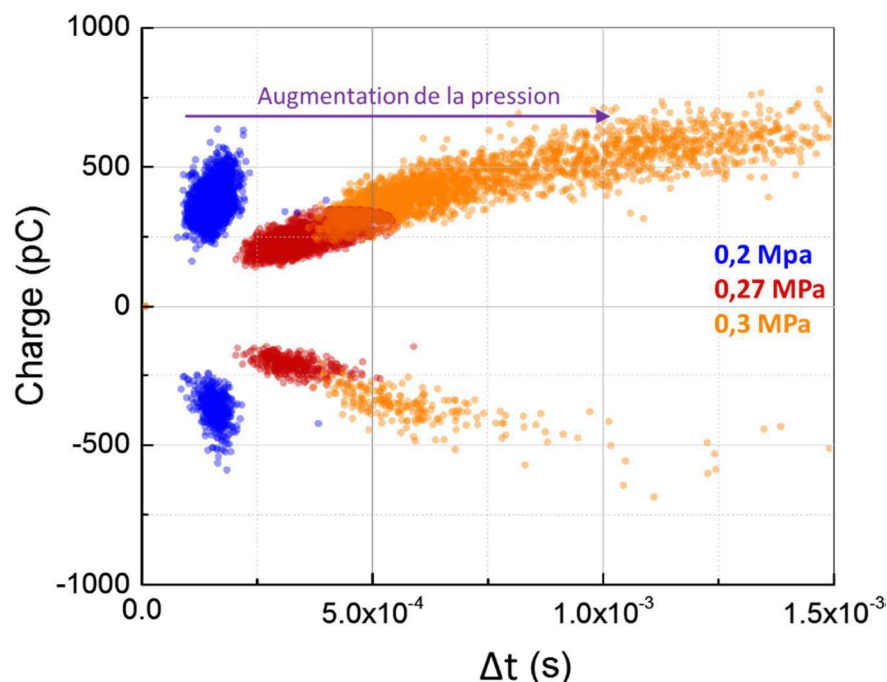


Figure 66 : $q(\Delta t)$: Répartition des amplitudes et des intervalles de temps séparant les DP lors d'épisodes de décharges enregistrés à 80 kV sous différentes pressions d'azote (N_2) en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension.

La pression a donc bien une influence sur le comportement des décharges partielles engendrées par une pointe positive dans les PSEM DC. Cette influence devra être prise en compte pour la reconnaissance des défauts (§5.1.2).

3.2.1.3 Influence de la durée d'application de la tension sur les DP en présence d'une pointe positive dans l'azote

Afin d'évaluer l'effet de la durée d'application de la tension, le protocole expérimental défini au §2.6.2 a été modifié en remplaçant la durée des paliers de tension de 1 minute par des paliers de 5 minutes, puis de 15 minutes. Le résultat peut être observé en Figure 67, où l'on peut comparer les enregistrements de DP pour des paliers de durées différentes dans le cas d'une pointe dans 0,3 MPa d'azote. Les seules différences observées portent sur les moments où les séquences de décharges surviennent ou la durée de ces séquences. On a vu au §3.2.1.1 que ces grandeurs relèvent de toute façon de l'aléatoire. Finalement, aucune différence qualitative n'est observée. Cela s'explique probablement par les faibles valeurs des constantes de temps qui gouvernent le phénomène de recombinaison dans l'azote.

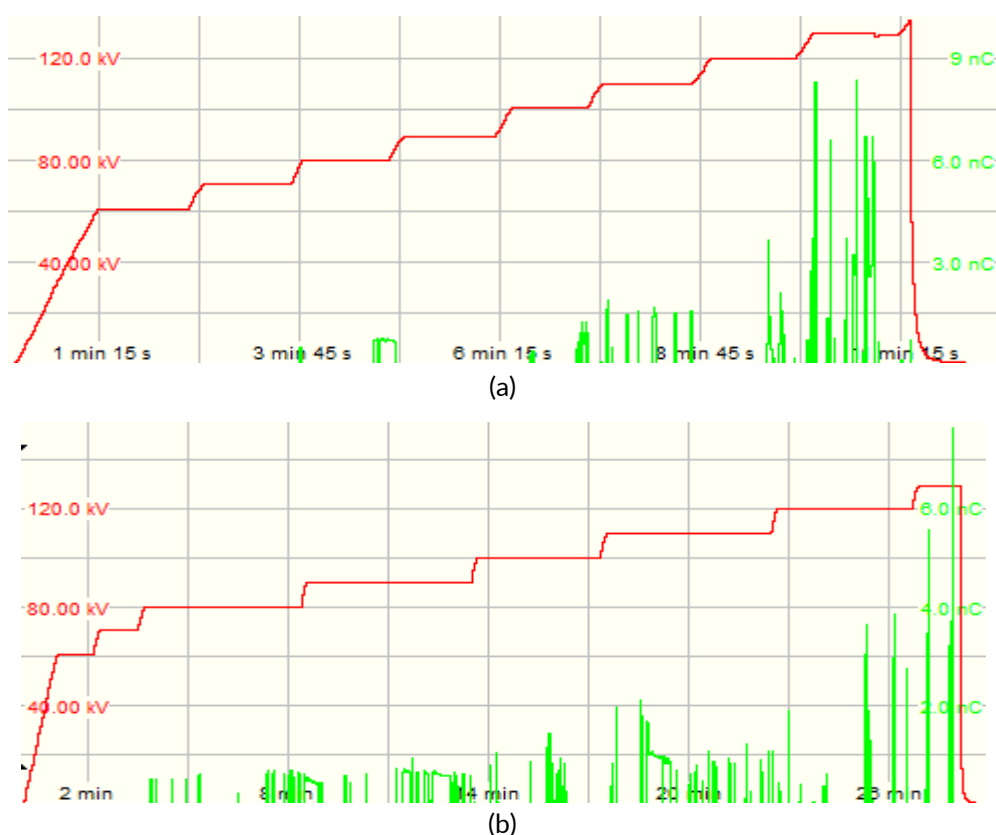


Figure 67 : Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \text{ }\mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension dans 0,3 MPa d'azote (N_2) en polarité positive.
(a) Selon le protocole défini au §2.6.2 ; (b) Paliers de 5 min.

Ces observations permettent de conclure que pour des échelles de temps de quelques secondes à 15 minutes, la durée d'application de la tension n'a pas d'effet sur la formation des décharges partielles en présence d'une pointe dans l'azote pour la gamme de pression étudiée.

Pour obtenir des données caractéristiques des décharges partielles, il n'est donc pas nécessaire d'observer un long palier de tension qui viserait à atteindre un régime stationnaire. Les premières mesures réalisées sont aussi pertinentes que les suivantes.

En revanche, si l'on veut tester la présence ou non de décharges partielles, il est important de faire une expérience assez longue pour que puisse survenir un épisode de décharges et que l'on ne soit pas induit en erreur par une période sans détection alors qu'un défaut est présent.

Des constantes de temps plus longues entrent en jeu dans les PSEM, notamment la charge des isolants solides. Malheureusement, aucune expérience n'a pu être réalisée sur une telle échelle de temps, pourtant pertinente à l'échelle de la vie d'un poste sous tension.

3.2.1.4 Répétabilité et reproductibilité des mesures de DP en présence d'une pointe positive dans l'azote

La reproductibilité de la mesure des décharges partielles en DC selon la méthode conventionnelle a été mise en cause par une étude menée conjointement dans plusieurs laboratoires haute-tension pour des défauts de type cavité dans un isolant solide [104]. Dans l'article cité, on montre que les mesures de DP réalisées dans un même laboratoire sont dispersées, et que d'un laboratoire à l'autre, le même échantillon peut donner des mesures très différentes.

La question de la répétabilité et de la reproductibilité des mesures de décharges partielles en DC avec la méthode conventionnelle se pose de la même manière pour les défauts de type pointe. Pour y répondre, des mesures réalisées dans les mêmes conditions expérimentales sont comparées. Dans l'exemple de la Figure 68, on a réalisé une première mesure de DP en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension dans 0,15 MPa d'azote (N_2) en polarité positive sans mesurer aucune DP au-dessus du seuil de détection de 5 pC (Figure 68-a). Quelques minutes après, et sans aucune intervention sur la maquette, une deuxième mesure est réalisée, pendant laquelle on relève plusieurs épisodes de décharges soutenues (Figure 68-b).

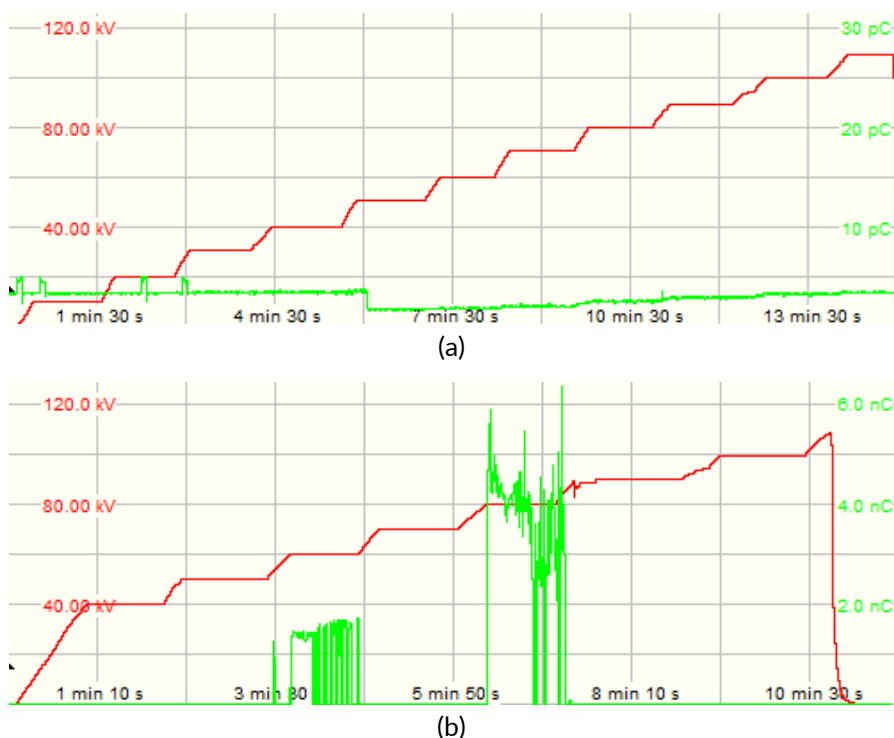


Figure 68 : Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours de deux expériences consécutives en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension dans 0,15 MPa d'azote (N_2) en polarité positive.
(a) Première expérience ; (b) Seconde expérience.

Les enregistrements réalisés dans d'autres conditions expérimentales donnent la même conclusion : d'une mesure à l'autre, les décharges partielles enregistrées en présence d'une pointe positive dans les mêmes conditions peuvent produire des relevés très différents. Il est important de remarquer que lorsque des DP sont mesurées dans les mêmes conditions expérimentales, elles conservent les mêmes caractéristiques d'amplitude et de fréquence. Pour résumer, les décharges partielles générées par les pointes en polarité positive dans l'azote gardent les mêmes caractéristiques, mais elles sont instables et intermittentes, ce qui peut rendre difficile les comparaisons entre différents essais, voire entre des essais menés lors de différentes campagnes de mesure. Ceci nous fait conclure qu'à l'échelle de la minute, les mesures ne sont pas répétables, ni reproductibles. Elles le deviennent si on prend la peine d'attendre suffisamment longtemps pour observer des décharges partielles et que l'on compare entre eux les épisodes de DP.

Cela pourrait poser problème pour la détection des pointes en polarité positives dans l'azote avec la méthode conventionnelle, car un enregistrement vierge de décharges partielles ne prouverait pas l'absence de défaut. Une solution pourrait être d'augmenter la durée des mesures. De cette manière, on augmenterait la probabilité que se produise un épisode de décharge. Seul un très long temps sans décharge serait alors la preuve de l'absence de défaut.

La méthode conventionnelle est capable de détecter les défauts de type pointe positive dans l'azote, mais la prudence est de mise si l'on ne détecte pas de DP.

3.2.2. Comportement des défauts de type pointe dans l'azote (N_2) en polarité négative

Après avoir caractérisé le comportement des décharges partielles en présence d'une pointe positive dans de l'azote (N_2), on présente les résultats obtenus en polarité négative. Les pointes employées sont décrites au §2.1.3.

Dans le premier paragraphe, on montre comment le niveau de tension détermine le comportement des décharges partielles mesurées avec la méthode conventionnelle entre 0 et -200 kV. On s'intéresse ensuite à l'effet de la pression sur la formation des DP entre 0,1 et 0,5 MPa. Puis, on étudie les conséquences d'une modification de la durée d'application de la tension continue sur les décharges enregistrées conformément à la norme IEC 60270. Enfin, la réflexion entamée en polarité positive sur la répétabilité et la reproductibilité de la mesure des DP est étendue aux mesures en polarité négative.

3.2.2.1 Influence du niveau de tension sur la formation des DP

Le comportement des décharges partielles engendrées par un défaut n'est pas le même selon la tension à laquelle il est soumis. Dans ce paragraphe, on met en évidence les différents comportements que l'on peut rencontrer en fonction du niveau de tension en présence d'une pointe négative dans l'azote. On se place pour cela à une pression donnée, et on met le défaut sous tension en suivant le protocole défini au §2.6.2. On trouve des exemples de résultats en Figure 69 pour une pression d'azote de 0,2 MPa et de 0,5 MPa. Au cours d'une montée en tension négative, voici quel est le comportement observé en présence d'une pointe :

- Pour les plus faibles tensions, on ne mesure pas de décharges partielles (zone A sur la Figure 69).
- A partir d'une certaine tension U_i , on mesure des décharges partielles grâce à la méthode conventionnelle (zone B sur la Figure 69).
- A partir d'une certaine tension U_{lim} , on cesse de détecter des décharges avec la mesure conventionnelle (zone C sur la Figure 69-a).
- On atteint la tension de claquage U_{bd} .

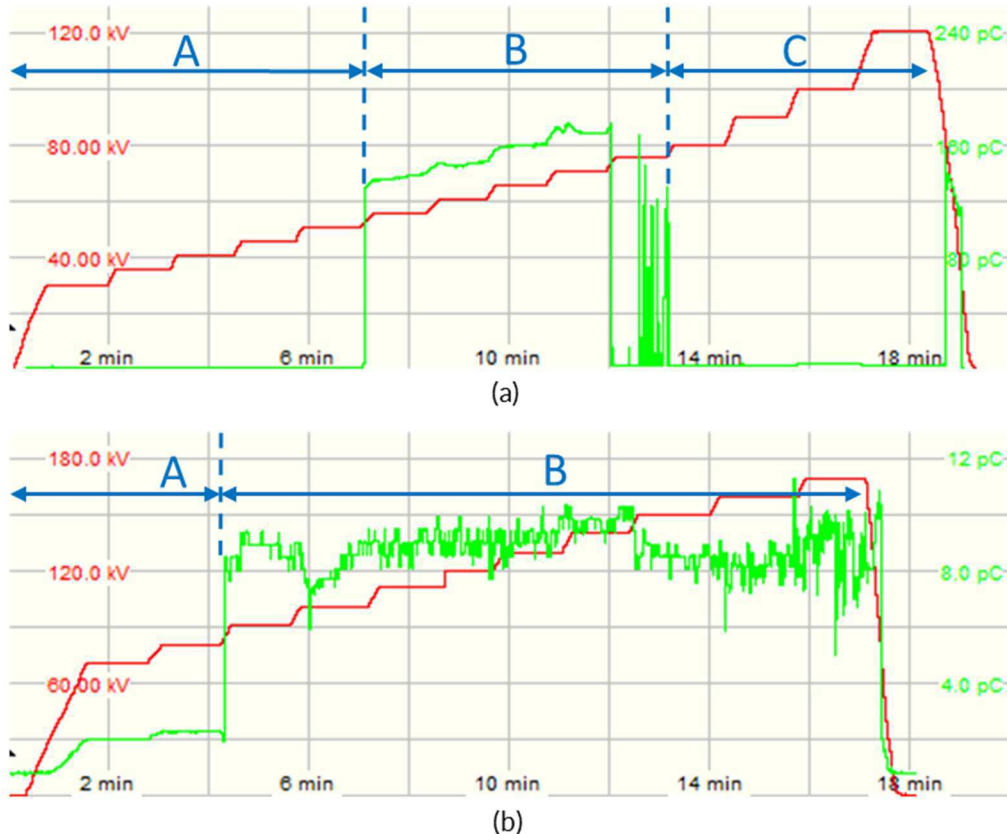


Figure 69 : Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension en polarité négative.
(a) dans 0,2 MPa d'azote ; (b) dans 0,5 MPa d'azote (N₂).

La disparition de la détection des impulsions de DP à partir d'un certain niveau de tension est attestée dans une maquette réduite contenant une pointe négative dans l'air en DC [19], [110], [111] et en AC [112]. D'ailleurs, l'augmentation de la distance inter-électrodes a pour effet l'élargissement de la plage de tension où l'on n'observe plus les impulsions de Trichel [110]. Il est donc naturel que cette plage de tension soit d'autant plus importante dans nos travaux réalisés dans un PSEM que dans les études citées ci-dessus. En effet, le gap dans un PSEM est plus grand que dans les maquettes réduites (100 mm au moins contre 10 à 60 mm). Pour confirmer ces résultats dans un PSEM, on se propose de faire la comparaison avec les résultats que l'on obtiendrait en tension alternative, où le retour d'expérience est plus important. Pour cela, la maquette expérimentale contenant une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) a été raccordée à un générateur de tension alternative et remplie d'azote à 0,1 MPa. Quelle que soit la tension efficace, on a mesuré avec la méthode conventionnelle des décharges de 110 à 130 pC si et seulement si la tension *instantanée* était comprise entre 24 et 37 kV (Figure 70). Au sommet de l'onde de tension, quand la tension instantanée dépasse 37 kV, aucune DP n'est détectée. On retrouve bien qualitativement l'existence d'une plage de tension précise pour laquelle des décharges partielles sont mesurées avec la méthode conventionnelle, et au-delà de laquelle on n'en mesure plus. Les limites de cette plage de tension sont comparables avec les valeurs trouvées pour le DC.

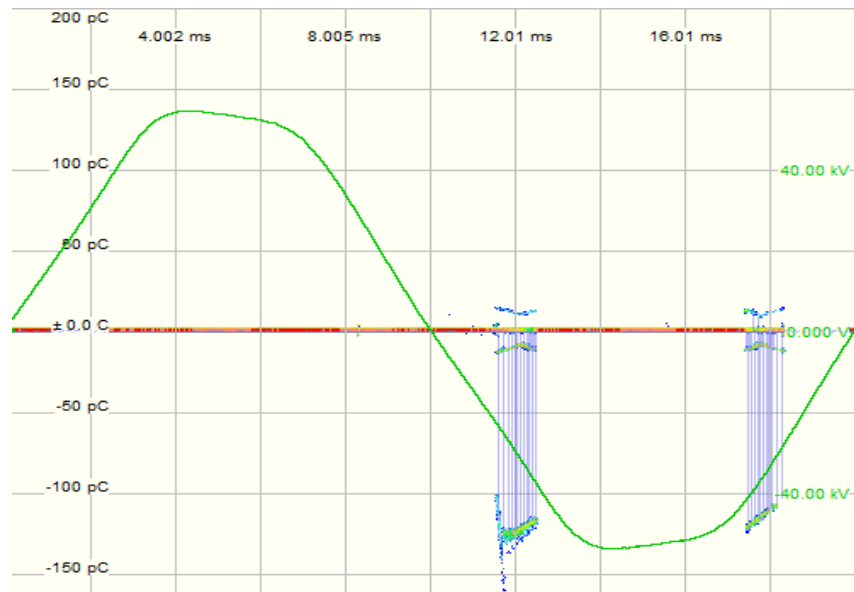


Figure 70 : PRPD pattern en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension dans 0,1 MPa d'azote, sous une tension alternative de 40 kV efficace.

Cela n'empêche pas la détection en AC, puisque la tension instantanée traverse cette plage de tension plusieurs fois par cycle. En revanche, pour un niveau de tension DC supérieur à U_{lim} , on peut obtenir un enregistrement vierge de DP alors qu'un défaut est présent.

La disparition des impulsions de Trichel quand la tension augmente correspond en fait au passage vers une autre forme de décharge connue sous le nom de « glow discharge ». Il s'agit d'un mode de décharge diffus, ce qui explique que l'on ne détecte plus d'impulsions avec la méthode conventionnelle.

Pour comprendre ce phénomène à l'échelle microscopique, il faut rappeler que les impulsions de Trichel se forment de la manière suivante :

- ➔ 1- L'ionisation au voisinage de la pointe crée des porteurs de charge positifs, et des porteurs de charge négatifs par attachement électronique.
- ➔ 2- Alors que les porteurs positifs restent au voisinage de la pointe et sont éliminés par recombinaison, les porteurs négatifs s'éloignent vers l'électrode positive sous l'effet du champ électrique. Cela entraîne la formation d'une charge d'espace négative dans l'espace inter-électrodes.
- ➔ 3- La présence de cette charge d'espace négative entraîne la diminution du champ électrique au voisinage de la pointe, ce qui a pour effet l'extinction de la décharge.
- ➔ 4- Quand la charge d'espace s'est suffisamment éloignée de la pointe, le phénomène reprend à l'étape 1.

Ces étapes se répétant de manière cyclique, on observe un phénomène périodique. Quand la tension augmente, le champ électrique au voisinage de la pointe finit par être trop grand pour être ramené en dessous du seuil d'ionisation par la charge d'espace [113]. Les

impulsions sont remplacées par une décharge stationnaire qui prend la forme d'un courant continu.

Plus le courant est élevé, plus la charge d'espace négative dans le gaz est significative. Si cette charge d'espace est assez importante, le champ électrique devient suffisant pour entraîner une ionisation du gaz loin de la pointe. Dans certains cas, cela peut conduire à l'amorçage. Dans le cas de gaz électronégatifs, ce mode de décharge peut rester stable [7]. De plus, Akishev *et al.* montrent dans leurs travaux [111] que dans le cas d'une anode creuse (plutôt que plane ; c'est le cas dans notre PSEM qui est cylindrique), on génère une décharge autonome diffuse stationnaire. De cette manière, le courant et la charge d'espace engendrés continuent à augmenter avec la tension.

Cette transition est décrite avec précision grâce à une mesure de courant haute fréquence, dont les résultats sont présentés au §4.2.1.4.

→ Effet de la tension sur le comportement séquentiel des DP

Pour étudier l'effet de la tension sur le comportement séquentiel des décharges quand on en mesure, on peut tracer pour différents niveaux de tension la caractéristique $q(\Delta t)$, où chaque décharge partielle est représentée par un point. L'ordonnée de ce point est la charge apparente de la DP qu'il représente et l'abscisse est l'intervalle de temps qui sépare la DP de la précédente décharge (voir le §5.1.1, Figure 98). En DC comme en AC, il n'est pas rare qu'en plus des décharges engendrées par le défaut, apparaissent des impulsions qui ne sont que des réflexions des précédentes dans le circuit de mesure. Les réflexions sont caractérisées par une amplitude moindre par rapport aux décharges réelles. Sur l'exemple de la Figure 71 et de la Figure 72 (ou en AC, de la Figure 70), les décharges ont une charge apparente de l'ordre de 150 pC, alors que les réflexions ne dépassent pas 20 pC.

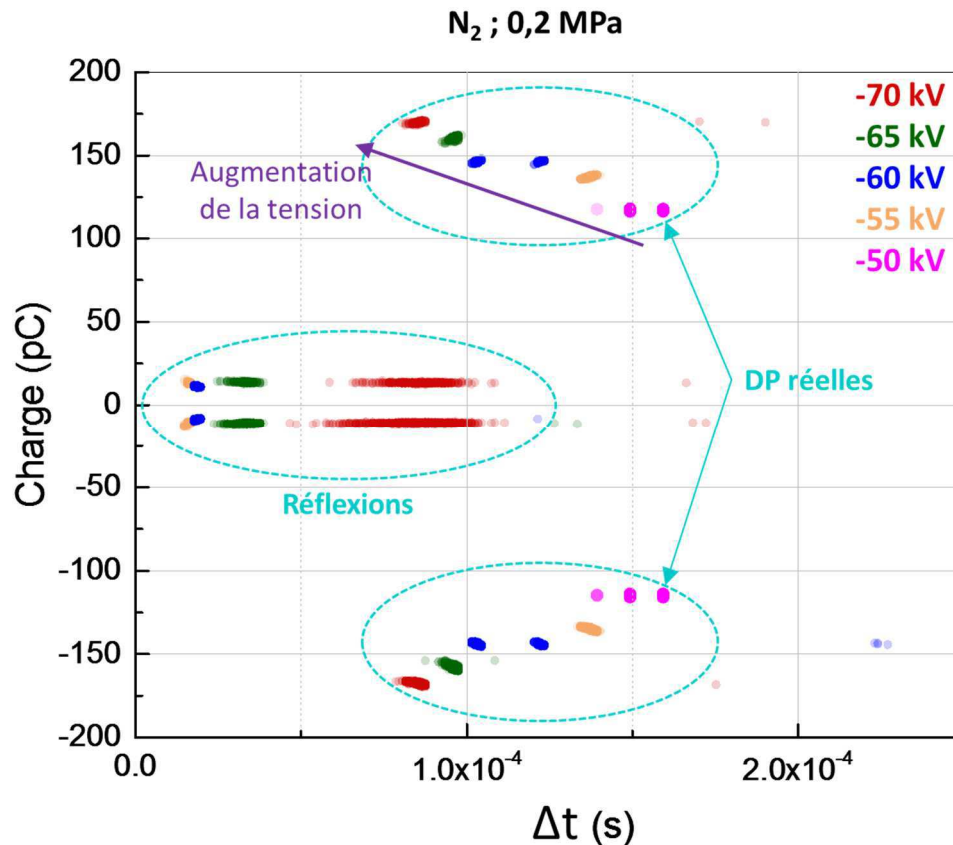


Figure 71 : $q(\Delta t)$: Répartition des amplitudes et des intervalles de temps séparant les DP lors d'épisodes de décharges enregistrés sous différentes tensions négatives en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans $0,2 \text{ MPa}$ d'azote (N_2).

Si on se concentre sur l'observation des décharges réelles, on observe sur la Figure 71 comme sur la Figure 72 qu'une augmentation du niveau de tension entraîne une augmentation de l'amplitude des décharges et une diminution de l'intervalle de temps qui les sépare, c'est-à-dire une augmentation de leur fréquence. Ce résultat est conforme aux observations menées dans l'air dans des maquettes réduites par d'autres auteurs [14], [19], [110].

A l'échelle microscopique, l'augmentation de la tension augmente la valeur du champ électrique au niveau de la pointe. Cela diminue l'influence de la charge d'espace négative qui éteint moins longtemps la décharge. De cette manière, la décharge suivante peut commencer plus rapidement. Cela explique la diminution de l'intervalle entre les impulsions de DP quand la tension augmente.

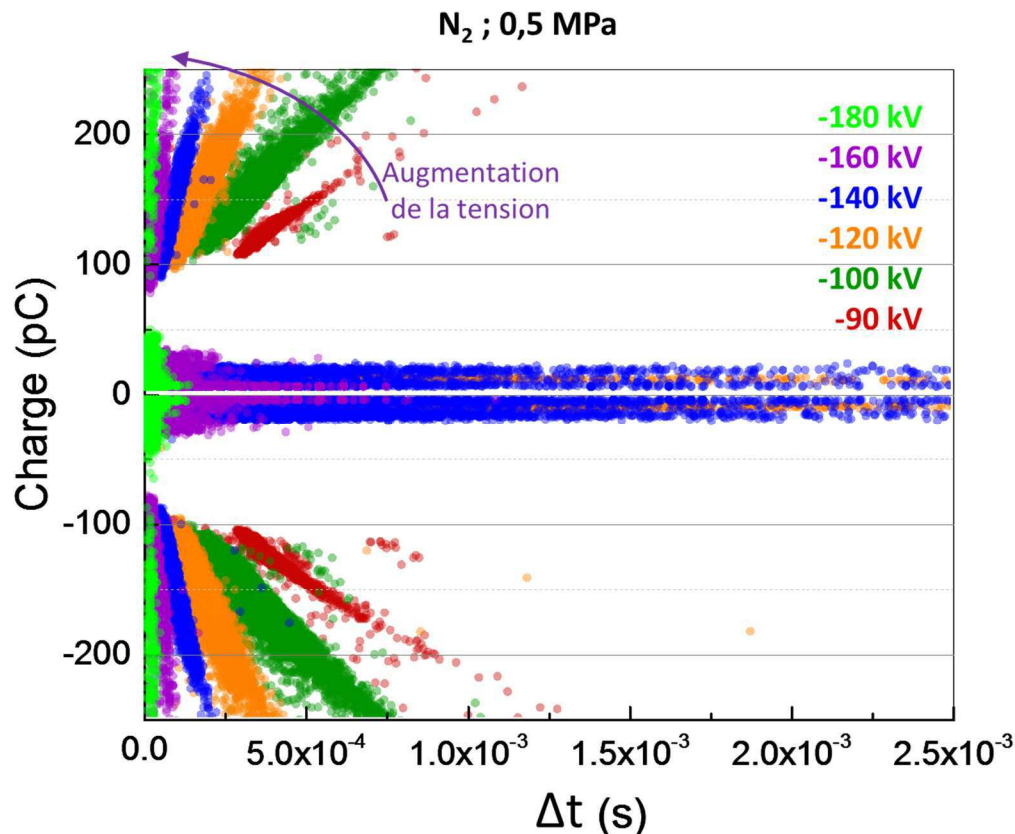


Figure 72 : $q(\Delta t)$: Répartition des amplitudes et des intervalles de temps séparant les DP lors d'épisodes de décharges enregistrées sous différentes tensions négatives en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,5 MPa d'azote (N_2).

On constate donc que le niveau de tension a une influence sur les caractéristiques des décharges observées, mais on retient surtout que selon le niveau de tension, les décharges mesurées avec la méthode conventionnelle peuvent apparaître ou disparaître.

Cela peut être problématique pour la détection des défauts de type pointe négative pour les niveaux de tension où on ne mesure pas de DP.

3.2.2.2 Influence de la pression sur les DP en présence d'une pointe négative dans l'azote

Nous avons montré la variété des comportements possibles pour les DP engendrées par une pointe négative dans l'azote selon le niveau de tension. Qualitativement, on a déjà pu relever sur les figures du paragraphe précédent une différence entre les décharges partielles enregistrées sous les plus basses pressions et celles que l'on obtient pour les pressions les plus élevées.

En effet, lors des épisodes de décharges pour les plus basses pressions, la charge apparente des DP et l'intervalle de temps entre les décharges successives sont constants pour une tension donnée. On le voit par exemple en Figure 71 pour des mesures réalisées dans l'azote à 0,2 MPa, où pour une tension donnée (une couleur donnée sur la figure), les décharges sont concentrées en des points précis. Cela révèle que la charge apparente et l'intervalle de temps entre les décharges prennent des valeurs constantes précises.

Ce résultat n'est pas vrai pour les pressions d'azote les plus élevées. On le voit sur la Figure 72, obtenue pour une pression de 0,5 MPa, et où les nuages de points présents sur les diagrammes $q(\Delta t)$ sont plus dispersés. Autrement dit, l'amplitude et la fréquence des décharges observées entre U_i et U_{lim} sont régulières pour les pressions les plus basses, irrégulières pour les pressions les plus élevées.

Pour avoir une vue d'ensemble de l'influence de la pression, les expériences évoquées au paragraphe précédent ont été répétées sous différentes conditions de pression dans toute la gamme 0,1-0,5 MPa. Comme en polarité positive, le relevé des tensions caractéristiques du comportement des décharges partielles (U_i , U_{lim} , U_{bd} , définies au § 3.2.2.1) en fonction de la pression permet de mettre en évidence plusieurs régions dans le plan (*Pression*, *Tension*). On trouve un exemple du tracé de ces régions en Figure 73.

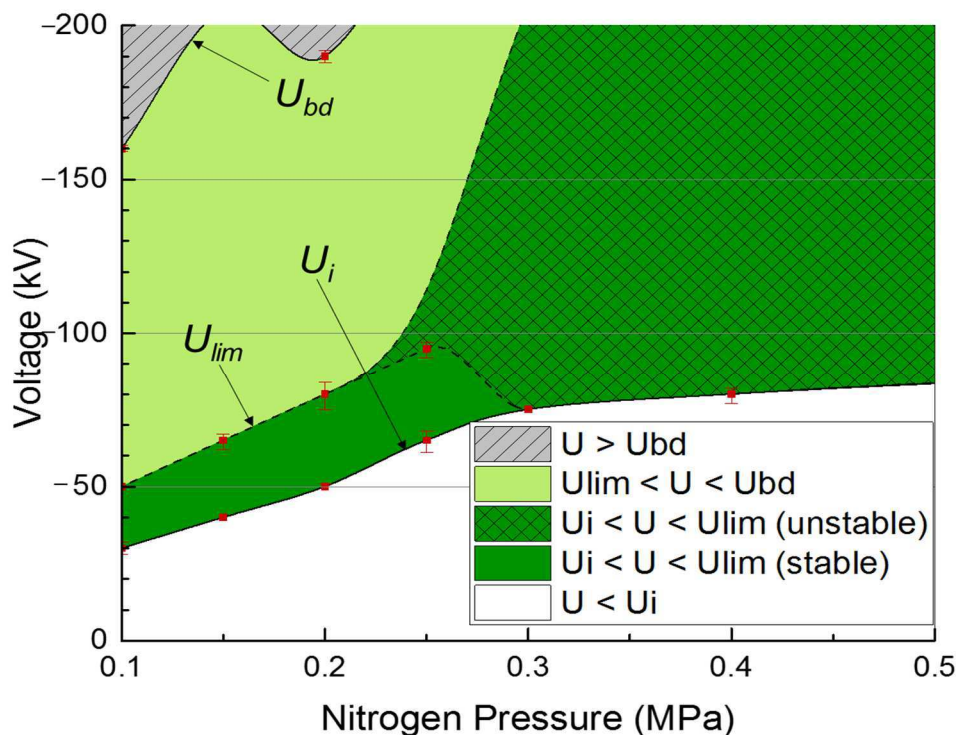


Figure 73 : Régions d'observation des DP en fonction de la pression d'azote (N_2) en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension en polarité négative.

On distingue ainsi les régions suivantes :

- La première se situe avant l'apparition des décharges partielles : $U < U_i$.
- La deuxième se situe au-delà de l'apparition des décharges partielles et en dessous de la tension de disparition : $U_i < U < U_{lim}$. On peut la diviser en deux parties :
 - Celle où les décharges sont régulières (plutôt pour les faibles pressions).
 - Celle où les décharges sont irrégulières (partie quadrillée).
- La troisième région se situe au-delà de la tension de disparition et en dessous de la tension de claquage : $U_{lim} < U < U_{bd}$

→ La dernière région se situe au-delà de la tension de claquage : $U > U_{bd}$.

On peut notamment y vérifier que la tension d'apparition des DP U_i est bien une fonction croissante de la pression, et que pour chaque pression, elle est inférieure à la tension d'apparition mesurée en polarité positive.

Le graphe présenté en Figure 73 permet d'identifier les conditions de pression et de tension dans lesquelles la méthode conventionnelle ne permet pas de détecter un défaut de type pointe en polarité négative dans l'azote.

→ Influence de la pression sur le comportement séquentiel des DP

Afin de déterminer l'impact de la pression sur le comportement séquentiel des décharges quand on en mesure, on compare les diagrammes $q(\Delta t)$ pour des décharges produites à un niveau de tension donné pour plusieurs pressions d'azote différentes (exemple en Figure 74).

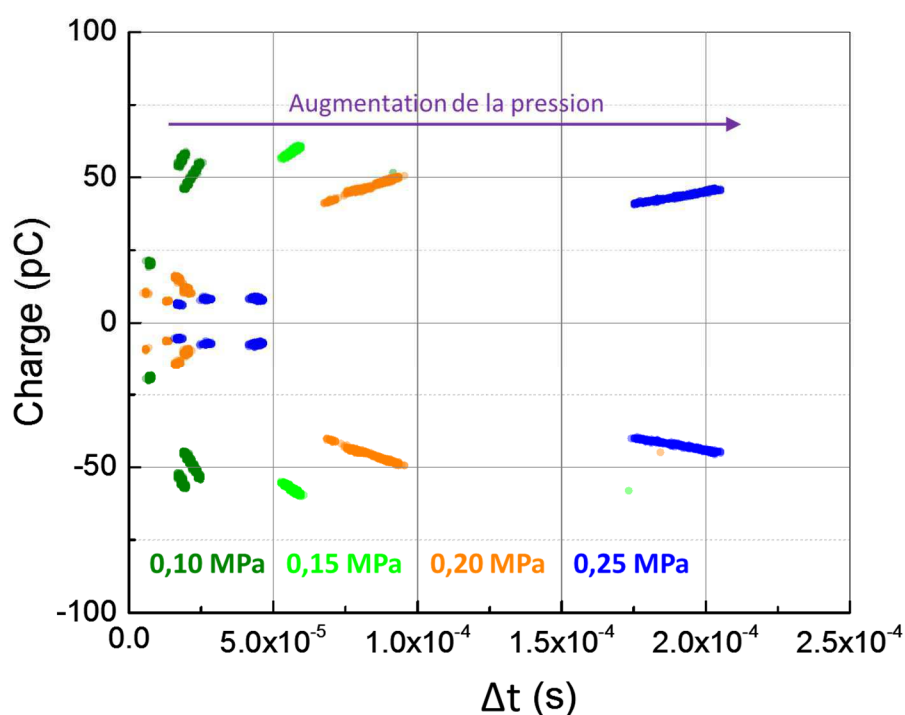


Figure 74 : $q(\Delta t)$: Répartition des amplitudes et des intervalles de temps séparant les DP lors d'épisodes de décharges enregistrés à -40 kV sous différentes pressions d'azote (N_2) en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension.

On s'aperçoit que l'augmentation de la pression a pour effet l'augmentation de l'intervalle de temps qui sépare les décharges, comme en polarité positive. Ce résultat est conforme aux observations de Florkowski *et al.* dans l'air sur un dispositif expérimental réduit [19]. Ces derniers expliquent que l'augmentation de la pression entraîne la diminution du libre parcours moyen des électrons. A champ électrique égal, cela retarde le déplacement de la charge

d'espace négative vers l'électrode positive. En conséquence, la décharge est éteinte pour une durée plus longue : l'intervalle de temps entre les décharges augmente.

Ce constat a une autre conséquence : l'énergie moyenne des électrons libres est également réduite à plus haute pression. En résulte une diminution de la probabilité d'ionisation par collision, qui est le principal facteur d'ionisation quand le champ électrique est divergent, comme au voisinage d'une pointe. Ceci explique pourquoi la tension d'apparition des décharges partielles est plus forte quand la pression est élevée.

La pression d'azote a donc bien une influence sur les caractéristiques des DP générées par une pointe en polarité négative. On retient surtout que selon la pression, les décharges peuvent être ou ne pas être mesurées avec la méthode conventionnelle.

3.2.2.3 Influence de la durée d'application de la tension sur les DP en présence d'une pointe négative dans l'azote

Afin d'évaluer l'effet de la durée d'application de la tension, le protocole expérimental défini au §2.6.2 a été modifié en remplaçant les paliers de 1 minute par des paliers de 5 minutes, puis de 15 minutes. Le résultat peut être observé en Figure 75 dans le cas d'une pointe négative dans l'azote à 0,3 MPa.

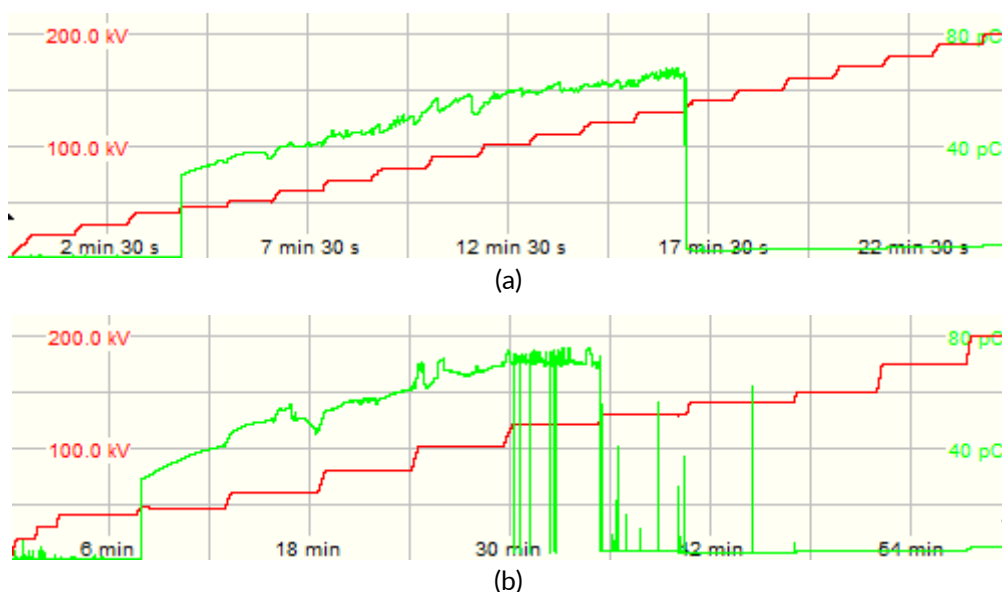


Figure 75 : Evolution temporelle de la tension et du niveau de décharge au cours d'une expérience en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension en polarité négative dans 0,3 MPa d'azote.

(a) Paliers de 1 min ; (b) Paliers de 5 min.

On y observe que la charge apparente des décharges augmente au cours du temps, et ce d'autant plus que le palier est long. Dans d'autres expériences que l'on ne présente pas ici, c'est au contraire une diminution de la charge apparente qui a été observée pendant les paliers. Finalement, on observe même des situations où la charge apparente des DP augmente et diminue alternativement au cours d'un même palier de tension. Cette dernière situation est illustrée par la Figure 76, obtenue en présence d'une pointe négative dans

l'azote à 0,1 MPa et une durée de mesure de 15 minutes. En revanche, les tensions caractéristiques U_i et U_{lim} restent les mêmes d'une expérience à l'autre.

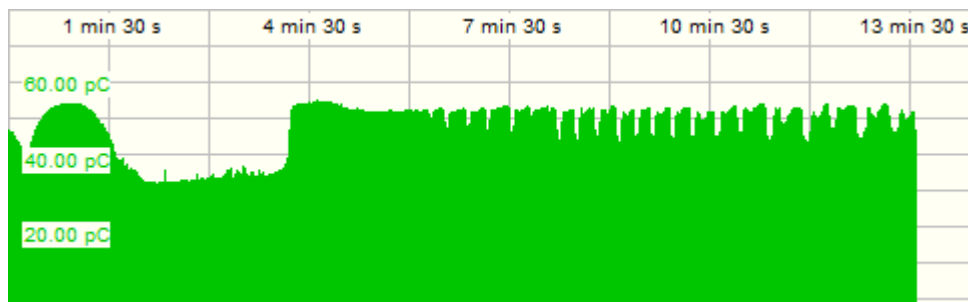


Figure 76 : Relevé temporel des impulsions de décharges partielles mesurées en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \mu\text{m}$) sur le conducteur haute-tension en polarité négative dans 0,1 MPa d'azote pendant un palier de 15 minutes à -45 kV.

On déduit de ces observations que pour des échelles de temps inférieures à 15 minutes, la durée d'application de la tension n'a pas d'effet qualitatif sur la formation des décharges partielles en présence d'une pointe négative dans l'azote pour la gamme de pression étudiée. Cela s'explique par la rapide recombinaison des ions dans l'azote. Des précisions peuvent être apportées grâce aux expériences menées en courant alternatif (§3.2.2.1, Figure 70). La fréquence de la tension sinusoïdale appliquée est 50 Hz, ce qui signifie que la tension passe de 0 V à la tension crête ou de la tension crête à 0 V en 5 millisecondes. Même à cette échelle de temps, on peut mesurer clairement les tensions U_i et U_{lim} définies au début du §3.2.2.1. On conclut que le temps caractéristique qui gouverne l'apparition et la disparition des impulsions de DP est inférieur à 5 millisecondes.

De plus, dans sa thèse [64], Beyer affirme que les DP générées par des défauts dans le gaz comme les pointes ou les particules ne sont pas affectées par la durée des expériences, car la recombinaison et la dynamique du gaz effacent toute trace des décharges passées. On conclut qu'il n'est pas nécessaire de réaliser des expériences de longue durée quand on veut obtenir des données de décharges partielles pour des pointes négatives dans l'azote. Quelle que soit la durée des paliers de tension observés, les décharges enregistrées sont représentatives du phénomène de DP engendrées par le défaut.

Concernant les durées plus longues, comparables à la durée de vie d'un poste sous tension, aucune expérience n'a été réalisée. On ne peut donc pas conclure sur le comportement des décharges partielles après une mise sous tension très longue.

De toute façon, on peut penser qu'un enregistrement de DP de courte durée sera toujours représentatif du comportement des décharges partielles dans un tel contexte, ce comportement dût-il être différent.

3.2.2.4 Répétabilité et reproductibilité des mesures de DP en présence d'une pointe négative dans l'azote

Comme en polarité positive au §3.2.1.4, on souhaite éprouver la répétabilité et la reproductibilité de la mesure conventionnelle en DC pour un défaut de type pointe négative. Lorsqu'on réalise plusieurs fois la même mesure de DP sans démonter le dispositif expérimental, on obtient les mêmes résultats : les tensions caractéristiques (définies au §3.2.2.1) sont les mêmes, les DP enregistrées ont les mêmes charges apparentes et la même fréquence. On peut ainsi faire des statistiques consolidées sur ces grandeurs et tracer les frontières des régions d'observation des DP en fonction de la pression, comme on l'a fait au §3.2.2.2 en Figure 73.

Les mesures de DP selon la norme IEC 60270 sont bien répétables dans le cas d'une pointe négative dans l'azote.

On éprouve la reproductibilité des mesures en comparant les mesures réalisées avec les mêmes paramètres expérimentaux lors de campagnes d'essais différentes. Cela signifie que la maquette et son instrumentation ont été démontées et assemblées à nouveau après un certain temps. Les résultats obtenus lors de campagnes d'essais différentes sont représentés sur les graphes de la Figure 77-a-b-c. On y voit les régions d'observation des DP ainsi que les ordres de grandeur typiques des charges apparentes mesurées dans chacune d'elles.

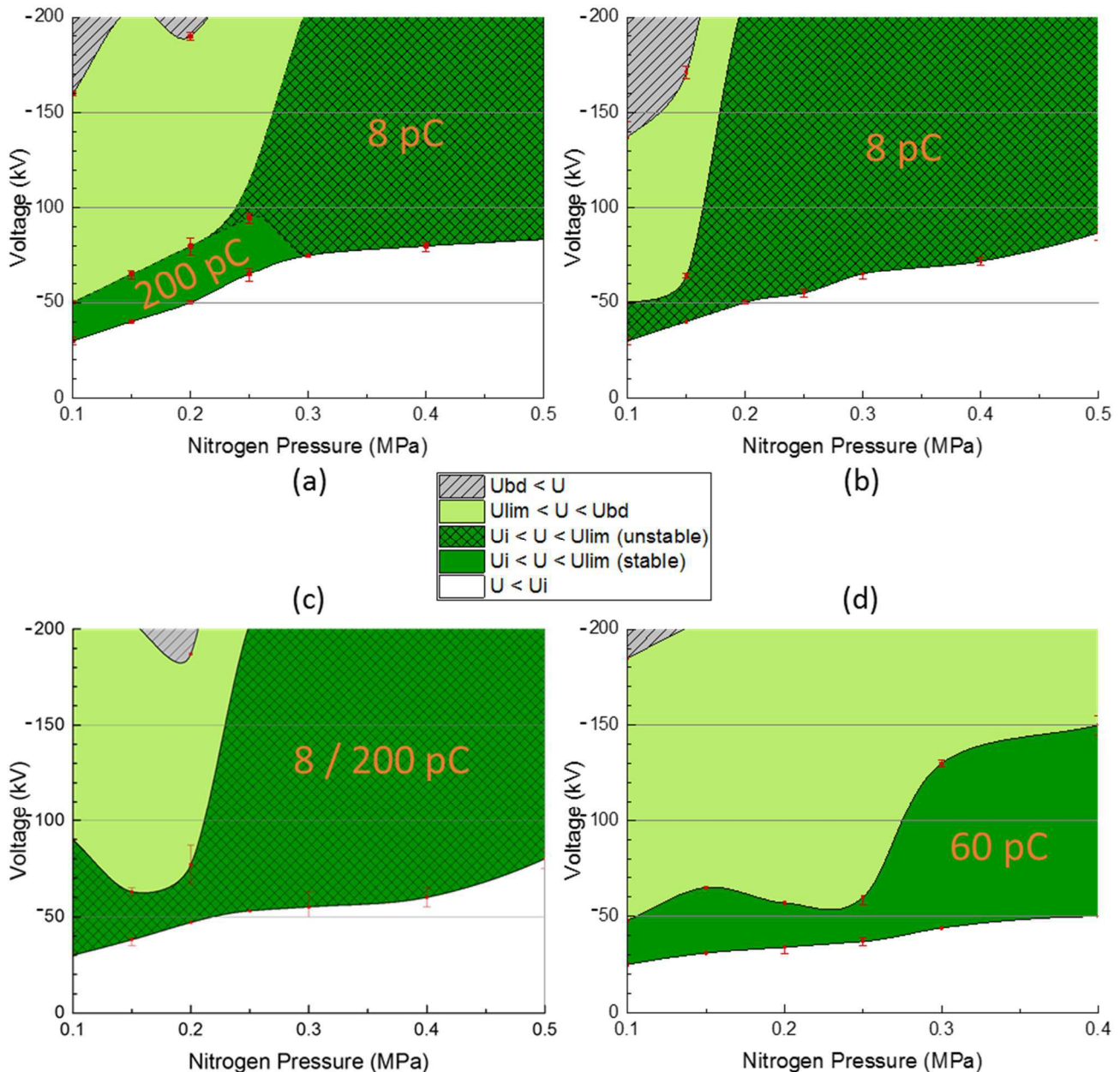


Figure 77 : Régions d'observation des DP en fonction de la pression d'azote (N_2) en présence d'une pointe fixée sur le conducteur haute-tension en polarité négative au cours de différentes campagnes d'essais.
(a), (b) et (c) : $l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \text{ }\mu\text{m}$. (d) : $l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 250 \text{ }\mu\text{m}$.

On peut noter des similitudes entre ces différents résultats, notamment les valeurs de la tension d'apparition qui garde la même allure, et la présence d'une large région sans décharges quand la pression est faible. En revanche, on remarque des différences importantes dans le tracé de la région où l'on mesure des décharges irrégulières. Cantonnée aux hautes pressions en Figure 77-a, elle s'étend sur toute la gamme de pressions en Figure 77-b-c. La plus grande différence est certainement le contraste entre la Figure 77-a où les faibles pressions donnent lieu à des décharges très régulières de l'ordre de 200 pC et la Figure 77-b où dans les mêmes conditions, l'amplitude des décharges gravite autour de 8 pC, et la Figure 77-c où ces deux variétés sont mélangées.

La Figure 77-d présente les résultats d'une campagne de mesure pour laquelle la pointe a un rayon de courbure différent. L'allure générale est la même, et les décharges sont toujours régulières, de l'ordre de 60 pC.

Ceci nous permet de conclure que les mesures de DP en présence d'une pointe en polarité négative sont difficilement reproductibles.

Cela pourrait poser problème pour la détection des pointes en polarité positives dans l'azote avec la méthode conventionnelle, car un défaut unique peut donner lieu à plusieurs comportements différents.

Dans plusieurs configurations, la méthode conventionnelle ne permet pas de détecter les défauts de type pointe négative dans l'azote, ce qui en fait une méthode de détection inadaptée dans ces conditions.

3.2.3. Comportement des défauts de type pointe dans le SF₆

Pour des pressions de SF₆ allant de 0,1 à 0,5 MPa, dans les deux polarités, on a appliqué la tension par paliers de 1 minute entre 0 et 200 kV DC (protocole détaillé au §2.6.2) sans détecter de décharges partielles avec la mesure conventionnelle au-dessus du seuil de détection fixé à 5 pC. Les expériences ont même été prolongées pour observer un palier de 30 minutes à la tension maximale sans que cela n'ait d'effet sur la détection.

Pour confirmer que cette absence de détection n'était pas liée à un problème de mesure, une comparaison a été établie avec une situation possédant un meilleur retour d'expérience : la tension alternative. Les mesures réalisées sous tension alternative révèlent que pour des pressions de SF₆ comprises entre 0,1 et 0,5 MPa et pour des tensions crête restant dans la gamme des expériences en DC (0-200 kV), la charge apparente des décharges partielles enregistrées demeure inférieure à 5 pC. C'est ce qu'on voit en Figure 78 pour une pression de 0,1 MPa et de 0,5 MPa. On voit sur cette figure que la marge est conséquente puisque pour la pression la plus faible étudiée (0,1 MPa de SF₆), il faut soumettre le défaut à une tension crête d'au moins 240 kV pour faire apparaître des DP au-dessus de 5 pC. Dans le SF₆ à 0,5 MPa, une pression plus proche des pressions de service classiques des postes au SF₆, une tension crête de 325 kV a été atteinte sans détecter de DP au-delà du seuil de détection.

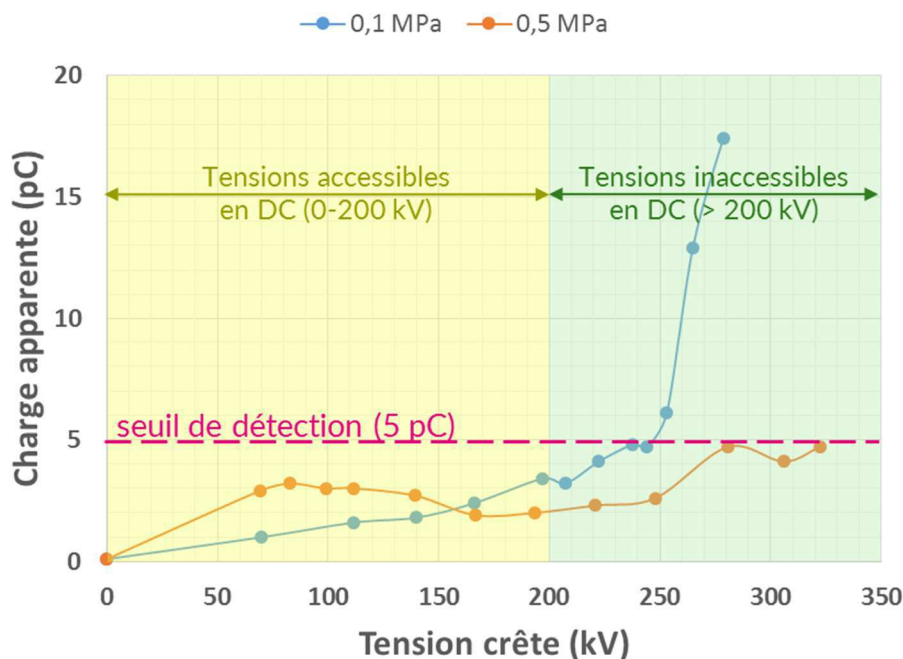


Figure 78 : Niveau de DP mesuré en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) sur le conducteur haute-tension en fonction de la valeur crête de la tension alternative dans 0,1 MPa et 0,5 MPa de SF₆.

Dans la littérature, plusieurs études présentent des mesures de décharges partielles selon la norme IEC 60270 pour une pointe dans du SF₆, mais jamais dans des conditions expérimentales proches de la réalité d'un poste. Il s'agit d'expériences dans des modèles réduits où la distance inter-électrodes ne dépasse pas quelques centimètres [23], [114], [115], ou bien de configurations coaxiales où la distance inter-électrodes atteint environ 200 mm, mais qui impliquent des pointes de dimension importantes (de 15 à 60 mm) [35], [62]. Cela permet certainement d'observer plus facilement des décharges, mais pas d'éprouver la capacité de détection dans des conditions réelles.

Pour pouvoir observer des décharges partielles dans le SF₆, il faudrait améliorer la sensibilité de la mesure, ou bien rechercher des niveaux de tension plus élevés, ce qui est possible dans des protocoles de pré-tests, mais pas forcément lors du monitoring d'un équipement sur site.

*Dans toutes les configurations étudiées, la méthode conventionnelle ne permet pas de détecter un défaut de type pointe dans du SF₆ en DC.
Cette méthode n'est pas pertinente pour la détection des pointes dans les PSEM DC dans nos conditions expérimentales.*

3.3. Conclusion

Dans le but de caractériser les décharges partielles dans un poste sous enveloppe métallique sous tension continue en présence d'un défaut de type pointe ou de type particule libre métallique, des mesures de DP ont été réalisées selon la norme IEC 60270 dans les deux polarités (positive et négative) entre 0 et 200 kV DC, dans le SF₆ et dans l'azote pour des pressions comprises entre 0,1 et 0,5 MPa.

En présence d'une particule libre métallique, tout mouvement de la particule a été détecté par une mesure de décharges partielles selon la norme IEC 60270. Cela fait de la mesure conventionnelle une méthode adaptée à la détection de ce type de défaut. Les caractéristiques des décharges mesurées sont fortement liées au mouvement de la particule, ce qui permet de différencier des enregistrements en fonction du type de mouvement.

Les résultats en présence d'une pointe sur le conducteur haute-tension sont plus mitigés. Des décharges partielles ont pu être mesurées dans l'azote, mais seulement dans certaines conditions de pression et de tension en polarité négative, et soumises à un facteur aléatoire en polarité positive. Dans le SF₆, la méthode de mesure s'est montrée aveugle dans les plages de pression et de tension explorées. Cette manière de mesurer les décharges partielles n'est pas toujours adaptée à la détection de défauts de type pointe dans les PSEM en courant continu.

On peut améliorer la détection dans le SF₆ en recherchant des tensions élevées, et dans l'azote en polarité positive en augmentant la durée des mesures.

Quand des décharges partielles ont pu être mesurées, l'influence du niveau de tension et de la pression sur le comportement des DP a pu être déterminée.

Dans le but de proposer un outil de monitoring des défauts s'appuyant sur la mesure des décharges partielles, il importe maintenant de comprendre l'absence de détection dans certaines conditions, et de parvenir à détecter les défauts d'une autre manière. Ce sera l'objet du Chapitre 4.

Chapitre 4. Apport des méthodes non-conventionnelles à l'analyse des décharges partielles

Dans le Chapitre 3, nous avons montré que la mesure conventionnelle ne permettait pas de détecter les décharges partielles sous contrainte DC dans les conditions expérimentales suivantes :

- En présence d'une pointe sur le conducteur haute-tension en polarité négative dans l'azote à faible pression, quand la tension est élevée.
- En présence d'une pointe sur le conducteur haute-tension dans le SF₆ en dessous de 200 kV dans les deux polarités.

D'autres méthodes sont donc nécessaires pour détecter et caractériser les décharges partielles dans ces configurations. Pour cela, des chaînes de mesure permettant de mesurer d'autres manifestations de l'activité de DP ont été mises en place.

Dans les deux premières parties, la caractérisation des décharges partielles en DC sera complétée par les informations obtenues grâce à une mesure de l'intensité lumineuse (4.1) et à des mesures de courant (4.2). Ces chaînes de mesures seront également mises à profit pour déterminer si une absence de détection selon la norme IEC 60270 signifie ou non l'absence de décharges partielles.

Dans la partie suivante (4.3), l'apport des mesures UHF sera évalué pour la détection des décharges partielles et l'identification des défauts.

4.1. Mesure de l'émission lumineuse

L'émission de lumière est un indicateur reconnu de la présence de décharges partielles dans le gaz, y compris pour de très faibles amplitudes [42]. Cet indicateur est donc utilisé pour déterminer si des DP ont lieu ou non dans les situations décrites en introduction de ce chapitre, où la mesure conventionnelle ne détecte pas de DP en DC. Cette approche

qualitative sera réalisée grâce à une caméra UV. De manière quantitative, une mesure précise impliquant un photomultiplicateur permettra ensuite de caractériser l'émission lumineuse en présence d'un défaut sous contrainte DC.

4.1.1. Approche qualitative – Caméra UV

Dans un premier temps, on utilise un équipement conçu pour la détection des décharges couronne: la caméra UV (2.4.1). Elle permet de visualiser les rayonnements UV sous forme de points blancs superposés à une image optique classique de la zone observée.

La Figure 79 montre un exemple de l'évolution des images observées par la caméra UV au cours d'une montée en tension DC :

- A faible tension, aucune émission n'est observable (Figure 79-a).
- A partir d'une certaine tension $U_{i, UVcam}$, on détecte la présence d'une émission d'UV (Figure 79-b).
- L'intensité de l'émission UV augmente avec la tension (Figure 79-c).

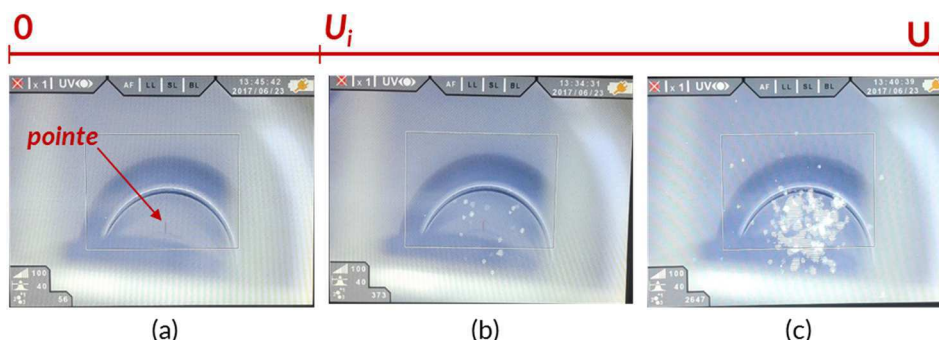


Figure 79 : Aperçu depuis la caméra UV en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,1 MPa d'azote en polarité négative (a) à -0 kV ; (b) à -80 kV ; (c) à -160 kV .

L'observation à l'aide de la caméra UV a été faite pour plusieurs pressions d'azote et de SF_6 . La comparaison de ces observations permet déjà d'affirmer que l'activité de DP est plus intense dans l'azote que dans le SF_6 , et d'autant plus faible que la pression est élevée.

Simultanément avec cette observation visuelle, les décharges partielles ont été mesurées avec la méthode conventionnelle. Les mesures montrent que lorsqu'elle existe, la tension U_i d'apparition des DP mesurée avec la méthode conventionnelle est égale à la tension $U_{i, UVcam}$ d'apparition des décharges détectées par la caméra UV :

$$U_{i, UVcam} = U_i \quad (26)$$

L'émission de lumière ultra-violette est donc bien une manifestation du phénomène de décharges partielles de type corona. Pendant toutes nos expériences, l'intensité de l'émission UV augmente avec la tension à partir de U_i et jusqu'au claquage. Cela signifie que l'activité

de décharge corona existe bien sur toute la plage de tension supérieure à U_i , même si elle n'est pas détectée par la méthode conventionnelle.

Cette mesure confirme la présence de décharges partielles pour toutes les tensions supérieures à U_i et montre la limite de la mesure conventionnelle pour détecter/caractériser des décharges partielles sous tension continue.

4.1.2. Approche quantitative - Photomultiplicateur

Afin d'obtenir des informations précises sur l'intensité des décharges couronne, l'intensité lumineuse émise par les décharges partielles est mesurée. On utilise pour cela une fibre optique placée à proximité du défaut et reliée à un photomultiplicateur, et enfin à un ampèremètre (2.4.2). Les mesures sont réalisées aussi bien dans l'azote que dans le SF_6 , dans la gamme de pression 0,1 – 0,5 MPa, et dans les deux polarités.

4.1.2.1 Effet du niveau de tension

La Figure 80 montre un exemple de l'évolution temporelle du courant en sortie du photomultiplicateur quand le défaut est placé dans le SF_6 ou l'azote à 0,1 MPa au cours d'une montée en tension dans les deux polarités.

- Lorsque la tension est égale à 0 V, on mesure un bruit de fond de l'ordre de 10^{-11} A.
- Lors des premiers paliers, le courant mesuré ne diffère pas du bruit de fond.
- A partir d'une certaine tension $U_{i, \text{lumière}}$ (75 kV et 30 kV en polarité positive dans le SF_6 et l'azote, -55 kV et -30 kV en polarité négative pour l'exemple de la Figure 80), le courant commence à augmenter. Cette augmentation est progressive dans le SF_6 , soudaine dans l'azote où l'on mesure directement 1 nA au minimum.
- Quand la tension augmente encore, l'amplitude du courant continue à augmenter.

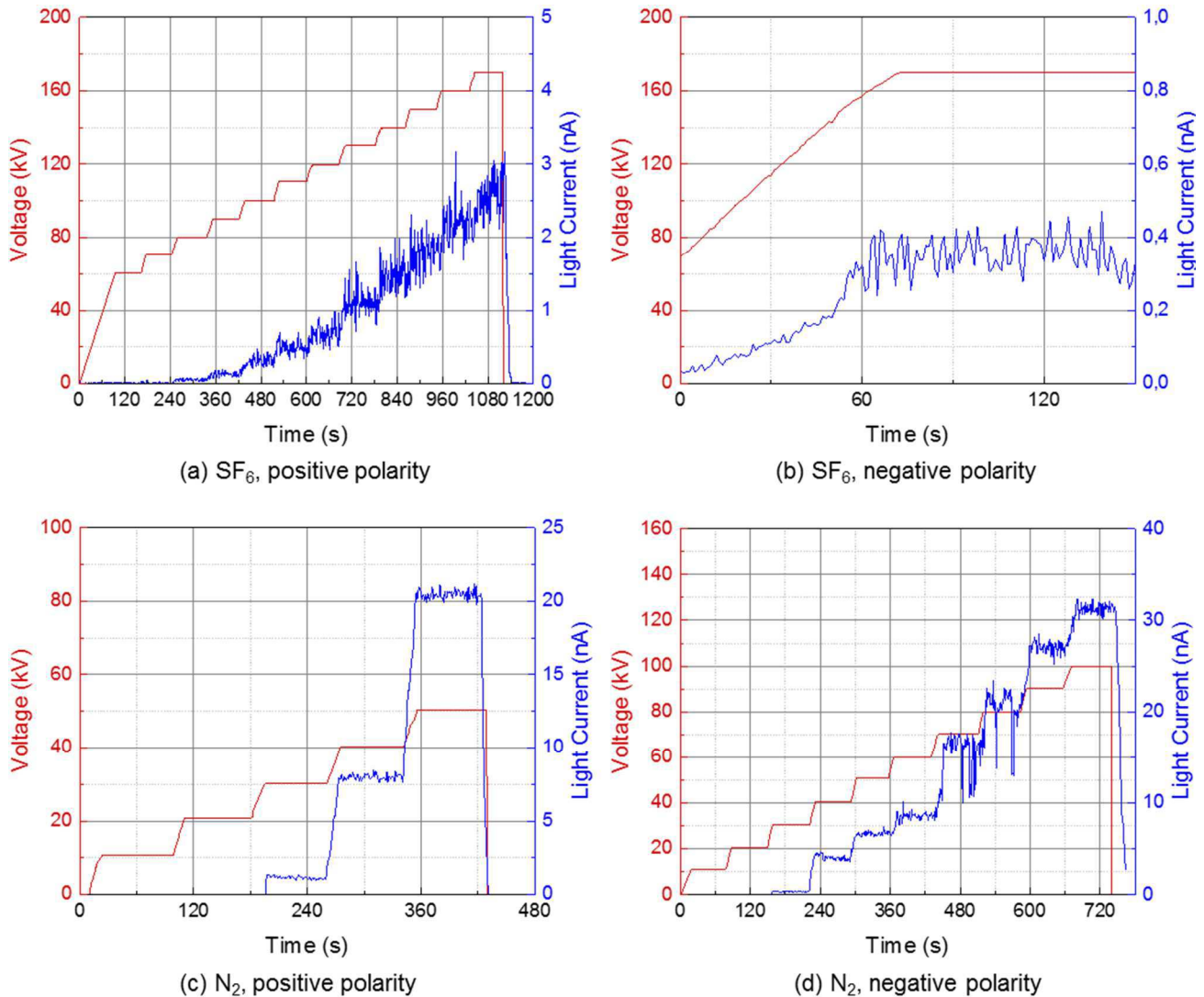


Figure 80 : Évolution temporelle de la tension et du courant-image de l'intensité lumineuse en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) en polarité positive (a) dans 0,1 MPa d'azote ; (b) dans 0,1 MPa de SF₆.

Comme au paragraphe 4.1.1, la tension U_i d'apparition des décharges partielles obtenue grâce à la mesure conventionnelle a été comparée avec la tension $U_{i, \text{lumière}}$ d'apparition de la lumière. Cette comparaison a été effectuée quand U_i est définie, c'est-à-dire dans l'azote, sur la plage de pression 0,1 – 0,5 MPa. Dans toutes ces configurations, les deux tensions d'apparition sont identiques, ce qui permet d'écrire :

$$U_i = U_{i, \text{lumière}} \quad (27)$$

Dans le cas de l'azote en polarité négative, il est important de remarquer que l'émission de lumière est toujours mesurable au-delà de U_i , même dans les régions du plan (*Pression*, *Tension*) où les décharges partielles ne sont pas mesurables avec la méthode conventionnelle (§3.2.2.2, Figure 73). Par exemple, à 0,2 MPa d'azote en polarité négative, les décharges partielles ont été mesurées avec la méthode conventionnelle entre -30 kV et -49 kV, et l'émission lumineuse n'a pas cessé de croître à partir de -30 kV, y compris au-delà de -49 kV.

Le phénomène de décharge a donc bien lieu pour toutes les tensions supérieures à U_i , mais sous une forme sans impulsions (*pulseless*) à partir d'une certaine tension U_{lim} . Dans cette configuration, l'absence de détection par la méthode conventionnelle ne signifie pas l'absence de décharges partielles.

La transition entre les formes impulsionnelles et *pulseless* est étudiée plus en profondeur au paragraphe 4.2.1.4 grâce à une mesure de courant haute-fréquence.

On fait la même interprétation dans le SF_6 : l'augmentation soudaine de l'émission de lumière est le signe de l'apparition de décharges partielles, même si elles ne sont pas détectées par la méthode conventionnelle. Il suffit donc de mesurer $U_{i, lumière}$ pour connaître la tension d'apparition des décharges partielles en général. Comme dans l'azote, on notera dorénavant cette tension U_i .

4.1.2.2 Effet de la pression

En conséquence, la détermination de $U_{i, lumière}$ pour différentes pressions de SF_6 permet de déterminer dans le plan (*Pression, Tension*) la frontière qui sépare la région où il n'y a pas d'activité de DP de la région où des décharges partielles sont présentes. Ce tracé est représenté en Figure 81 pour une pointe fixée sur le conducteur haute-tension dans les deux polarités. On y voit notamment que pour une pression donnée, la tension d'apparition des décharges partielles est nettement plus élevée en polarité positive qu'en polarité négative, et que pour les deux polarités, la tension d'apparition des DP est une fonction croissante de la pression de SF_6 . Ces résultats sont cohérents avec les résultats obtenus dans la littérature dans des dispositifs expérimentaux de taille réduite remplis de SF_6 [23], [82].

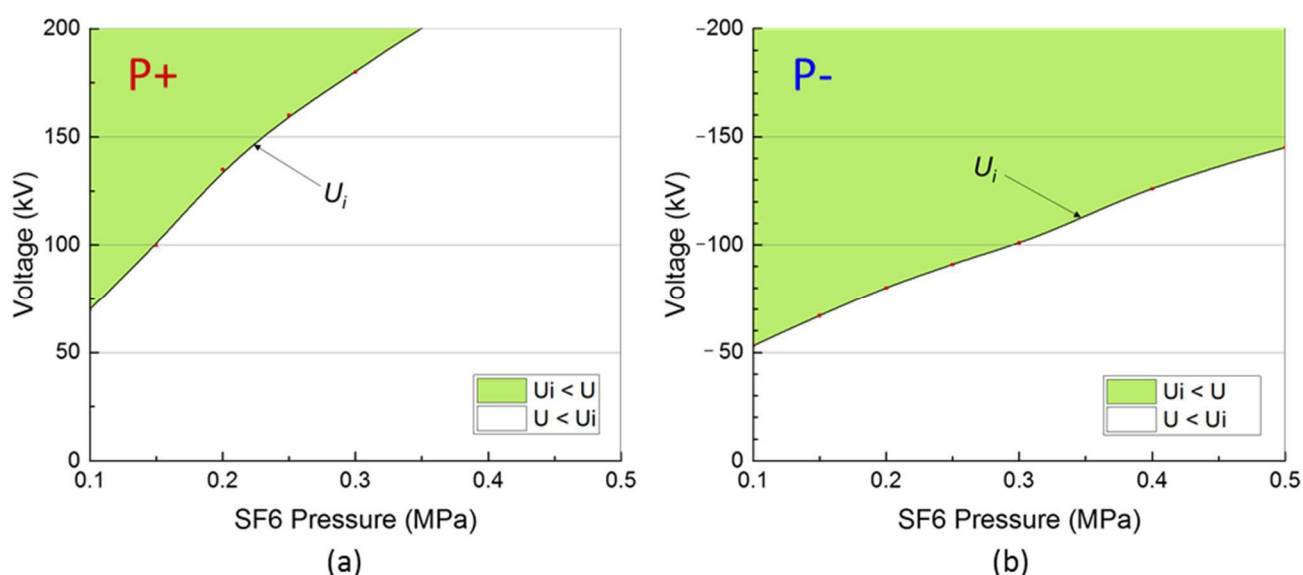


Figure 81 : Régions d'observation des DP en fonction de la pression de SF_6 en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension (a) En polarité positive ; (b) En polarité négative.

Afin d'évaluer l'effet de la pression du gaz sur l'intensité de l'émission lumineuse, la mesure du courant-image de l'intensité lumineuse a été effectuée pour différentes pressions et dans les deux polarités. Les résultats obtenus dans le SF_6 et dans l'azote sont présentés en Figure 82. A l'instar du taux de répétition des DP mesurées selon la norme IEC 60270, lorsque la pression augmente, l'intensité lumineuse diminue.

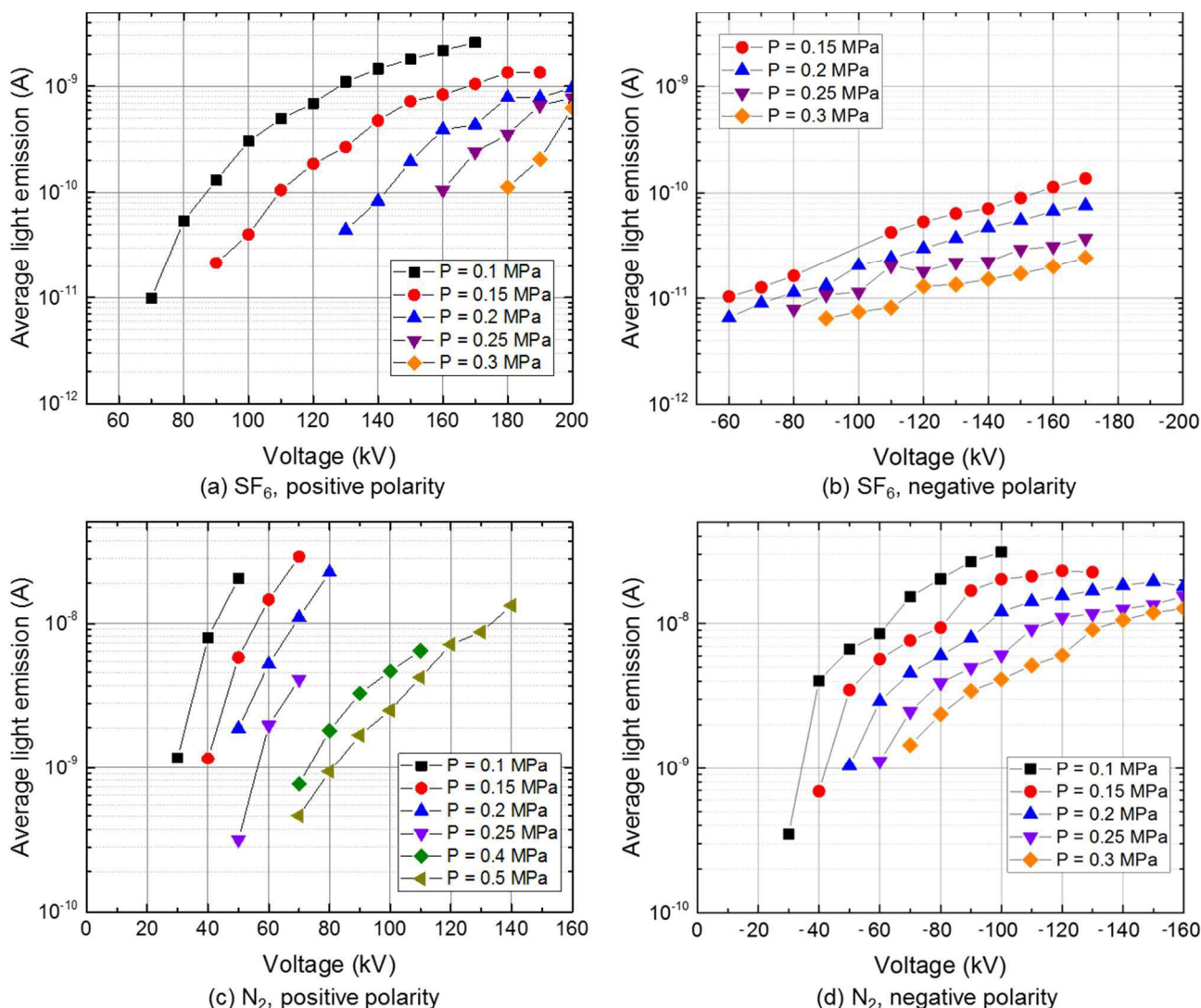


Figure 82 : Evolution du courant-image de l'intensité lumineuse à partir de la tension d'apparition des DP en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) pour différentes pressions (a) En polarité positive dans le SF_6 ; (b) En polarité négative dans le SF_6 ; (c) En polarité positive dans l'azote; (d) En polarité négative dans l'azote.

4.1.2.3 Influence de la nature du gaz

La Figure 82 permet également de comparer entre elles les mesures réalisées dans des gaz différents. Quand les mesures sont réalisées dans l'azote (Figure 82-c-d), le courant-image de l'intensité lumineuse quand la tension atteint $U_{i, \text{lumière}}$ prend des valeurs entre $3 \cdot 10^{-10} \text{ A}$ et $2 \cdot 10^{-9} \text{ A}$. Ce niveau est situé une décade au-dessus du bruit de mesure, lui-même enregistré à un niveau de 10^{-11} A . Au contraire, le courant enregistré dans le SF_6 quand la tension atteint

$U_{i, \text{lumière}}$ ne dépasse pas 10^{-10} A. Ce courant est même souvent proche de 10^{-11} A, la valeur du bruit de mesure.

La faiblesse du rapport signal à bruit dans ces conditions peut rendre difficile la mise en place d'un seuil de détection des décharges partielles.

La différence d'amplitude entre l'azote et le SF_6 explique aussi pourquoi l'augmentation de l'intensité donne l'impression d'être franche dans l'azote et progressive dans le SF_6 .

4.1.3. Détection des rayons lumineux en présence d'une particule libre métallique

La même démarche a été suivie en présence de particules libres métalliques, afin d'obtenir une caractérisation de l'émission lumineuse pour ce type de défaut. Des mesures ont donc été conduites en présence d'une particule dans l'azote ou dans le SF_6 , pour des pressions allant de 0,1 MPa à 0,5 MPa.

Pendant ces mesures, le décollage de la particule a été détecté grâce à la mesure conventionnelle des décharges partielles, mais aucun rayonnement lumineux n'a pu être mesuré.

Cette absence de détection peut être expliquée par la nature du défaut. On a vu au paragraphe 2.4.2 que la position de la fibre optique par rapport au défaut avait une grande influence sur la conversion entre l'intensité lumineuse émise et le flux lumineux effectivement transmis par la fibre. Si cette position n'est pas optimale, le facteur de conversion est très faible, ce qui amoindrit le rapport signal à bruit. C'est le cas pour un défaut de type particule qui se déplace dans le poste.

La mesure de l'intensité lumineuse n'est donc pas adaptée à la détection des défauts de type particule libre métallique dans les conditions expérimentales de ces travaux.

4.1.4. Limites de la mesure de lumière pour la détection de défauts

La mesure de la lumière présente plusieurs limites spécifiques pour la détection des défauts. On note tout d'abord que le seuil de détection de l'activité de décharges partielles n'est pas toujours très élevé, notamment dans le SF_6 . Il est donc difficile de fixer un seuil entre le bruit de fond et le niveau de courant enregistré à la tension d'apparition des DP.

L'implantation du capteur est une autre difficulté. Dans le cadre de nos expériences, la fibre optique servant à capter les rayonnements lumineux était placée en face du défaut de type pointe. Cela n'est possible que lorsqu'on connaît a priori l'emplacement du défaut. On n'a pas cette connaissance préalable dans les cas réels de détection. Si donc la fibre n'est pas parfaitement en face du défaut, la diminution du rapport signal à bruit pourrait empêcher la détection.

Enfin, la mesure des émissions lumineuses n'a pas du tout permis de détecter les défauts de type particule métallique libre.

En définitive, la mesure de l'émission lumineuse est pertinente pour la caractérisation des défauts de type pointe, mais pas pour la détection des défauts.

4.2. Mesures de courant

La mesure de l'émission lumineuse (§4.1) a permis de montrer que dans certaines conditions de pression et de tension dans l'azote et dans le SF₆, des décharges partielles avaient bien lieu alors que la méthode conventionnelle ne les détecte pas.

Dans cette partie, la mesure du courant stationnaire est proposée comme méthode supplémentaire pour confirmer ce résultat.

La caractéristique courant-tension permet également d'identifier les modes de décharge d'un défaut (§1.1.2.1, Figure 4), c'est pourquoi nous avons cherché à obtenir cette caractéristique pour les défauts étudiés dans l'azote et le SF₆ pour la plage de pression de 0,1 à 0,5 MPa en polarité positive et négative. Pour cela, le courant est enregistré à l'aide d'un électromètre (montage détaillé au paragraphe 2.3.2).

Les premiers résultats présentés portent sur les caractéristiques courant-tension obtenues grâce à une mesure de courant stationnaire en présence d'un défaut de type pointe. La caractérisation du courant généré par un défaut de type pointe sera tout d'abord menée dans l'azote, parce que des décharges partielles y ont déjà été mesurées avec la méthode conventionnelle dans nos conditions expérimentales. Cela permettra de faire un lien entre le courant et les DP. Dans un second temps, les résultats obtenus en présence d'une pointe dans le SF₆ seront exposés. Pour finir, on présentera les résultats obtenus pour les défauts de type particule.

4.2.1. Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe dans l'azote

Les mesures de courant en présence d'une pointe dans l'azote seront d'abord analysées de manière à comprendre l'effet du niveau de tension, analyse qui sera affinée par une étude de l'équation des caractéristiques courant-tension. La caractérisation du courant généré par un défaut de type pointe dans l'azote se poursuivra par une étude de l'effet de la pression d'azote sur le comportement du courant.

Enfin, dans le dernier paragraphe, on cherchera à décrire comment la mesure conventionnelle cesse de détecter des impulsions de décharges partielles à partir d'une certaine tension dans l'azote en présence d'une pointe négative. Pour cela la transition entre un régime impulsionnel et un régime *pulseless* sera observée grâce à une mesure haute-fréquence.

4.2.1.1 Effet du niveau de tension

Afin d'évaluer l'effet de la tension sur le courant généré par une pointe, on se place à une pression d'azote donnée, et on mesure le courant au cours d'une montée en tension.

Pour éviter de mesurer des courants capacitifs, la mesure n'est pas réalisée pendant les variations de tension, mais uniquement pendant des paliers de tension de 1 minute (plus de détails au §2.6.2). Les paliers de tension sont espacés de 10 kV.

La Figure 83 montre un exemple d'une mesure de courant pour une pression d'azote de 0,2 MPa en polarité positive et en polarité négative. Le courant évolue en fonction de la tension de la manière suivante :

- Lorsque la tension est égale à 0 V, on mesure un bruit de fond de l'ordre de 10^{-12} à 10^{-10} A.
- Lors des premiers paliers, le courant mesuré est constant ; son amplitude est de l'ordre de 10^{-10} A.
- A partir d'une certaine tension $U_{i,courant}$, égale à 45 kV en polarité positive et à -34 kV en polarité négative, la valeur du courant augmente soudainement pour atteindre respectivement 10^{-6} et $2 \cdot 10^{-5}$ A.
- Quand la tension augmente encore, l'amplitude du courant augmente également.

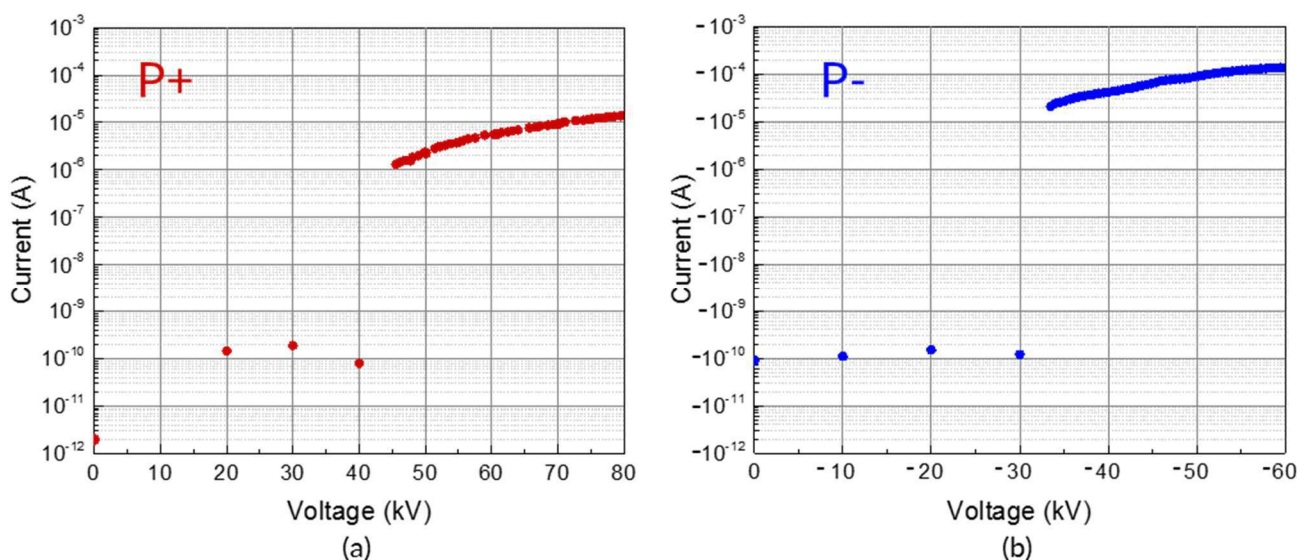


Figure 83 : Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote (a) Polarité positive ; (b) Polarité négative.

Notons qu'à tension égale, le courant continu généré par les pointes en polarité négative est 40 fois plus élevé que le courant produit par le même défaut en polarité positive.

On a montré au §2.3.2 que la mesure du courant sur l'alimentation haute-tension permettait bien de connaître le courant au niveau du défaut. Quand le courant dépasse 10 μ A, on peut compléter de cette manière l'allure de la caractéristique pour les valeurs de tension jusqu'au claquage. Les caractéristiques ainsi obtenues pour une pointe négative sous différentes pressions d'azote sont présentées en Figure 84. Ces résultats confirment que le courant est une fonction croissante de la tension.

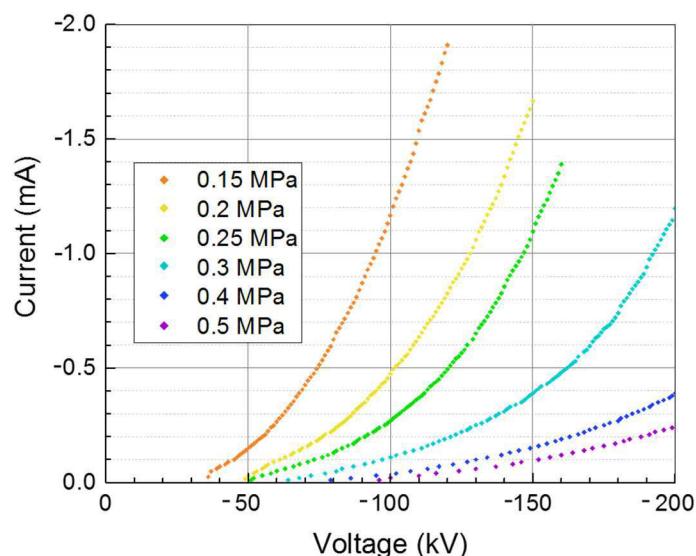


Figure 84 : Caractéristique courant-tension mesurée en présence d'une pointe négative ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension pour différentes pressions d'azote.

On peut s'étonner des grandes valeurs que prend le courant pour des tensions dépassant -100 kV et jusqu'à la tension de claquage. Pourtant, ces valeurs de courant peuvent être soutenues pendant plusieurs minutes sans entraîner d'amorçage. Cela montre qu'on demeure dans un régime de décharges partielles, où la rupture de l'isolation ne se fait pas à l'échelle de la distance inter-électrodes entière.

La lecture des courbes de la Figure 84 permet également de décrire sommairement l'influence de la pression sur le courant généré par le défaut. On remarque en effet que l'augmentation de la pression a pour effet une diminution du courant. Cet effet sera quantifié ultérieurement dans cette partie, de même que la croissance du courant. On peut d'ores et déjà noter que la diminution du courant sous l'effet de la pression va dans le même sens que la diminution du taux de répétition des DP observée au §3.2.2.2.

Afin de mettre en relation la mesure de courant stationnaire avec les méthodes de mesure des décharges partielles déjà étudiées, les valeurs de $U_{i,\text{courant}}$ sont relevées pour des pressions d'azote comprises entre 0,1 et 0,5 MPa et représentées en Figure 85. Sur cette figure est également représentée la tension d'apparition des décharges partielles U_i , mesurée simultanément avec la méthode conventionnelle ou la mesure de lumière.

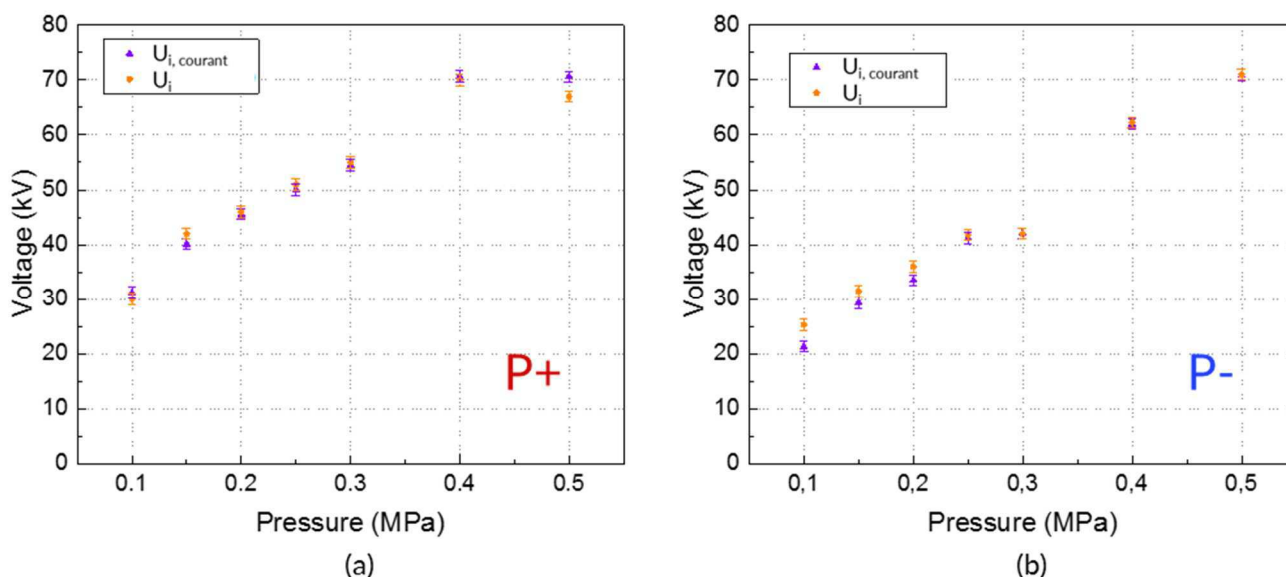


Figure 85 : Tensions d'apparition des décharges partielles en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans l'azote relevées grâce à la mesure de courant et à la méthode conventionnelle
(a) Polarité positive ; (b) Polarité négative.

On voit sur ces graphes que les valeurs de U_i et de $U_{i,courant}$ sont les mêmes, à l'erreur de mesure près, ce qui signifie que le saut de courant stationnaire a lieu à la même tension que l'apparition des DP avec la méthode conventionnelle et la mesure de lumière. On en déduit l'identité de ces tensions caractéristiques pour les deux polarités dans l'azote :

$$U_i = U_{i,courant} \quad (28)$$

De plus, comme pour l'émission de lumière (§4.1.2.1), le courant continue à augmenter même quand la méthode conventionnelle ne permet pas de détecter d'impulsions de décharges partielles. Le comportement du courant stationnaire est donc semblable en tous points à celui de l'émission de lumière. On conclut que la mesure de courant fournit un bon indicateur de la présence de décharges partielles en présence d'une pointe dans l'azote.

En conséquence, on peut dorénavant interpréter la valeur U_i comme la tension d'apparition du phénomène de décharges couronne engendrées par la pointe. Cette apparition des décharges partielles se manifeste par plusieurs phénomènes : l'apparition d'impulsions de courant mesurables par la méthode conventionnelle, l'émission de lumière, et la formation d'un courant continu.

4.2.1.2 Equation de la caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension des décharges couronne dans une géométrie purement coaxiale est décrite par Raizer [116] à l'aide d'une équation de la forme :

$$I = \frac{2 \cdot \mu \cdot U \cdot (U - U_0)}{R^2 \cdot \ln(R/r)} \quad (29)$$

où R et r sont respectivement les rayons de l'électrode extérieure et de l'électrode intérieure, μ est la mobilité des porteurs de charge et U_0 est la tension d'apparition des décharges

couronne. Pour une géométrie donnée dans des conditions expérimentales données, on peut définir la constante $C = \frac{2 \cdot \mu}{R^2 \cdot \ln(R/r)}$, ce qui permet de réécrire l'équation (30) sous la forme :

$$I = C \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (30)$$

Une autre expression est rapportée par Asano *et al.* [117] pour les systèmes d'électrodes pointe-plan. Cette expression fait intervenir une autre constante C_1 :

$$I = C_1 \cdot (U - U_0)^2 \quad (31)$$

La géométrie étudiée dans ces travaux emprunte des éléments à ces deux modèles, puisqu'il s'agit d'une pointe dans une structure coaxiale.

Des ajustements des mesures de courant en polarité négative ont été réalisés par des fonctions définies par les équations (30) et (31). Les erreurs d'ajustement sont toujours inférieures à 1%, sauf pour les mesures à 0,3 MPa qui donnent des résultats moins satisfaisants.

Lors des ajustements, le paramètre U_0 n'est pas fixé. Les valeurs obtenues pour ce paramètre sont représentées en Figure 86. Les valeurs obtenues pour les ajustements de la forme $C_1 \cdot (U - U_0)^2$ sont inférieures de 10 à 20 kV aux valeurs réelles de U_i . En revanche, les valeurs obtenues pour les ajustements de la forme $C \cdot U \cdot (U - U_0)$ sont proches de U_i . On conclut que le modèle de géométrie coaxiale caractérisé par l'équation (30) décrit mieux la caractéristique courant-tension dans la configuration étudiée.

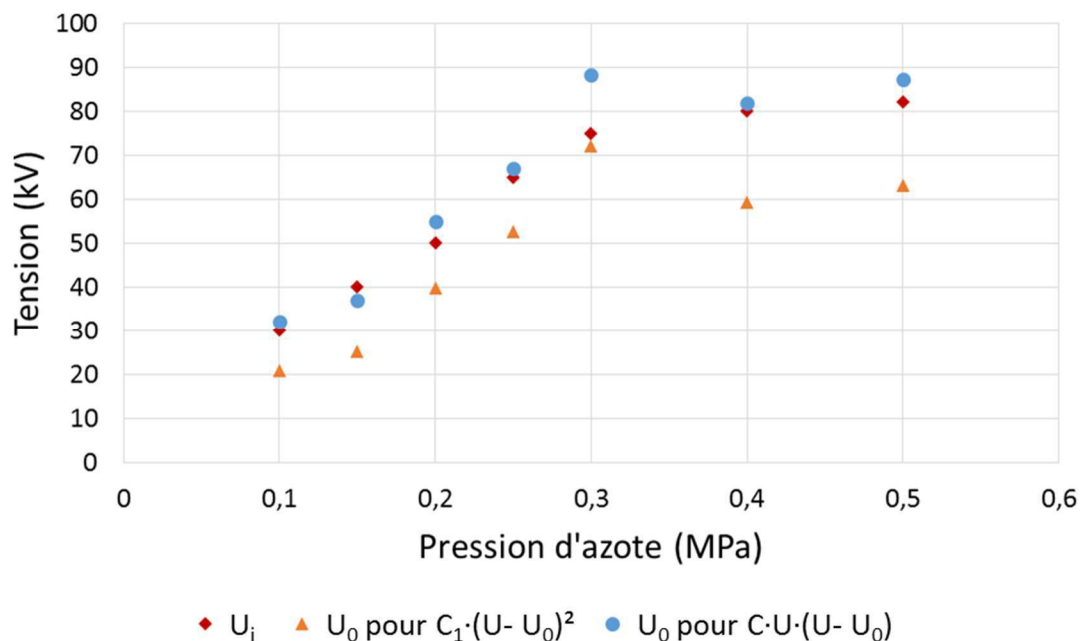


Figure 86 : Valeurs de U_i et du paramètre U_0 pour des ajustements calculés pour différentes pressions d'azote en polarité négative.

Pour confirmer ce résultat, un ajustement est réalisé avec des équations de la forme :

$$I = I_0 + C \cdot U \cdot (U - U_0) \quad (32)$$

où le paramètre I_0 permet de parcourir l'ensemble des polynômes de degré 2. Quand on s'en tient aux valeurs de U_0 trouvées précédemment, les valeurs obtenues pour I_0 sont toutes inférieures à 10^{-5} A, ce qui est une faible valeur par rapport au courant mesuré.

On conclut finalement que le courant a une croissance quadratique par rapport à la tension, régie par l'équation (30). Les ajustements obtenus pour cette équation sont représentés en trait plein sur la Figure 87.

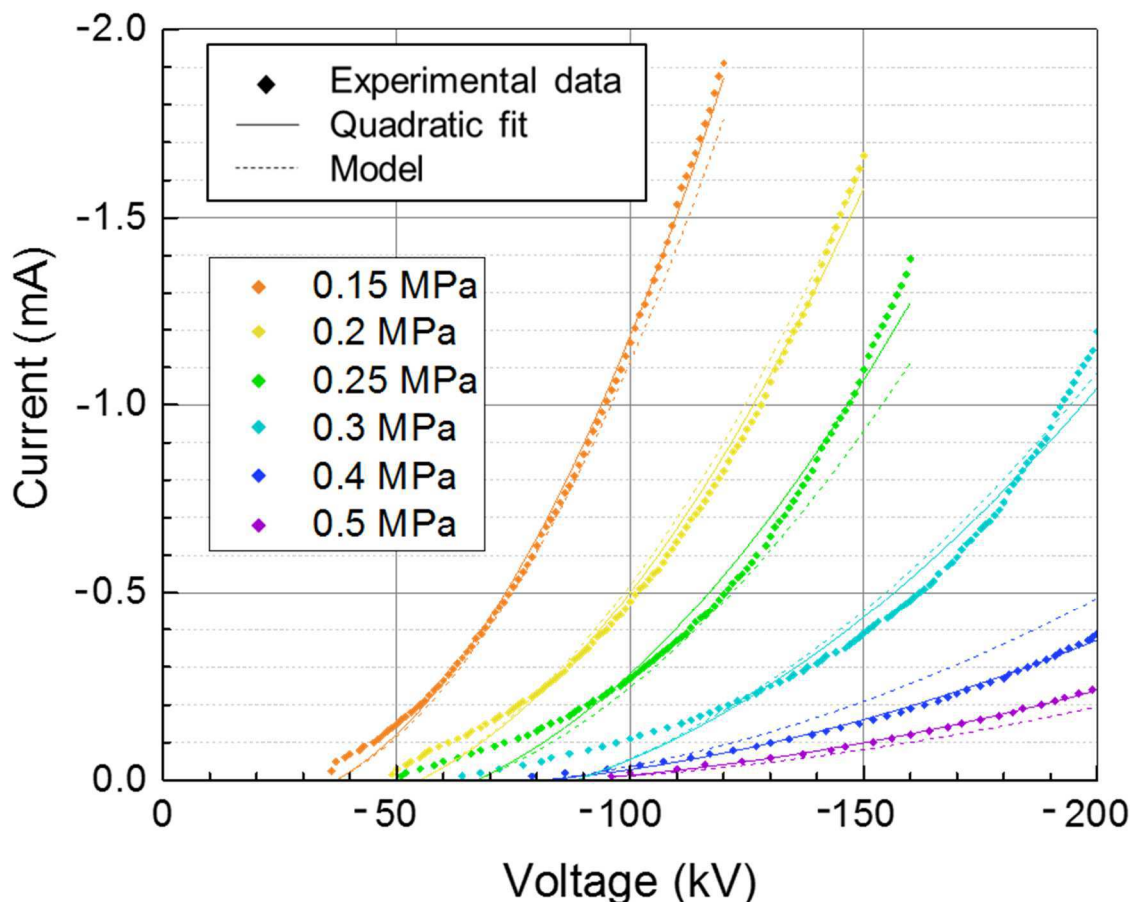


Figure 87 : Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe négative ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension pour différentes pressions d'azote.

4.2.1.3 Effet de la pression

Afin de quantifier l'effet de la pression sur le courant, les valeurs du paramètre C obtenues lors d'ajustements des caractéristiques courant-tension par des équations de la forme donnée en équation (30) sont représentées en Figure 88 pour différentes pressions d'azote. On constate que la valeur de ce paramètre décroît avec la pression.

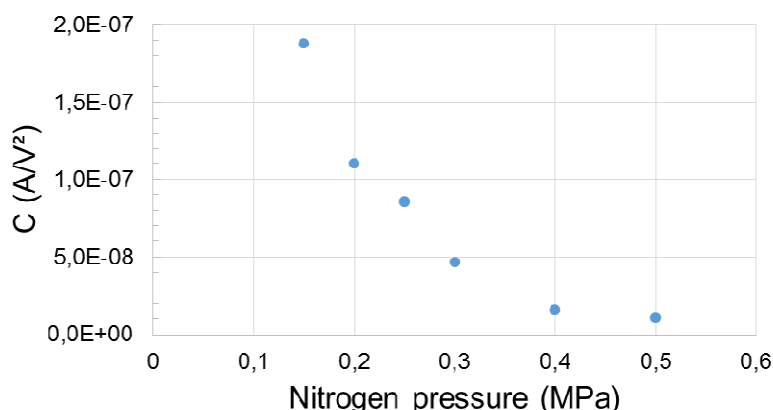


Figure 88 : Valeurs du paramètre C pour des ajustements de la forme $I = C \cdot U \cdot (U - U_0)$ calculés pour différentes pressions d'azote en polarité négative.

D'après l'équation (29), le paramètre C est composé de deux facteurs :

$$C = \frac{2}{R^2 \cdot \ln(R/r)} \cdot \mu \quad (33)$$

Le premier facteur est déterminé par la géométrie des électrodes, et ne subit donc pas l'influence de la pression. Le second est la mobilité des porteurs de charge. On déduit que la mobilité des porteurs de charge diminue quand la pression augmente.

Finalement, le courant stationnaire généré par une pointe peut être calculé à partir de la tension et de la pression grâce à l'expression :

$$I = C \cdot U \cdot (U - U_i) \quad (34)$$

où la constante C est déterminée par les autres paramètres expérimentaux, tels que la géométrie des électrodes, la nature du gaz, la polarité de la tension, la température, etc. Par exemple, la valeur du paramètre C calculée dans l'azote pour la polarité positive est moins élevée que celle obtenue en polarité négative. Les courbes calculées avec ce modèle pour l'azote en polarité négative sont représentées en pointillés sur la Figure 87.

4.2.1.4 Transition entre un régime impulsionnel de décharge et un régime continu (*pulseless*) pour le corona négatif dans l'azote

En présence d'une pointe sur le conducteur haute-tension et dans certaines conditions de pressions d'azote, nous avons vu au §3.2.2 que dans le cadre d'une montée en tension négative, l'apparition des décharges partielles était suivie d'une plage de tension pendant laquelle on ne mesurait pas d'impulsions avec la méthode conventionnelle.

Des mesures complémentaires ont été réalisées pour étudier la transition, pour une pression d'azote donnée, entre les tensions pour lesquelles on mesure des impulsions de DP et celles pour lesquelles on n'en mesure pas. Pour cela, une pointe a été fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote et le courant de décharge a été enregistré à travers une résistance de 1 kΩ à l'aide d'un oscilloscope (§2.3.3). On rappelle que le système de mesure incluant le circuit de protection en cas d'amorçage est capable d'observer des signaux de courant jusqu'à 2,5 MHz. Pour éviter les effets capacitifs lors des variations de tension, les

enregistrements ne sont réalisés que pendant des paliers de tension. La mesure de courant a été réalisée simultanément avec une mesure conventionnelle des décharges partielles.

La Figure 89 montre l'évolution du courant de décharge en fonction de la tension DC négative. Cette évolution est d'abord décrite dans ses grandes lignes avant de revenir sur la forme des impulsions de courant.

Au moment de l'apparition des décharges partielles ($U_i = -50$ kV), on observe des impulsions de courant (Figure 89-a). Ces impulsions sont caractérisées par un front montant d'une durée typique de $4 \mu\text{s}$. L'intervalle entre les impulsions est constant et dure $200 \mu\text{s}$. Leur charge apparente est calculée à 120 ± 15 pC. On remarque également que le niveau de référence du courant n'est pas 0 A, mais prend une valeur i_{refA} égale à $-6 \mu\text{A}$.

Pendant ce temps, la mesure conventionnelle permet de mesurer des impulsions espacées de 150 à $160 \mu\text{s}$ dont la charge apparente va de 115 à 118 pC. Les impulsions mesurées avec les deux méthodes ont la même charge apparente et leur espacement est comparable. On conclut qu'à ce stade, les impulsions mesurées avec l'oscilloscope sont bien celles que l'on peut détecter avec la mesure conventionnelle.

Lorsque la tension augmente, le taux de répétition augmente également (Figure 89-b-c), ce qui se traduit par le fait que l'intervalle de temps entre deux impulsions diminue. On remarque aussi que le niveau de référence du courant i_{refA} augmente, passant par exemple de $-12 \mu\text{A}$ à $-20 \mu\text{A}$ entre -60 kV et -70 kV. Ce phénomène a déjà été signalé dans la littérature pour des modèles réduits d'un défaut de type pointe en polarité négative dans l'air [117] et confirmé dans le cadre de ces travaux (§4.2.1).

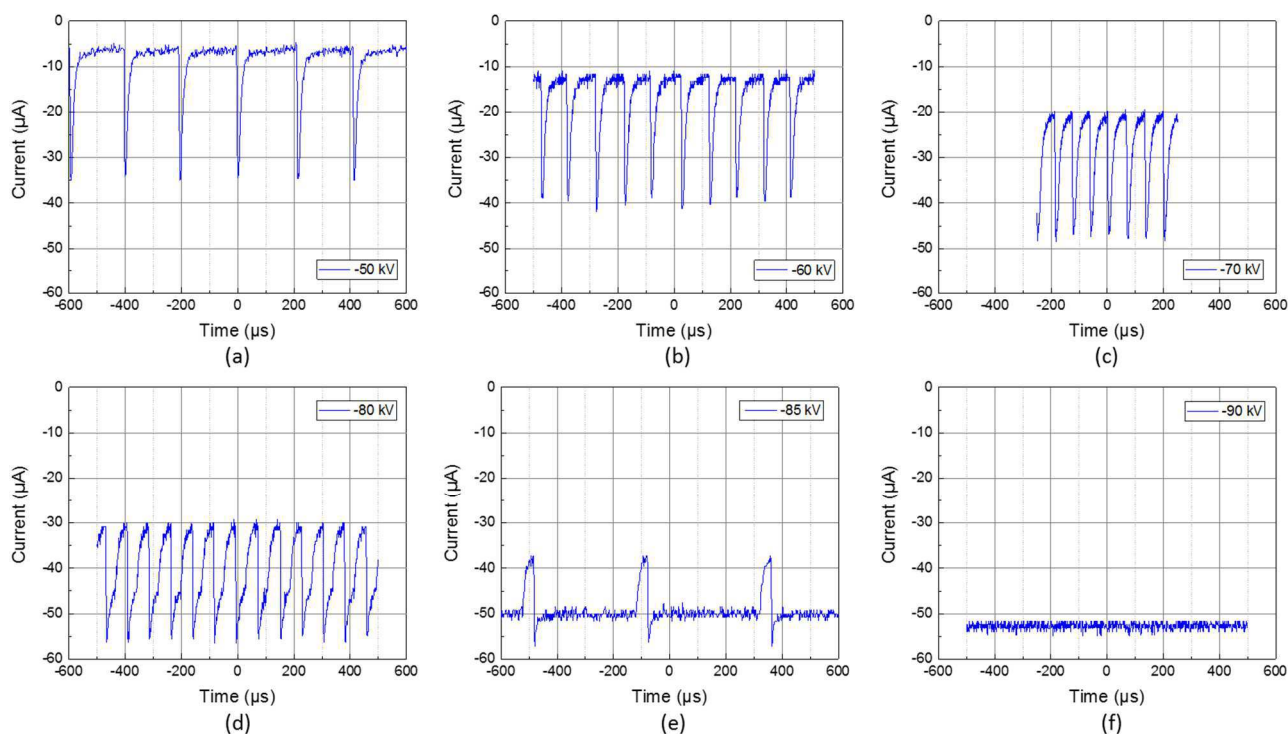


Figure 89 : Courant de décharge en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans $0,2$ MPa d'azote sous différentes tensions négatives. (a) -50 kV, (b) -60 kV, (c) -70 kV, (d) -80 kV, (e) -85 kV, (f) -90 kV.

A partir de -80 kV (Figure 89-d), les impulsions cessent de se rapprocher les unes des autres. La tendance va jusqu'à s'inverser, puisque sous -85 kV (Figure 89-e), les impulsions respectent une période de 400 μs , une durée bien plus longue que celles qu'on a pu observer pour les tensions plus faibles.

La transition vers un régime sans impulsions (Figure 89-e-f) est l'aboutissement de l'augmentation de la période des impulsions de courant de DP, jusqu'à ce qu'il ne reste plus qu'un courant continu. La valeur de ce courant atteint environ -50 μA au moment de la disparition des impulsions, et continue à augmenter si la tension augmente encore.

→ Analyse de la forme des impulsions

L'analyse de la forme des impulsions de courant peut fournir des détails supplémentaires. A partir de l'apparition des DP et jusqu'à -70 kV, la décroissance des impulsions peut être approximée par une fonction exponentielle (Figure 90) de la forme :

$$i = i_{refA} + i_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (35)$$

où la constante de temps τ vaut 10 μs , i_0 étant une constante d'échelle.

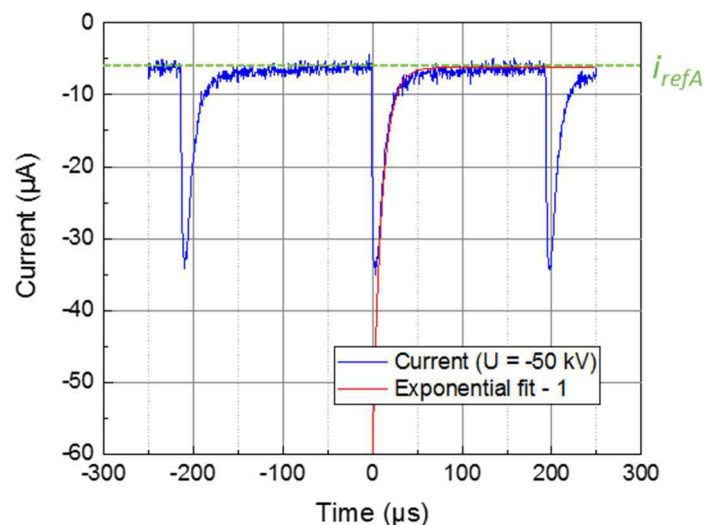


Figure 90 : Courant de décharge et approximation exponentielle de la décroissance des impulsions en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote sous -50 kV.

A partir de -80 kV, les impulsions changent de forme : le front montant est inchangé, mais la décroissance se fait en deux parties, que l'on note A et B (Figure 91).

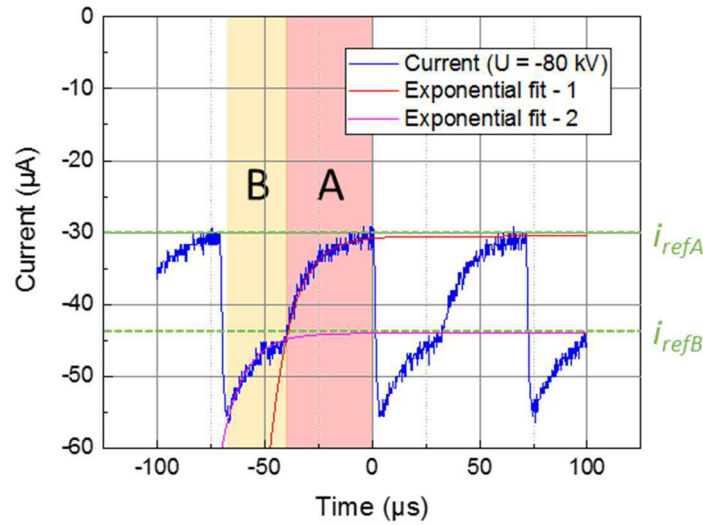


Figure 91 : Courant de décharge et approximations exponentielles de la décroissance des impulsions en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \text{ }\mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote sous -80 kV.

On reconnaît dans la partie A la décroissance exponentielle du courant jusqu'à i_{refA} définie par l'équation (35). D'ailleurs, quand on réalise un ajustement de cette partie A par une fonction exponentielle (Figure 91, courbe rouge), la constante de temps demeure 10 μs . Des ajustements par une fonction exponentielle ont également été réalisés sur la partie B de la décroissance (Figure 91, courbe rose). Cette fois encore, la constante de temps est égale à 10 μs . En revanche, la valeur asymptotique du courant est plus élevée que pour la partie A. Si on note i_{refB} ce second niveau de référence, on a :

$$|i_{refB}| > |i_{refA}| \quad (36)$$

Pour résumer, on observe une décroissance en deux parties qui sont toutes les deux gouvernées par la même constante de temps que les premières impulsions observées. On peut donc penser qu'il s'agit de la constante de temps de relaxation du gaz dans les conditions de l'expérience.

Quand la tension continue à augmenter, la partie B de la décroissance dure de plus en plus longtemps. A -85 kV par exemple (Figure 92), la partie B de la décroissance dure 350 μs , alors qu'elle ne durerait que 55 μs à -80 kV. Dans le même temps, le démarrage d'une nouvelle impulsion après la partie A de la décroissance exponentielle continue à s'accélérer, si bien que le courant ne s'approche de i_{refA} que pendant un temps très court. A ce point, le courant est déjà dominé par le niveau i_{refB} .

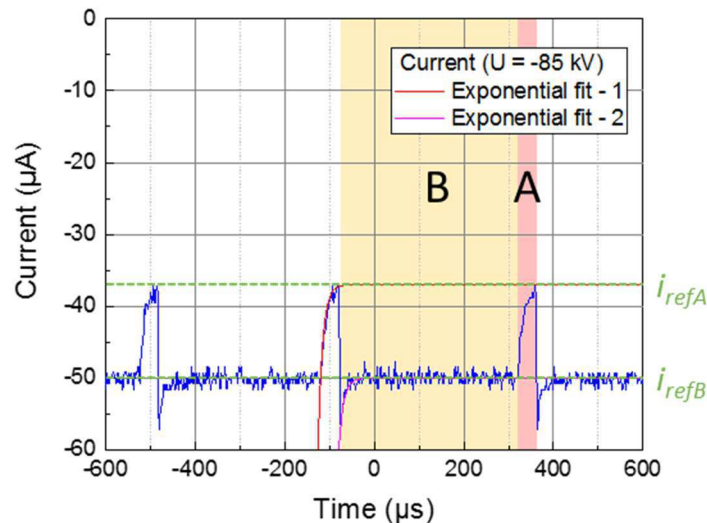


Figure 92 : Courant de décharge et approximations exponentielles de la décroissance des impulsions en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \text{ }\mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote sous -85 kV.

Quand la tension atteint -90 kV, la partie B de la décroissance exponentielle est devenue tellement longue qu'elle ne laisse jamais la place à la partie A. En conséquence, on n'observe plus d'impulsions, et le niveau de courant i_{refB} est maintenu.

La transition observée est bien celle entre un régime impulsionnel tel qu'il a été caractérisé par Trichel [3] et un régime continu caractérisé par la génération d'un courant continu.

Dans la littérature, le mécanisme de passage d'un régime impulsionnel à un régime continu dans une maquette réduite remplie d'air sous pression est décrit par Florkowski *et al.* comme une décroissance progressive du taux de répétition des impulsions [19], ce que l'on observe effectivement dans nos expériences. On trouve malgré tout quelques différences quantitatives, à savoir la plage de pression pour laquelle ce phénomène peut être observé, et surtout la largeur de la plage de tension pendant laquelle le taux de répétition diminue. Dans l'article cité, le taux de répétition des impulsions diminue progressivement, et le claquage survient lorsque ce taux atteint 0 (Figure 93-a). Dans nos travaux, le taux de répétition des impulsions chute brutalement, et l'activité corona est complètement *pulseless* sur la plage de tension $U_i - U_{bd}$ (Figure 93-b).

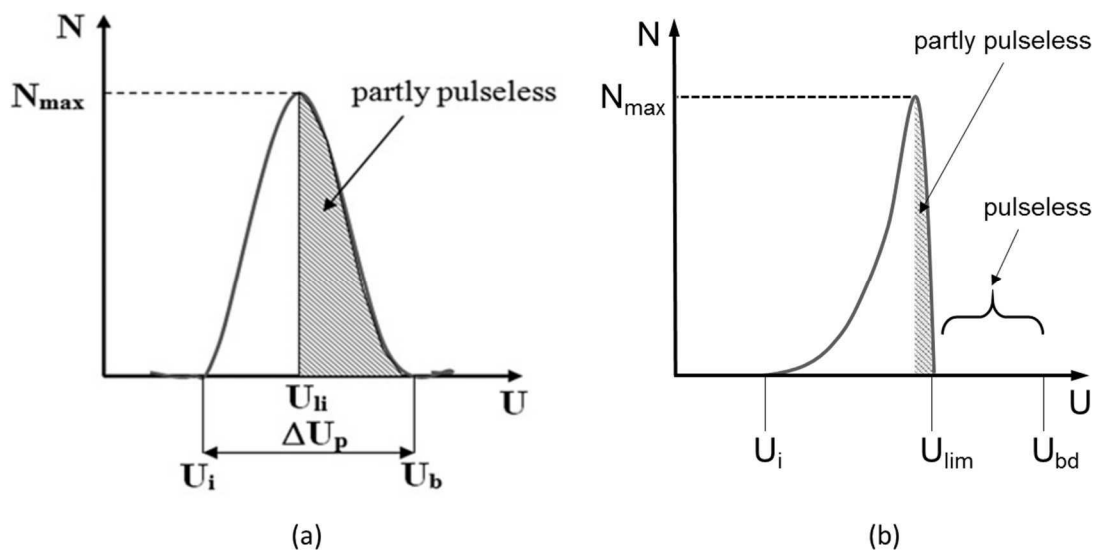


Figure 93 : Evolution du taux de répétition des impulsions en fonction de la tension appliquée
(a) Dans les travaux de Florkowski et al. [19] ; (b) Dans nos travaux.

Les raisons de cette différence pourraient être la différence de distance inter-électrodes, la teneur en O_2 , ou encore l'uniformité du champ électrique en arrière-plan du défaut. En effet, ces facteurs ont tous une influence sur la formation des impulsions de courant.

Physiquement, la transition peut être expliquée par le passage du phénomène local de formation des impulsions de Trichel au voisinage de la pointe à un régime stationnaire caractérisé par une ionisation du gaz sur toute la distance inter-électrodes. Cette explication est cautionnée par Akishev *et al.* [111] dans un article où ce régime stationnaire est interprété comme une étape dans la transition vers l'arc électrique. Ce point est déjà détaillé dans le §3.2.2.1.

4.2.1.5 Bilan des mesures de courant en présence d'une pointe dans l'azote

Dans ce paragraphe, les différents régimes d'une caractéristique courant-tension dans le gaz (§1.1.2.1, Figure 4) ont été identifiés dans les deux polarités : le régime ohmique et sa saturation entre 0 V et U_i , le régime d'avalanche à partir de U_i et jusqu'au claquage. Il a également été démontré que la croissance du courant au-delà de U_i était quadratique par rapport à la tension.

La comparaison de la mesure de courant stationnaire avec la mesure conventionnelle et la mesure de lumière a montré que le courant stationnaire était également un indicateur de la présence de décharges partielles dans le gaz dans les deux polarités.

Les mesures de courant haute-fréquence ont permis de décrire avec précision la transition entre un régime impulsionnel et un régime *pulseless* en polarité négative. On a là la confirmation que lorsque la méthode conventionnelle ne mesure pas d'impulsions de DP, il ne s'agit pas d'un problème de résolution de la mesure, mais bien de l'absence d'impulsions de courant à mesurer.

4.2.2. Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe dans le SF₆

Comme dans l'azote au paragraphe précédent (4.2.1), le courant généré par une pointe sera ici caractérisé dans le SF₆ en fonction du niveau de tension et de la pression du gaz. Une équation de la caractéristique courant-tension sera également proposée.

4.2.2.1 Effet du niveau de tension

Afin de caractériser le courant stationnaire généré en présence d'une pointe dans le SF₆, le courant est mesuré avec un électromètre pendant que la plage de tension 0 - 200 kV est balayée par paliers de 10 kV et 1 minute (détails au §2.6.2). Cette expérience est menée dans les deux polarités pour les pressions de SF₆ de la gamme 0,1 – 0,5 MPa.

Un exemple de caractéristique courant-tension ainsi obtenue est présenté en Figure 94 pour une pression de SF₆ de 0,2 MPa dans les deux polarités.

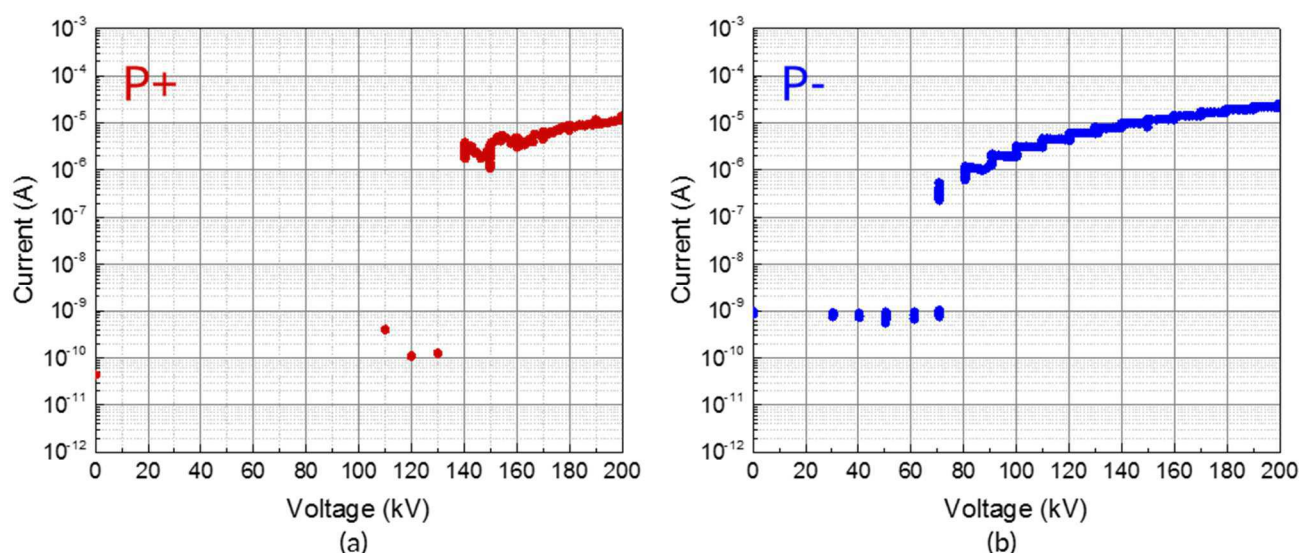


Figure 94 : Caractéristique courant-tension en présence d'une pointe ($l = 5$ mm, $\varnothing = 500$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa de SF₆ (a) En polarité positive ; (b) En polarité négative.

Pour une pression donnée de SF₆, voici comment évolue le courant stationnaire au cours d'une montée en tension par paliers :

- ➔ Lorsque la tension est égale à 0 V, on mesure un bruit de fond de l'ordre de 10⁻¹⁰ A.
- ➔ Lors des premiers paliers, le courant mesuré est constant ; son amplitude est de l'ordre de 10⁻¹⁰ à 10⁻⁹ A.
- ➔ A partir d'une certaine tension $U_{i, \text{courant}}$, la valeur du courant augmente soudainement. Dans l'exemple de la Figure 94, cette tension seuil est de 140 kV en polarité positive et -70 kV en polarité négative. Les valeurs du courant sont alors respectivement comprises dans la plage de 10⁻⁶ à 10⁻⁵ A et de 10⁻⁷ à 10⁻⁶ A. On remarque que contrairement aux mesures dans l'azote, l'amplitude du courant à la tension $U_{i, \text{courant}}$ est 10 fois moins élevée en polarité négative qu'en polarité positive.

→ Quand la tension augmente encore, l'amplitude du courant augmente.

A part les tensions d'apparition qui sont très différentes, ce comportement est très similaire à ceux que l'on a précédemment observés dans l'azote. On a montré au §4.2.1 que dans l'azote, la tension d'apparition du courant stationnaire $U_{i, \text{courant}}$ était représentative de l'apparition du phénomène de décharge corona engendré par la pointe.

La mesure du courant nous offre donc un moyen de confirmer les frontières des régions d'existence des DP dans le SF_6 déterminées grâce à la mesure de lumière (§4.1.2.2) et présentées en Figure 81. Dorénavant, dans le SF_6 également, on identifiera U_i et $U_{i, \text{courant}}$ pour ne plus parler que de la tension d'apparition des décharges partielles U_i .

4.2.2.2 Modélisation de la caractéristique courant-tension : effet de la pression

Comme dans l'azote (§4.2.1), des ajustements des caractéristiques courant-tension sont réalisés avec des fonctions quadratiques du type :

$$I = C \cdot U \cdot (U - U_i) \quad (37)$$

où le courant est noté I , la tension U et la pression P . La constante C dépend des conditions expérimentales, notamment la pression du gaz et la polarité de la tension. Dans le SF_6 , on note plus particulièrement que la valeur du paramètre C décroît avec la pression, et qu'elle est plus élevée en polarité positive qu'en polarité négative.

Les résultats confirment que la croissance du courant en fonction de la tension au-delà de U_i est quadratique.

Cette équation conforte l'observation de l'effet de la pression sur le courant mesuré dans le SF_6 dans les deux polarités. Tous les autres paramètres étant égaux par ailleurs, quand la pression augmente, le courant diminue.

4.2.3. Caractéristique courant-tension en présence d'une particule libre métallique

La même démarche a été suivie en présence de particules libres métalliques, afin d'obtenir là aussi des caractéristiques courant-tension. Des mesures de courant stationnaire ont donc été conduites en présence d'une particule dans l'azote ou dans le SF_6 , pour des pressions allant de 0,1 MPa à 0,5 MPa.

Pendant ces mesures, le décollage de la particule a été détecté visuellement et grâce à la mesure conventionnelle des décharges partielles, mais aucune variation du courant stationnaire n'a pu être mesurée. On suppose donc que les décharges partielles générées par des particules libres métalliques sont purement transitoires.

La mesure du courant stationnaire n'est donc pas adaptée à la détection des défauts de type particule métallique libre dans les conditions expérimentales de ces travaux.

4.2.4. Avantages et inconvénients de la mesure de courant stationnaire pour la détection des défauts

La force de la mesure de courant stationnaire est sa haute sensibilité en présence d'un défaut de type pointe. L'amplitude du courant augmente en effet d'au moins trois décades quand les décharges partielles apparaissent. Il semble donc assez commode de fixer un seuil de détection compris entre le niveau de courant sans DP et le niveau de courant à la tension d'apparition. En revanche, la mesure de courant stationnaire s'est révélée totalement inefficace pour détecter des défauts de type particule.

Un inconvénient de cette mesure est la difficulté qu'un industriel rencontrera pour l'installer sur un poste en conditions réelles d'utilisation. Le capot que nous avons utilisé pour la mesure dans ces travaux n'entre pas dans la conception des postes. De plus, le circuit de mesure du courant devra inclure une protection contre les surtensions en cas d'amorçage dans le poste.

4.3. Mesure des ondes UHF

La détection des décharges partielles par la mesure des ondes UHF qu'elles engendrent est une technique utilisée sur les postes sous enveloppe métallique actuels, conçus pour le courant alternatif. Les 4 étapes de la méthode classique d'identification des défauts grâce à la méthode UHF en courant alternatif sont décrites au paragraphe 1.2.2.3. Ces 4 étapes peuvent être adaptées au DC de la manière suivante :

- 1- Analyse spectrale du système sur la bande passante du capteur UHF afin de déterminer la bande de fréquence associée aux décharges partielles. La fréquence de détection doit permettre d'éviter les perturbations externes telles que les ondes GSM ou les décharges corona dans l'air.
- 2- Analyse temporelle sur la bande de fréquence choisie. On détecte des impulsions de décharge et on en extrait pour chacune d'elles deux informations : l'amplitude (en Volt ou en dBm) et l'instant précis auquel elle a été mesurée.
- 3- Intégration de l'ensemble des impulsions enregistrées à un diagramme $V(\Delta t)$ ou $\text{dBm}(\Delta t)$ comparable à celui qu'on utilise pour identifier les défauts avec la méthode conventionnelle (§5.1). La charge apparente en pC est simplement remplacée par une amplitude de décharge en Volt ou en dBm.
- 4- La forme des nuages de points obtenus peut être interprétée de la même manière que pour la méthode conventionnelle (comme par exemple au §5.3).

C'est la première étape qui fait l'objet de cette partie. On se demande donc tout d'abord si la mesure des ondes UHF peut permettre la détection des décharges partielles en courant continu dans le SF₆. Cette question se pose pour les défauts de type pointe et particule, dans les deux polarités et pour les pressions de la gamme 0,1-0,5 MPa. Au fil des résultats, on

cherchera si une bande de fréquence peut être préconisée pour la reconnaissance des défauts dans le poste.

4.3.1. Détection des défauts de type particule

Afin de déterminer si la mesure des ondes UHF permet de détecter des défauts de type particule dans le SF₆, on enregistre les maxima d'amplitude de chaque fréquence du spectre UHF en présence de différents types de particules lors de paliers de tension (plus de détails au §2.5 et au §2.6.2). Ces enregistrements sont réalisés dans les deux polarités et pour des pressions de SF₆ allant de 0,1 à 0,5 MPa.

Les spectres obtenus pour la gamme 300-1800 MHz après le décollage de la particule dans différentes configurations sont présentés en Figure 95 : un filament de cuivre en polarité négative, le même filament en polarité positive, et un copeau d'aluminium en polarité positive (voir le §2.1.3, Figure 43). Il est important de noter que le spectre présenté pour une particule filamenteuse en polarité négative a bénéficié d'une amplification, qui entraîne également l'amplification du bruit. Les pics de la bande 1280 – 1325 MHz (en bleu sur la figure) sont récurrents lors des mesures amplifiées et ne sont pas engendrés par des signaux de DP.

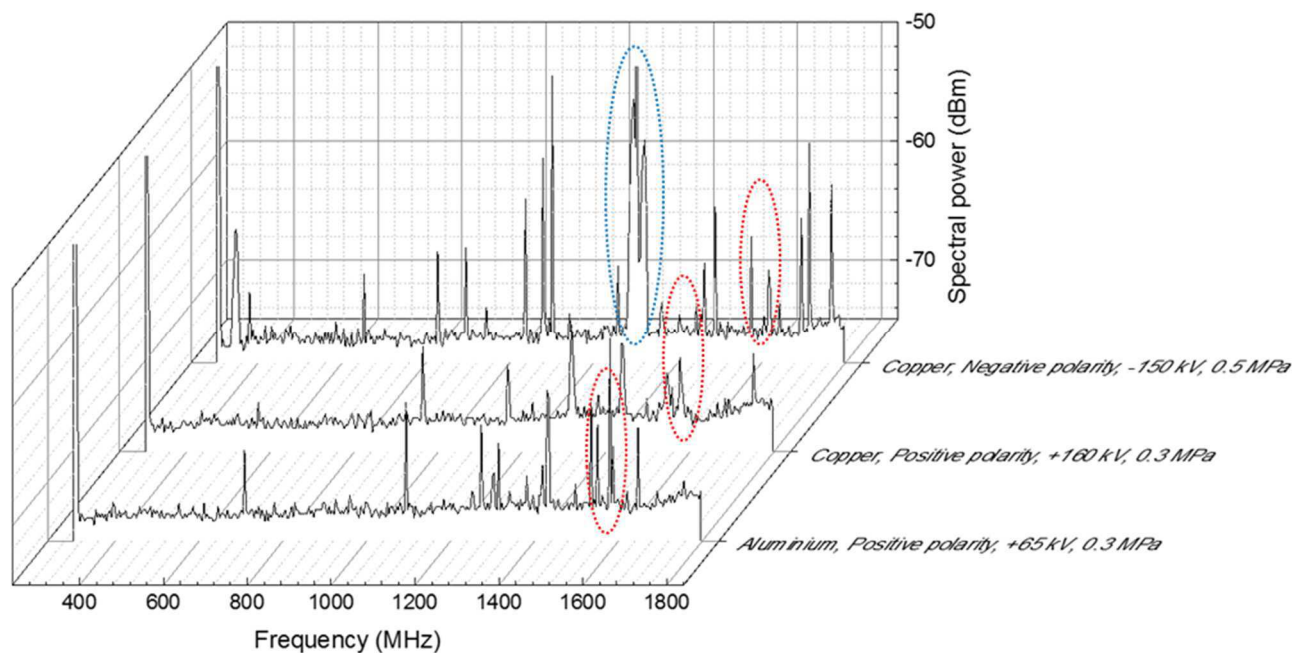


Figure 95 : Spectres UHF obtenus en présence de plusieurs types de particules dans le SF₆.
La mesure réalisée en polarité négative a bénéficié d'une amplification de +28 dB.

Les spectres mesurés présentent de multiples pics d'amplitude propres à l'activité de décharge partielle. La méthode UHF permet donc effectivement de détecter les DP engendrées par des particules libres métalliques. On remarque ensuite que la bande 1575 – 1580 MHz (entourée en rouge sur la Figure 95) présente des pics d'amplitude dans les trois spectres présentés, ce qui montre qu'elle permet de détecter les trois types de

particules. Cette bande de fréquence est donc retenue pour la détection des défauts de type particule dans le poste.

On peut noter que la mesure n'a pas toujours nécessité l'emploi d'un module de pré-amplification. On pourrait en utiliser pour rendre la détection encore plus sensible, et ainsi mettre en évidence d'autres plages de fréquence pour la détection.

4.3.2. Détection des défauts de type pointe dans le SF₆

Pour déterminer si la mesure des ondes UHF permet de détecter des défauts de type pointe dans le SF₆, on mesure le spectre UHF en présence d'une pointe au cours d'une montée en tension par paliers (protocole détaillé aux paragraphes 2.5 et 2.6.2). Ces enregistrements sont réalisés dans les deux polarités et pour des pressions de SF₆ allant de 0,1 à 0,5 MPa. Si le spectre est enrichi à partir de la tension d'apparition des décharges partielles, on déduira que la détection est possible. Afin d'améliorer la sensibilité des mesures, le module d'amplification de +28 dB décrit au §2.5 a été ajouté entre l'antenne et l'appareil de mesure.

La Figure 96 montre un exemple d'enregistrement obtenu pour une pointe placée dans 0,3 MPa de SF₆ en polarité positive et en polarité négative. Dans ces conditions, les tensions d'apparition des décharges partielles déterminées grâce aux autres méthodes de détection sont respectivement 180 kV et -90 kV. En polarité positive (Figure 96-a), on observe effectivement un enrichissement du spectre à partir de 180 kV pour de multiples fréquences. Cela permet de conclure que les décharges partielles génèrent des ondes UHF qui sont captées par l'antenne. En revanche, en polarité négative (Figure 96-b), on ne perçoit aucune modification, même quand la tension d'apparition des DP est dépassée de plusieurs dizaines de kV. Pourtant, la présence de décharges partielles est toujours confirmée par les mesures de courant et d'émission lumineuse.

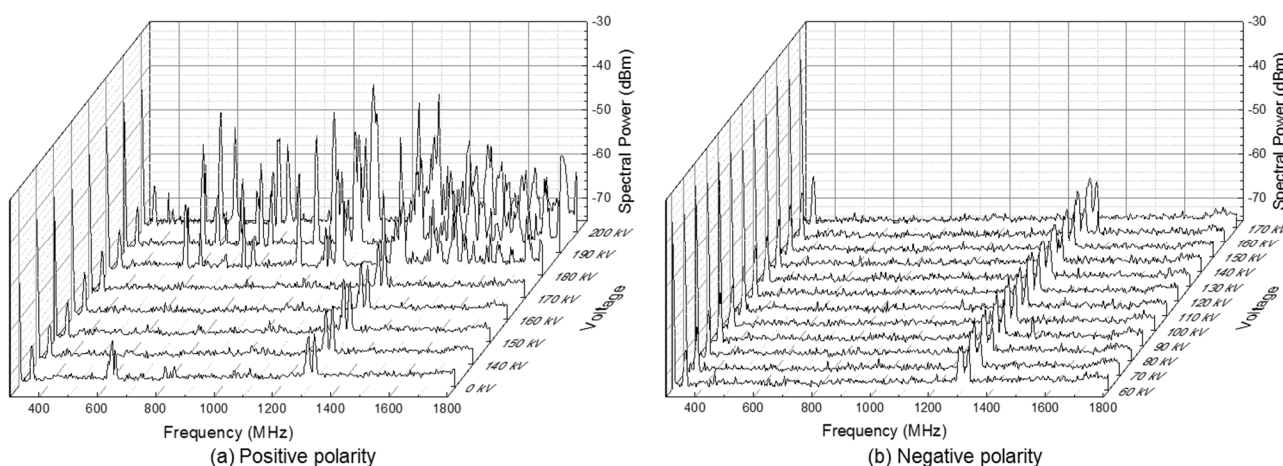


Figure 96 : Spectre UHF (amplification de +28 dB) en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,3 MPa de SF₆ pour différents niveaux de tension (a) En polarité positive ; (b) En polarité négative.

Nos recherches bibliographiques n'ont pas permis de trouver trace d'un tel comportement de non-détection des DP par une mesure UHF en polarité négative. Au contraire, les études

menées en AC [35], [39], [60], [62] font état d'une détection qui a lieu aussi bien dans l'alternance positive que dans l'alternance négative. Toutefois, comme au paragraphe 3.2, on remarque que ces études mettent en jeu des pointes dont la longueur est nettement supérieure à celle que nous utilisons pour notre propre caractérisation. On peut donc penser que l'activité corona générée en DC par un défaut de taille raisonnable est trop faible pour être détectée par une chaîne de mesure UHF classique.

De notre côté, nous avons voulu nous assurer que l'absence de détection n'avait pas pour origine un problème de mesure. Les expériences dans le SF₆ en polarité négative ont donc été reproduites, et le bon état de marche de tous les éléments de la chaîne de mesure a été vérifié avant et après les mesures. On retrouve les mêmes résultats. Enfin, on s'est placé dans l'azote, où l'on a vérifié que l'on pouvait bien détecter l'activité de DP en polarité négative. Le résultat de cette mesure dans 0,3 MPa d'azote est présenté en Figure 97. A partir de -70 kV, qui est la tension d'apparition des décharges partielles selon la norme IEC 60270, le spectre UHF est enrichi pour de nombreuses fréquences différentes.

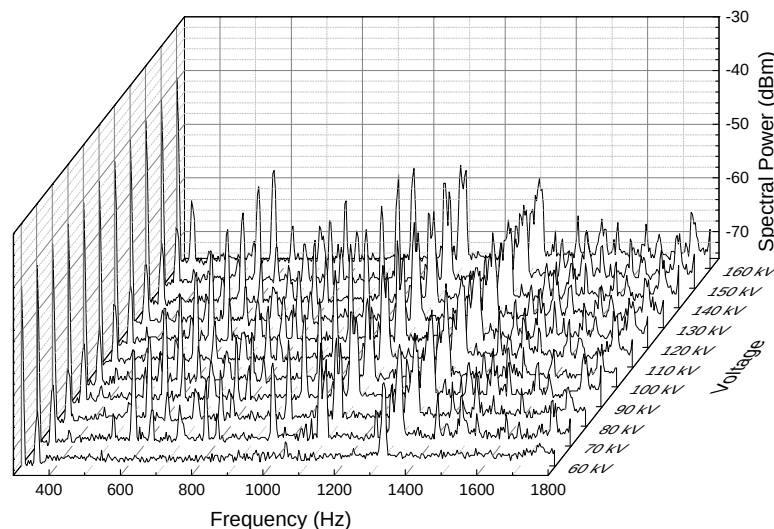


Figure 97 : Spectre UHF en présence d'une pointe ($l = 5 \text{ mm}$, $\varnothing = 500 \mu\text{m}$) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,3 MPa d'azote pour différents niveaux de tension négative (amplification de +28 dB).

Concernant le choix de la fréquence de mesure des DP, la bande 1575 – 1580 MHz retenue au paragraphe précédent (§4.3.1) pour la détection des défauts de type particule ne fait pas partie des fréquences enregistrées en présence d'une pointe. Elle doit donc être complétée avec une bande de fréquence qui permette de détecter les pointes positives ; par exemple 1500 – 1502 MHz. Il ne faut pas oublier que ces fréquences dépendent de la géométrie du poste. Elles ne sont donc adaptées qu'à la maquette expérimentale utilisée dans ces travaux. La détection de défauts dans un autre environnement nécessitera un choix de fréquences spécifiques à la nouvelle installation.

4.3.3. Conclusions sur la mesure UHF

Toutes les mesures effectuées en présence d'une particule libre métallique ont permis d'enregistrer des ondes UHF, sans qu'une amplification soit nécessaire. La mesure UHF est donc très performante pour les décharges partielles produites par des particules libres métalliques en DC.

On peut tirer deux conclusions des observations en présence d'une pointe en DC. Premièrement, on ne parvient pas à détecter un défaut de type pointe dans le SF₆ en polarité négative malgré la proximité du capteur et une forte amplification (+28 dB). Deuxièmement, la détection d'un défaut de type pointe en polarité positive dans le SF₆ est possible, pour peu qu'on dépasse la tension d'apparition des décharges partielles.

Des investigations plus poussées seront nécessaires pour comprendre pourquoi on ne détecte pas l'activité de décharge couronne dans le SF₆ en polarité négative dans nos conditions expérimentales.

Dans de futurs travaux, l'analyse temporelle des décharges enregistrées grâce à la mesure UHF permettra une meilleure caractérisation des décharges partielles avec cette méthode.

*La méthode UHF de détection des décharges partielles est prometteuse car elle permet de détecter les DP dans des conditions où la méthode conventionnelle en est incapable, et d'identifier les défauts à l'instar de cette dernière.
Le problème de la détection subsiste pour les pointes négatives dans le SF₆.*

4.4. Conclusion

Au Chapitre 3, on avait mis en évidence des conditions expérimentales dans lesquelles la méthode conventionnelle ne détectait pas de décharges partielles en DC : les pointes dans le SF₆ et les pointes négatives dans l'azote à basse pression.

Les mesures de courant stationnaire et d'émission lumineuse ont confirmé que malgré l'absence de détection par la méthode conventionnelle, le défaut était bel et bien le siège d'une activité de DP.

La mesure haute-fréquence du courant de décharge généré par une pointe négative dans l'azote a permis de décrire la transition entre deux formes de DP : la première génère des impulsions de courant détectables par la méthode conventionnelle, alors que la deuxième est caractérisée par la production d'un courant stationnaire sans impulsions. Cette deuxième forme de DP n'est pas détectable par la méthode conventionnelle.

La mesure de ce courant stationnaire est d'ailleurs une manière alternative de détecter l'activité corona. Elle permet également de mesurer la tension d'apparition des décharges partielles. Cette mesure est tout aussi performante dans le SF₆ que dans l'azote, ce qui en fait un indicateur efficace de la présence d'un défaut de type pointe. La mesure de courant nécessite la présence du capot coaxial qui n'est pas un élément habituel dans les PSEM. La mise en place de cette mesure sur des équipements industriels demanderait donc des adaptations importantes.

La mesure des rayonnements lumineux donne des résultats comparables à ceux de la mesure de courant stationnaire. Toutefois, les mesures réalisées sont très dépendantes de la position du capteur, ce qui nuit à la généralisation des résultats.

Ces deux mesures stationnaires se sont révélées inefficaces pour détecter des défauts de type particule métallique libre.

La mesure des ondes UHF apparaît comme une solution polyvalente, capable de détecter l'activité de DP pour des défauts de type pointe ou particule. Elle peut même potentiellement être utilisée pour de la reconnaissance de défaut. Malheureusement, nous n'avons pas réussi à détecter un défaut de type pointe en polarité négative dans le SF₆ sous contrainte DC. C'est la seule limitation entrevue pour la méthode UHF.

Notons qu'en présence d'un défaut de type pointe dans le SF₆, l'émission lumineuse et le courant stationnaire mesurés en présence d'une pointe étaient 10 fois plus faibles en polarité négative qu'en polarité positive. La mesure UHF s'est ensuite révélée incapable de détecter les décharges partielles pour une pointe négative alors que la mesure est performante en polarité positive. Ce sont donc maintenant trois méthodes différentes de mesure des DP qui font état d'une activité corona moins intense en polarité négative qu'en polarité positive dans le SF₆ en DC. Ce phénomène reste à expliquer. En attendant, cela suggère que l'absence de détection avec la mesure UHF pourrait n'être qu'un problème de sensibilité.

Chapitre 5. Identification des défauts

Les décharges partielles révèlent la présence d'un défaut de l'isolation électrique. La mesure des DP permet donc de *détecter* les défauts. On peut aller plus loin en utilisant les enregistrements de décharges partielles pour déterminer la nature du défaut qui les a générées. C'est cette démarche que l'on appelle *identification* des défauts.

Pour réussir à identifier le type de défaut à l'origine d'une mesure de DP, il faut tout d'abord extraire de l'enregistrement une donnée qui soit différente pour des défauts différents. Cette donnée peut être appelée « signature », ou encore « descripteur ». En AC, il s'agit classiquement du *Phase-Resolved PD pattern* (PRPD *pattern*), ou diagramme de phase, où la charge apparente de chaque décharge est représentée en fonction de la phase de l'onde de tension alternative à l'instant de sa mesure (§1.3.1). Il n'y a pas de consensus sur le descripteur permettant de distinguer les types de défaut en DC.

Il s'agit ensuite de faire le lien entre les descripteurs et les défauts associés. Cela peut être fait par un expert grâce à sa compréhension de l'origine physique des décharges partielles pour chaque type de défaut ou grâce à son retour sur expérience.

Cette tâche d'association d'une signature à un type de défaut peut être réalisée automatiquement par un ordinateur grâce à un algorithme de reconnaissance. Cette démarche est d'autant plus intéressante que le descripteur est potentiellement complexe. On utilise pour cela un algorithme d'apprentissage supervisé, qui est une branche de l'apprentissage automatique (*Machine Learning*).

L'utilisation d'un tel algorithme suppose un apprentissage à partir d'une base de données qui contiendra un grand nombre d'exemples de signatures pour chaque type de défaut.

Dans le cadre de ce travail, on se propose de mettre en place une reconnaissance automatique des défauts adaptée aux mesures en courant continu. Les parties de ce chapitre reprennent les différentes étapes nécessaires pour atteindre cet objectif. La première partie sera consacrée à la définition d'une signature à partir des enregistrements de décharges partielles. La deuxième partie décrira comment constituer une base de données. Et la troisième partie traitera de l'implémentation d'un algorithme de reconnaissance automatique et de l'optimisation de cet algorithme.

En préambule, il convient de rappeler que les études menées dans les précédents chapitres ont mis en évidence des différences fondamentales de comportement des défauts selon la polarité de la tension DC appliquée. Du point de vue d'un algorithme de classification, une particule en polarité positive n'a donc rien à voir avec une particule en polarité négative. En conséquence, 4 types de défaut seront considérés dans ce chapitre :

- ➔ Les pointes sur le conducteur haute-tension en polarité positive
- ➔ Les pointes sur le conducteur haute-tension en polarité négative
- ➔ Les particules métalliques libres en polarité positive
- ➔ Les particules métalliques libres en polarité négative

5.1. Définition d'une signature en DC

La reconnaissance du type de défaut à partir de la mesure des décharges partielles nécessite d'extraire des enregistrements de DP une signature des différents types de défaut. Le diagramme de phase couramment utilisé pour la reconnaissance en AC n'existant plus en DC, il faut trouver un autre indicateur.

La principale qualité que doit avoir la signature utilisée pour la reconnaissance des défauts est de permettre de discriminer des défauts. Il faut pour cela que la signature soit différente pour des défauts différents. Il est également important que le descripteur soit caractéristique du type de défaut. Cela signifie que les descripteurs obtenus pour plusieurs exemples d'un même type de défaut doivent être semblables. Enfin, si la signature doit avoir une complexité suffisante pour répondre aux deux premiers critères précédents, une trop grande complexité est un défaut pour l'apprentissage d'un algorithme de reconnaissance automatique.

Ces trois qualités sont successivement recherchées dans les trois paragraphes qui viennent.

5.1.1. Intérêt du diagramme $q(\Delta t)$

Dans ce paragraphe, on recherche une signature qui soit différente pour des types de défaut différents.

Dans le passé, les chercheurs ont identifié des corrélations entre les amplitudes des décharges partielles successives et les intervalles de temps qui séparent ces décharges pour tous types de défauts, particulièrement en DC [5], [64], [75], [118]. De multiples indicateurs ont été définis en faisant intervenir ces grandeurs (voir le §1.3.1).

On choisit maintenant de s'intéresser au diagramme $q(\Delta t)$, qui représente des décharges partielles selon deux coordonnées : leur charge apparente et l'intervalle de temps qui les sépare de la décharge précédente (Figure 98).

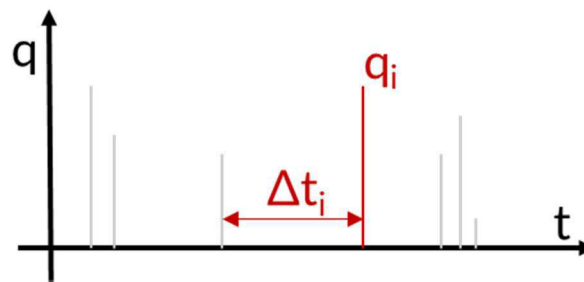
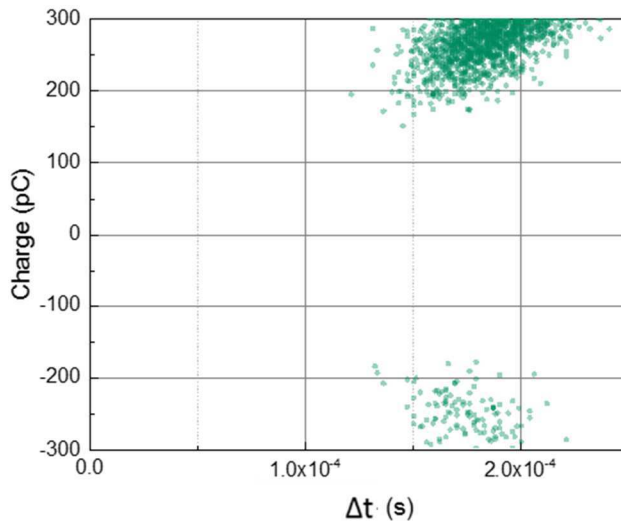
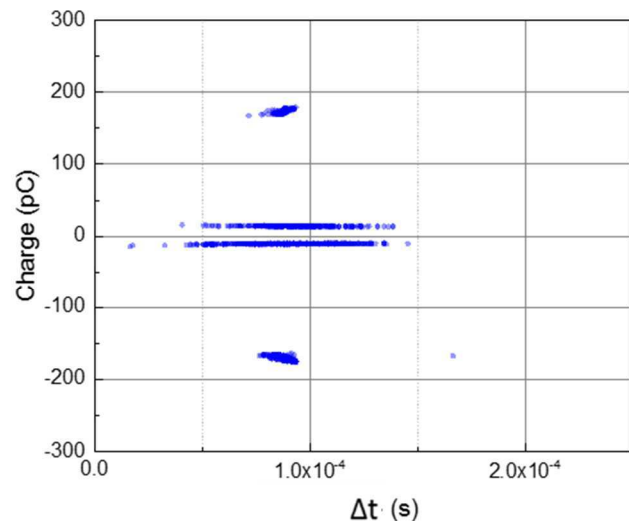


Figure 98 : Définition du couple $(q, \Delta t)$ pour l'analyse temporelle des DP

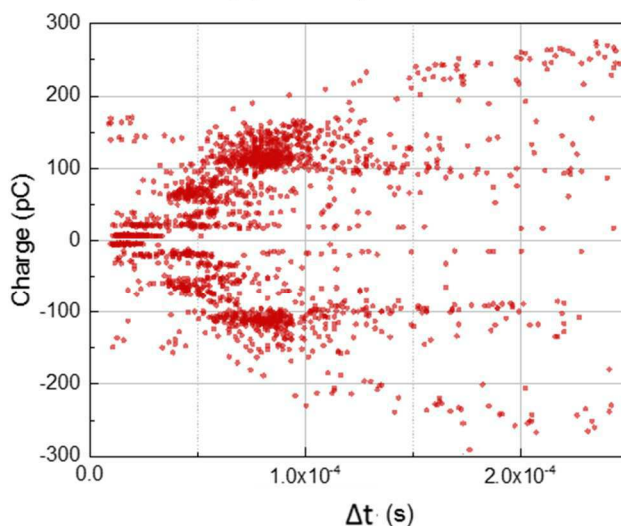
Les données nécessaires à l'élaboration des graphes $q(\Delta t)$ sont obtenues par des mesures avec la méthode conventionnelle. La Figure 99 montre de tels diagrammes pour tous les types de défauts étudiés dans l'azote. On constate que le relevé obtenu pour une pointe négative (Figure 99-a) comporte deux nuages de points assez dispersés et éloignés du point de coordonnées $(0, 0)$. Au contraire, les deux nuages obtenus pour une particule en polarité négative (Figure 99-d) sont très proches de l'origine. Le relevé obtenu en présence d'une pointe négative (Figure 99-b) est très différent : on y détecte deux fortes concentrations de points aux coordonnées $(8 \cdot 10^{-5} \text{ s}, \pm 170 \text{ pC})$ éventuellement accompagnées de distributions proches de l'axe des abscisses. Enfin, le diagramme obtenu pour une particule en polarité positive présente une répartition beaucoup plus complexe, où les points sont répartis dans de multiples nuages.



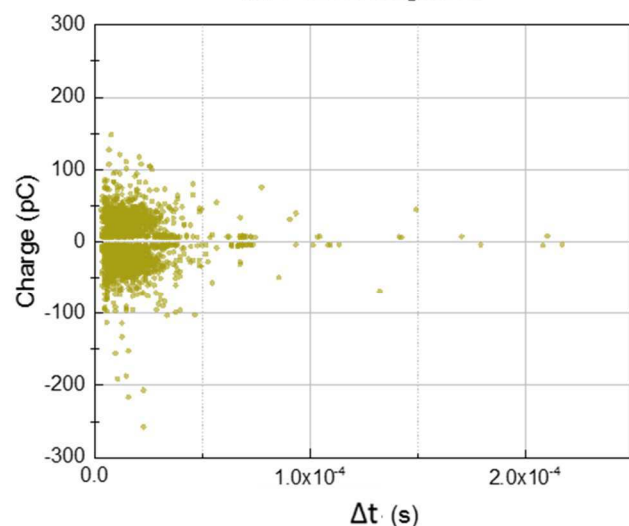
(a) Pointe positive



(b) Pointe négative



(c) Particule positive



(d) Particule négative

Figure 99 : Diagrammes $q(\Delta t)$ pour différents défauts dans l'azote (N_2). (a) en présence d'une pointe positive à 70 kV sous 0,2 MPa ; (b) en présence d'une pointe négative à -70 kV sous 0,2 MPa ; (c) en présence d'une particule filamentaire à 110 kV sous 0,5 MPa ; (d) en présence d'une particule filamentaire à -150 kV sous 0,5 MPa.

Dans le SF_6 , les diagrammes $q(\Delta t)$ obtenus sont encore différents (Figure 100). En présence d'une particule positive (Figure 100-a), l'intervalle de temps est principalement compris entre $7 \cdot 10^{-5}$ s et $1,6 \cdot 10^{-4}$ s, et les charges apparentes sont faibles. Le nuage obtenu pour une pointe négative (Figure 100-b) est caractérisé par une composante horizontale où l'amplitude des décharges est faible et une composante oblique où la charge apparente se rapproche de 20 pC. Là encore, quand les défauts sont différents, les diagrammes $q(\Delta t)$ sont différents.

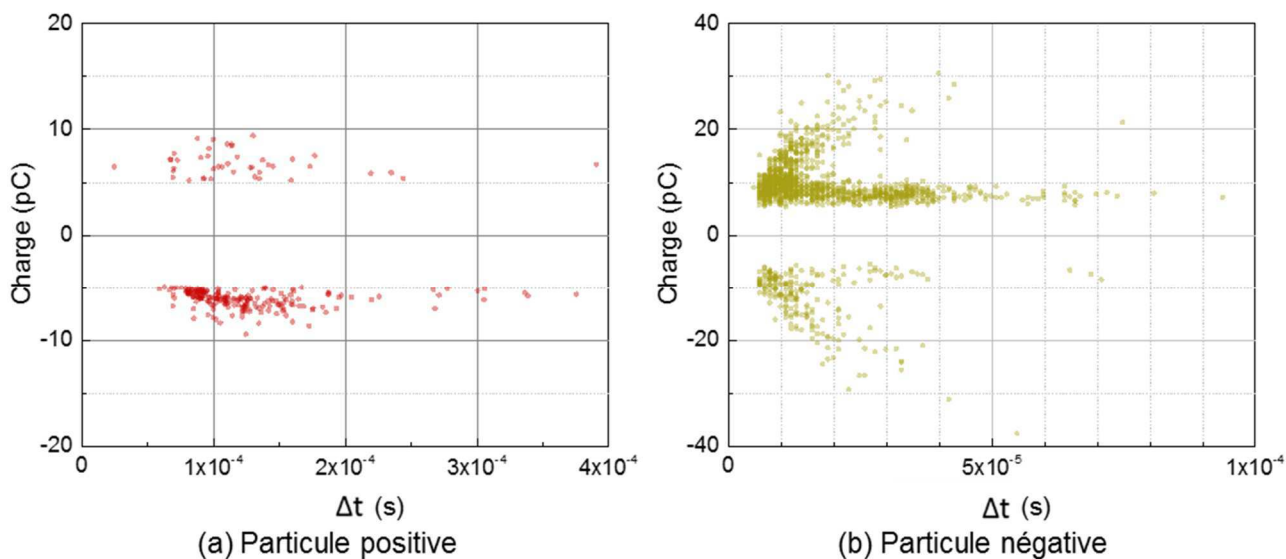


Figure 100 : Diagrammes $q(\Delta t)$ en présence d'une particule filamenteuse dans 0,1 MPa de SF_6 .
(a) En polarité positive à 110 kV ; (b) En polarité négative à -150 kV.

En résumé, on constate que les diagrammes $q(\Delta t)$ obtenus pour différents défauts présentent des allures différentes [119], [120]. Cet indicateur est donc choisi pour signature dans la suite de ce travail.

5.1.2. Normalisation de la signature

Dans ce paragraphe, on recherche comment améliorer la signature choisie pour qu'elle ait toujours la même allure quand elle est calculée pour le même type de défaut. La signature sera ainsi vraiment caractéristique de chaque type de défaut.

Au cours des mesures de décharges partielles réalisées avec la méthode conventionnelle (Chapitre 3), il est apparu que la formation des décharges partielles était influencée par les conditions d'expérimentation telles que la géométrie, la pression du gaz ou le niveau de tension. Pour un défaut de type pointe, par exemple, une variation de pression entraîne une variation de l'intervalle de temps qui sépare les décharges successives (§3.2.1.2 et 3.2.2.2). Cela implique une modification du diagramme $q(\Delta t)$ correspondant, car cet intervalle est constitutif du diagramme $q(\Delta t)$ choisi pour identifier les défauts. Un exemple supplémentaire est donné en Figure 101, où sont superposés les diagrammes $q(\Delta t)$ obtenus pour deux pointes de diamètre différent, toutes les autres conditions expérimentales étant égales. On observe que le diagramme obtenu pour une pointe de diamètre 250 μm est composé de points disposés aux coordonnées (8 μs , ± 20 pC) et (12 μs , ± 60 pC). En revanche, les points qui composent le diagramme obtenus pour la pointe de 500 μm de diamètre ont pour coordonnées (19 μs , ± 15 pC) et (42 μs , ± 120 pC). En cet état, les deux diagrammes sont complètement différents.

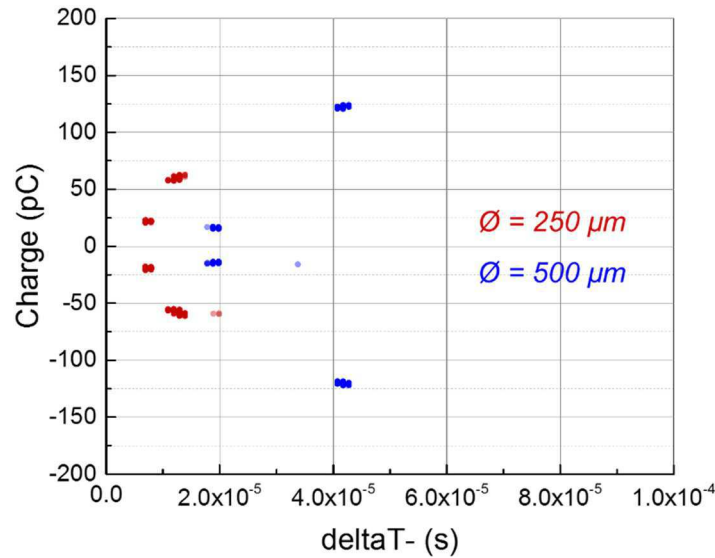


Figure 101 : Diagrammes $q(\Delta t)$ obtenus pour deux pointes de longueur 5 mm et de diamètres différents dans 0,15 MPa d'azote (N_2) en polarité négative à -60 kV.

On remarque toutefois que leur forme générale est la même, et que seules les valeurs absolues des coordonnées diffèrent. C'est ce constat qui va permettre de rendre la signature caractéristique du type de défaut. Si la signature est la forme du diagramme $q(\Delta t)$, et non le diagramme brut, la signature sera toujours la même pour un type de défaut donné.

On choisit donc de normaliser les valeurs, c'est-à-dire de les comparer à la plus grande d'entre elles. De cette manière, les valeurs absolues ne sont pas prises en compte, mais bien la manière dont les points sont disposés les uns par rapport aux autres, c'est-à-dire la forme de la distribution.

Concrètement, pour un enregistrement contenant n décharges de charges apparentes $\{q_i\}_{1 \leq i \leq n}$ et dont les intervalles de temps avec les décharges précédentes sont notés $\{\Delta t_i\}_{1 \leq i \leq n}$, on définit la charge maximale :

$$q_{max} = \max_{1 \leq i \leq n} (|q_i|) \quad (38)$$

et l'intervalle de temps maximal :

$$\Delta t_{max} = \max_{1 \leq i \leq n} (\Delta t_i) \quad (39)$$

Dans le diagramme $q(\Delta t)$, on remplace chaque couple $(\Delta t_i, q_i)$ par le couple normalisé $(\frac{\Delta t_i}{\Delta t_{max}}, \frac{q_i}{q_{max}})$ à valeurs dans $[0; 1] \times [-1; 1]$:

$$\{(\Delta t_i, q_i)\}_{1 \leq i \leq n} \rightarrow \left\{ \left(\frac{\Delta t_i}{\Delta t_{max}}, \frac{q_i}{q_{max}} \right) \right\}_{1 \leq i \leq n} \quad (40)$$

La Figure 102 montre l'effet d'une telle normalisation sur le diagramme $q(\Delta t)$ obtenu pour une pointe dans 0,2 MPa d'azote pendant un palier à -70 kV. Sur le diagramme d'origine

(Figure 102-a), la charge apparente prend des valeurs entre -180 pC et 180 pC et Δt reste compris entre 4 μ s et 250 μ s. Sur le diagramme normalisé, la charge apparente est maintenant comprise entre -1 et 1, et Δt entre 0,019 et 1.

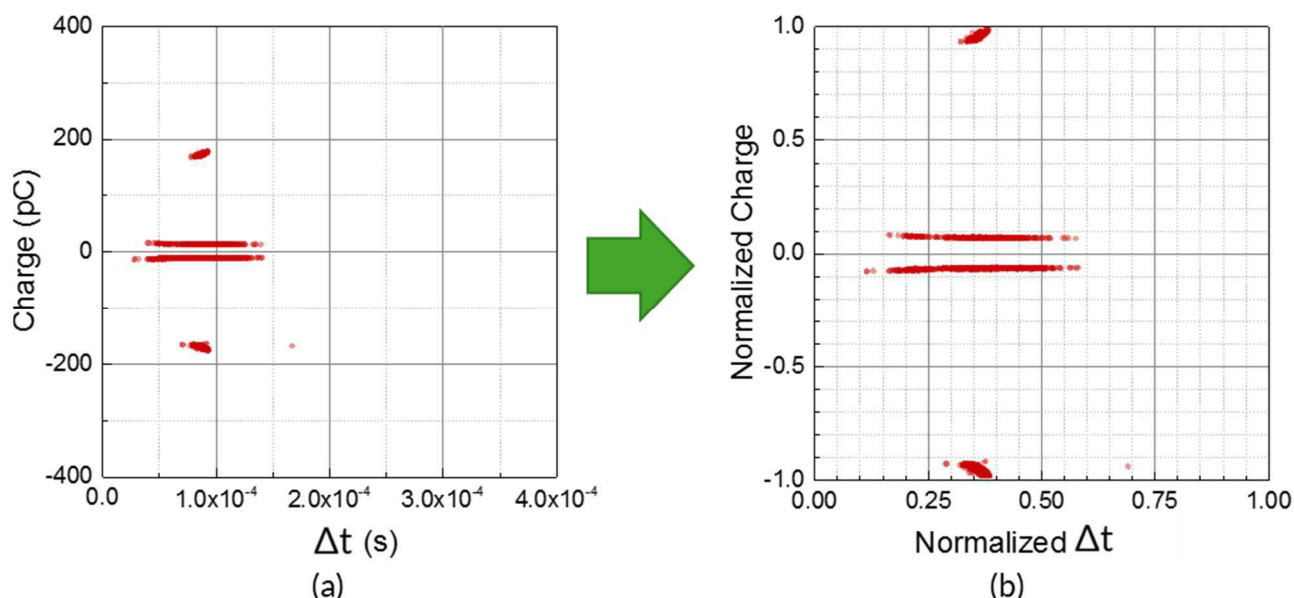


Figure 102 : Normalisation du diagramme $q(\Delta t)$ obtenu pour une pointe ($l = 4$ mm, $\varnothing = 250$ μ m) fixée sur le conducteur haute-tension dans 0,2 MPa d'azote en polarité négative pendant un palier à -70 kV. (a) Diagramme d'origine. (b) Diagramme normalisé.

Le procédé de normalisation permet d'utiliser la même signature dans toutes les conditions expérimentales. La forme du diagramme $q(\Delta t)$ est en effet conservée, alors que les différences provoquées par la diversité des paramètres expérimentaux sont gommées.

Un des inconvénients de la normalisation des données est sa forte dépendance vis-à-vis de deux valeurs particulières : q_{max} (équation (38)) et Δt_{max} (équation (39)). En conséquence, un unique point de mesure (q , Δt) erroné qui attribuerait une grande valeur absolue à q ou à Δt peut déformer le diagramme $q(\Delta t)$ normalisé tout entier. Cela entraîne une faible robustesse de la normalisation à la présence d'un point de mesure aberrant. Une réponse à ce problème est proposée au §5.3.3.

Une autre manière classique de normaliser les données en vue de la classification consisterait à centrer et réduire les données. On obtient les données centrées en faisant la différence entre les données et leur moyenne. La réduction consiste à diviser les données centrées par leur écart type. La mise en place de ces opérations est une piste d'amélioration de ce travail.

5.1.3. Echantillonnage de la signature

Dans le paragraphe précédent, une normalisation a été mise en place pour rendre la signature caractéristique du type de défaut. Cette normalisation permet également de limiter l'influence des autres conditions expérimentales.

DOCUMENT CONFIDENTIEL

cherche à obtenir des pourcentages avec une résolution de 0,1 %. Etant donné que les nombres qui forment les diagrammes échantillonnés sont des pourcentages du nombre total de points, chaque échantillon doit donc être constitué à partir de 1000 points, chaque point représentant les données d'une décharge partielle.

Les études menées aux paragraphes 3.2.1.3 et 3.2.2.3 sur l'influence de la durée d'application de la tension suggèrent que la représentativité des échantillons ne nécessite pas forcément qu'ils soient constitués sur une longue durée de mesure. Toute séquence de points, aussi courte soit-elle, est donc représentative du comportement des DP dans les conditions de leur obtention.

5.2. Constitution d'une base de données

Pour pouvoir entraîner un algorithme à la reconnaissance de défauts, il faut disposer d'une base de données. Cette base de données doit contenir des nombreux échantillons pour chaque type de défaut. Les échantillons sont aussi appelés « exemples ».

Pour que les résultats de l'algorithme de reconnaissance soient généralisables, on s'attache à inclure dans la base de données des échantillons provenant d'expériences réalisées dans des conditions les plus variées possible. En effet, si la base de données ne contient que des exemples produits dans les mêmes conditions, l'algorithme pourrait rencontrer des difficultés à interpréter des données légèrement différentes, ce qui nuirait à ses performances.

Voici comment est constituée la base de données :

- ➔ Des enregistrements de DP avec la méthode conventionnelle sont réalisés en présence d'un défaut connu. Pour chaque type de défaut, on réalise des mesures dans toutes les combinaisons possibles de conditions expérimentales, en suivant le protocole défini au §2.6. Ces conditions expérimentales sont les suivantes :
 - > Polarité : positive ou négative.
 - > Tension : entre 0 et 200 kV
 - > Nature du gaz : SF₆ ou N₂
 - > Pression du gaz : entre 0,1 et 0,5 MPa
 - > Nature du défaut : pointe ou particule libre métallique
- ➔ Parmi les données recueillies, on sélectionne au moins un enregistrement par configuration expérimentale, et on extrait les données nécessaires à l'analyse temporelle : la charge apparente et l'instant d'occurrence de chaque décharge partielle. Ces informations sont regroupées dans des fichiers texte.
- ➔ Les fichiers de données ainsi extraits sont classés par type de défaut. C'est cette étape qui permettra à l'algorithme de reconnaissance de faire le lien entre un échantillon qui lui est présenté et la classe associée. C'est un principe essentiel de l'apprentissage supervisé.

- Les fichiers de données sont lus. A chaque fois qu'on parcourt 1000 lignes, on génère un diagramme $q(\Delta t)$ normalisé et échantillonné (voir §5.1). Ce diagramme est ajouté à la base de données, en conservant l'information sur le type de défaut associé.

La base de données ainsi constituée contient 227 575 échantillons répartis de la manière suivante (Figure 104) :

- 123 616 échantillons pour une pointe négative, soit 54 % du total.
→ 27 073 échantillons pour une pointe positive, soit 12 % du total.
→ 68 890 échantillons pour une particule négative, soit 30 % du total.
→ 7 996 échantillons pour une particule positive, soit 4 % du total.

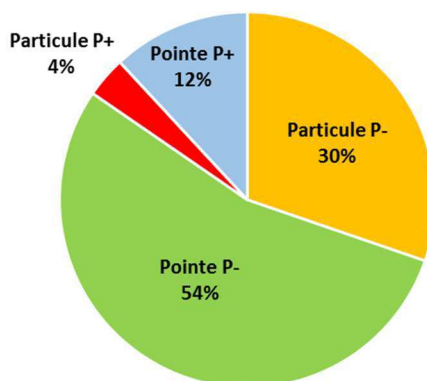


Figure 104 : Composition de la base de données. Le nombre total d'échantillons est 227 575.

Cette répartition s'explique par le comportement des décharges partielles qui est différent selon le type de défaut. Comme indiqué au Chapitre 3, un défaut de type pointe produit des décharges partielles très soutenues en polarité négative. Les données pour ce type de défaut sont donc très abondantes. En polarité positive, les décharges sont intermittentes, ce qui a pour effet une plus petite quantité de données extraites. Pour les défauts de type particule, le mouvement de la particule peut mettre fin de manière prématurée à l'enregistrement, surtout en polarité positive. En conséquence, la base de données contient peu d'échantillons pour une particule en polarité positive. En polarité négative, même si la particule peut tomber, le mouvement de *firefly* est généralement suffisamment stable pour que les expériences durent plusieurs minutes, ce qui permet d'obtenir plus de données de DP.

Le fait que la composition de la base de données soit déséquilibrée demande une vigilance particulière lors de l'apprentissage de l'algorithme de classification. Les classes les moins représentées dans la base de données sont en effet susceptibles d'être moins bien reconnues. Un algorithme qui ne serait pas du tout capable de reconnaître le défaut minoritaire pourrait même donner l'impression d'avoir des bonnes performances. Pour la base de données ici présentée, un taux de reconnaissance de 96 % peut être atteint en se trompant systématiquement pour les 4 % d'échantillons de type particule positive. Dans ces travaux,

ce danger sera contrôlé grâce à une matrice de confusion en vérifiant que les performances de la reconnaissance sont homogènes sur les différents types de défaut.

5.3. Implémentation et optimisation d'un algorithme de reconnaissance automatique de défauts

5.3.1. Structure générale de l'algorithme

Pour réaliser la reconnaissance automatique, on doit choisir un algorithme d'apprentissage supervisé. Quatre types de défauts sont étudiés, donc l'algorithme doit être adapté à l'apprentissage multi-classe. Il doit également être suffisamment polyvalent pour pouvoir accepter en entrée les données préparées au paragraphe 5.2. Les algorithmes de réseau de neurones (§1.3.2.1) possèdent ces deux qualités. Dans la famille des réseaux de neurones, on utilise le plus simple d'entre eux : le perceptron multicouche (*Multi Layer Perceptron*). Ce perceptron est implémenté en Python grâce à la classe *MLPClassifier* de *scikit-learn* [121]. Des détails techniques sur l'implémentation de cet algorithme sont donnés en Annexe A.1.

La base de données étant de grande taille, l'apprentissage est réalisé par un algorithme de descente de gradient stochastique, où les exemples de la base sont présentés un par un et non tous ensemble au moment de l'apprentissage par rétro-propagation. La fonction d'activation des nœuds du réseau est la fonction unitaire rectifiée, qui possède le double avantage d'être non-linéaire et simple. On peut l'écrire analytiquement :

$$f(x) = \max(0, x) \quad (41)$$

Le nombre de couches cachées est fixé à deux, ce qui permet à l'algorithme d'apprendre efficacement des solutions non-linéaires au problème posé. Il reste à décider combien de neurones vont constituer ces deux couches. C'est l'objet du paragraphe suivant.

5.3.2. Généralisation et performance de l'algorithme de reconnaissance

De manière générale, dans un algorithme d'apprentissage automatique, plus le modèle que l'on entraîne à la reconnaissance est complexe mieux il est capable d'apprendre la base de données qui lui est fournie. En revanche, si le modèle est trop complexe, l'algorithme risque d'apprendre par cœur tous les exemples de la base de données. Cela donne l'illusion d'une excellente performance au moment de l'apprentissage, mais la capacité de généralisation sera mauvaise. Autrement dit, un algorithme trop complexe prédira avec une grande exactitude les classes des exemples de la base d'apprentissage, mais fera beaucoup d'erreurs pour des exemples qui n'en font pas partie. La complexité de l'algorithme, déterminée ici par le nombre de neurones dans les couches cachées, est donc un compromis entre performance et généralisation.

La suite de ce paragraphe porte sur la généralisation et sur la performance de la reconnaissance en fonction de la complexité de l'algorithme. Cette réflexion débouchera sur le choix d'un dimensionnement des couches cachées du réseau de neurones.

Les études théoriques et empiriques de la communauté du *Machine Learning* montrent que la taille de la base de données d'apprentissage doit être supérieure au nombre de paramètres de l'algorithme que l'on entraîne. Dans le cas d'un réseau de neurones, le nombre de paramètres est le nombre de connexions entre les nœuds.

Pour le réseau de neurones utilisé dans ce travail, la couche d'entrée comporte 400 nœuds, car c'est la dimension des descripteurs (§5.1.3). Si on note n_1 le nombre de neurones dans la première couche cachée, on a $n_1 \times 400$ connexions avec la couche d'entrée. On note maintenant n_2 le nombre de neurones dans la seconde couche cachée. Le nombre de connexions avec la première couche est $n_1 \times n_2$. Enfin, il y a 4 types de défaut, donc 4 nœuds dans la couche de sortie, soit $n_2 \times 4$ connexions avec la seconde couche cachée. Le nombre de connexions total est donc :

$$N_{\text{connexions}} = 400 \times n_1 + n_1 \times n_2 + n_2 \times 4 \quad (42)$$

Vapnik et Chervonenkis ont mené de nombreux travaux sur la théorie de l'apprentissage statistique [122]. Pour atteindre une bonne généralisation d'un algorithme de réseau de neurones, ils préconisent une base de données dont la taille serait 10 fois supérieure au nombre de connexions [123]. Ce nombre n'est toutefois qu'une condition suffisante, et de nombreux autres auteurs obtiennent de manière empirique de bons taux de généralisation avec une base de données plus restreinte, surtout quand les exemples fournis sont bien représentatifs des différentes classes.

La base de données utilisée dans ces travaux étant composée de 227 575 échantillons (§5.2), on veillera à ce que le nombre total de connexions ne dépasse pas le dixième de cette grandeur, soit :

$$N_{\text{connexions}} < 22\,757 \quad (43)$$

On s'assurera *in fine* que l'algorithme est bien capable de généraliser en calculant le taux de reconnaissance des défauts pour des exemples qui ne font pas partie de la base d'apprentissage.

La performance de l'algorithme est mesurée par le taux de reconnaissance des défauts de la base de données. Pour obtenir cette grandeur, on entraîne un algorithme avec la base de données et on regarde la proportion de prédictions correctes de l'algorithme pour les exemples de la base de données. Cette opération a été réalisée pour différentes configurations des couches cachées, où le nombre de neurones dans chacune d'elles a été choisi entre 4 et 400. On trouve en Figure 105 les résultats de ces calculs représentés en fonction de la complexité de l'algorithme. La mesure de cette complexité est le nombre de connexions dans le réseau de neurones entier, calculé selon l'équation (42). La zone hachurée

est celle où le nombre de connexions dépasse le seuil précédemment fixé à 22 757 pour garantir la généralisation.

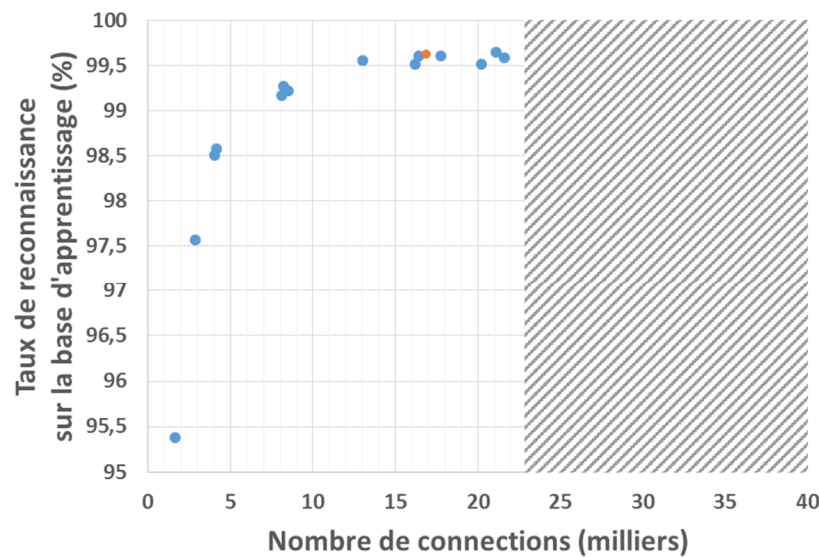


Figure 105 : Performance de l'apprentissage en fonction de la complexité de l'algorithme.

Conformément à ce qu'on espérait, l'augmentation de la complexité de l'algorithme entraîne bien une hausse de la performance de celui-ci. On constate toutefois une limite : à partir de 15 000 connexions environ, les performances cessent de s'améliorer quand la complexité augmente.

On choisit donc une solution comportant 15 000 à 22 757 connexions, dont la performance soit la plus élevée possible. La configuration retenue (point orange sur la Figure 105) comporte 40 neurones dans la première couche cachée et 20 neurones dans la seconde couche cachée :

$$\begin{cases} n_1 = 40 \\ n_2 = 20 \end{cases} \quad (44)$$

Le nombre de connexions pour cette configuration est calculé grâce à l'équation (42) :

$$\begin{aligned} N_{\text{connexions}} &= 400 \times n_1 + n_1 \times n_2 + n_2 \times 4 \\ &= 400 \times 40 + 40 \times 20 + 20 \times 4 \\ &= 16880 \end{aligned} \quad (45)$$

La performance de ce réseau sur la base de données est 99,62 %. La matrice de confusion associée est donnée en Figure 106. Les termes diagonaux sont les nombres d'exemples correctement identifiés pour chaque type de défaut. Les autres termes décrivent quelles erreurs ont été faites pour les quelques échantillons restants. On constate que pour chaque type de défaut, le nombre d'erreurs de classification est très faible par rapport au nombre total d'échantillons de ce type. Au contraire, le nombre de prédictions correctes est très proche du nombre d'échantillons total, et ce pour les quatre types de défaut. Cela est le signe que la performance de la reconnaissance est bonne pour l'ensemble des défauts étudiés.

		Predicted defect				TOTAL
		Particule P-	Protrusion P-	Particule P+	Protrusion P+	
Actual defect	Particule P-	68 578	286	3	23	68 890
	Protrusion P-	412	123 175	5	24	123 616
	Particule P+	5	20	7 965	6	7 996
	Protrusion P+	73	18	0	26 982	27 073

Figure 106 : Matrice de confusion du réseau de neurone choisi sur la base de données.

Pour valider ce choix de composition des couches cachées, il faut nous assurer que la capacité de généralisation est satisfaisante.

La capacité de généralisation du réseau de neurones est éprouvée de la manière suivante :

- La base de données est séparée en deux :
 - 70 % des données serviront à l'apprentissage de l'algorithme. On appelle cette partie « base d'apprentissage ».
 - Les 30 % restants sont regroupés pour former la « base de validation ».
- L'apprentissage du réseau de neurones est réalisé à partir de la base d'apprentissage.
- La performance de la reconnaissance est évaluée sur la base de validation, qui n'a pas servi à l'apprentissage.

Le taux de reconnaissance obtenu pour la base de validation est 98,67 %, ce qui est une très bonne performance.

Malgré tout, on peut objecter que la base d'apprentissage et la base de validation ne sont pas sans rapport l'une avec l'autre, puisqu'elles sont issues des mêmes fichiers de mesure de décharges partielles. Cela pourrait introduire un biais inductif. De plus, les paragraphes 3.2.1.4 et 3.2.2.4 ont permis de montrer que les mesures de DP avec la méthode conventionnelle n'étaient pas toujours reproductibles. Il n'est donc pas certain que les performances restent aussi bonnes avec des signatures extraites de fichiers de mesure n'ayant pas servi à la constitution de la base de données.

Effectivement, des essais de reconnaissance réalisés avec des nouvelles mesures ont fréquemment fait des erreurs. Il est donc nécessaire d'améliorer encore la performance de la reconnaissance pour des mesures de DP extérieures à la base de données. C'est l'objet du paragraphe suivant.

5.3.3. Amélioration de la robustesse de la classification par la redondance

Afin d'améliorer la performance de la reconnaissance de défaut, une étape supplémentaire est ajoutée à l'analyse des fichiers de mesure de décharges partielles. Cette démarche n'est pas sans rapport avec la technique du *boosting*, évoquée au §1.3.2.5, qui consiste à utiliser

un classificateur aux faibles performances de manière redondante pour obtenir une prédiction fiable.

Il a été constaté au paragraphe 5.1.1 que les décharges partielles enregistrées sont généralement espacées d'au plus 0,1 ms. Même si on borne cette valeur par 1 ms, ce qui est excessif, il suffit d'une seconde de mesure pour réunir les 1 000 points nécessaires au calcul d'une signature (§5.1.3). Or, les enregistrements de décharges partielles peuvent facilement durer plus d'une seconde. Cela signifie que l'on peut généralement extraire plusieurs signatures à partir d'un même enregistrement. C'est ce que l'on choisit de faire.

Chacune des signatures ainsi extraites est présentée individuellement à l'algorithme de classification, qui réalise une prédiction pour chacun d'entre eux. On collecte ensuite les résultats de toutes ces prédictions. Si un type de défaut regroupe plus de 66 % des prédictions, il est désigné comme étant à l'origine des décharges partielles mesurées. Le seuil de décision de 66 % a été choisi pour s'assurer que le type de défaut retenu est prédit deux fois plus souvent que tous les autres types réunis. Si aucun type de défaut ne recueille 66 % des suffrages, on conclut que l'algorithme a été mis en échec, un résultat qui est tout de même plus pertinent qu'une prédiction erronée.

On parle de redondance car plusieurs prédictions sont réalisées pour une unique mesure de décharges partielles, et pour un diagnostic final unique lui aussi.

Afin d'illustrer cette démarche, un exemple est maintenant présenté à partir d'un cas réel. Ce même exemple est également employé en Annexe A.2 pour présenter une interface développée durant ces travaux pour l'identification des défauts à partir d'un fichier de mesure.

On considère un fichier de mesure de DP qui ne fait pas partie de la base de données. Ce fichier contient 18 409 801 points représentant chacun une décharge partielle. A partir de ce fichier sont générés 18 409 échantillons qui sont chacun calculés à partir de 1 000 points consécutifs. Chacun de ces échantillons est présenté à l'algorithme de reconnaissance. 86,2 % des 18 409 échantillons ont donné lieu à une prédiction de type « pointe négative », contre 5,8 % pour une particule négative, 5,6 % pour une particule positive et 2,4 % pour une pointe positive. On en déduit que le défaut qui a donné lieu à l'enregistrement de décharges partielles est de type pointe négative.

L'identification du défaut a bel et bien été améliorée, puisque la nature du défaut a pu être déterminée avec un fort degré de confiance alors que l'algorithme donnait une prédiction erronée dans plus de 13 % des cas.

La part des signatures ayant donné lieu à la prédiction majoritaire est un indicateur de la confiance que l'on peut avoir dans la prédiction finale. En effet, si l'algorithme prédit un même type de défaut pour 99 % des échantillons et que le 1 % restant est réparti entre les autres types de défaut, on peut être très confiant dans la prédiction. En revanche, si la répartition des prédictions est par exemple 70-20-10-0 % pour les quatre types de défaut, on peut

conclure que le défaut qui a été prédit dans 70 % des cas est vraiment le défaut présent, mais le degré de confiance est moindre. Quand ce degré de confiance est trop bas, par exemple pour une répartition de 55-40-3-2 %, on ne peut pas conclure.

L'introduction d'une redondance permet de passer outre un problème classique rencontré lorsqu'on normalise des données (§5.1.2) : la faible robustesse à la présence d'un point de mesure aberrant. Avec la méthode proposée dans ce paragraphe, un tel point peut perturber un échantillon, mais pas les autres échantillons extraits du même fichier de mesure. L'introduction d'une redondance améliore donc significativement la robustesse de la classification par rapport à la normalisation.

5.4. Conclusion

Ce chapitre avait pour objectif de définir une méthode d'identification des défauts à partir de la mesure des décharges partielles, et de rendre automatique ce processus.

Une signature a été définie à partir de la mesure des décharges partielles selon la norme IEC 60270 ; il s'agit du diagramme $q(\Delta t)$ normalisé et échantillonné. Cette signature est différente d'un type de défaut à l'autre, ce qui en fait un indicateur pertinent pour la classification des défauts.

Un algorithme de réseau de neurones artificiel a été mis en place pour rendre automatique la classification. L'optimisation des paramètres de l'algorithme a permis d'atteindre un taux de reconnaissance de 98,67 % sur une base de validation différente de la base de données d'apprentissage.

Cet excellent résultat est à relativiser car il est obtenu sur une base de validation qui présente de fortes ressemblances avec la base d'apprentissage. Toutefois, l'introduction d'une redondance dans le traitement des données expérimentales soumises à l'outil de reconnaissance automatique a permis d'améliorer la robustesse de la classification pour des fichiers de DP ne faisant pas partie de la base de données.

Le problème de la capacité de l'algorithme de reconnaissance à réaliser des prédictions correctes pour des mesures réalisées dans des conditions très différentes a été soulevé. Un nombre plus conséquent d'expériences dans des configurations plus variées, notamment géométriques, permettrait d'étoffer la base de données. La base serait ainsi plus représentative des possibles mesures, ce qui serait un pas significatif vers la résolution du problème de généralisation.

Le diagramme $q(\Delta t)$ a ici été obtenu grâce à la mesure conventionnelle des décharges partielles. Rien n'interdit d'utiliser une autre méthode de détection des décharges partielles pour construire cet indicateur, à condition qu'elle soit capable de déterminer les instants de

mesure des DP et leur amplitude relative. Cette amplitude ne doit pas nécessairement être calibrée. Il suffit que les proportions entre elles soient respectées, puisque les données sont de toute façon normalisées dans la suite du procédé. Cette possibilité est étudiée au §4.3 pour la mesure des ondes UHF.

Les données utilisées pour la classification mettent en valeur les corrélations existant entre des décharges consécutives. Dans de futurs travaux, il serait intéressant d'utiliser des algorithmes intrinsèquement conçus pour l'étude des séquences d'évènements. Les algorithmes à base de chaînes de Markov, voire de chaînes de Markov à temps continu entrent dans cette catégorie. Leur utilisation pourrait donner de bons résultats, même s'il a été montré que le comportement stochastique des décharges partielles était non-markovien [124].

Conclusion générale et perspectives

Cette thèse s'inscrit dans le contexte de la surveillance des postes sous enveloppe métallique en courant continu. La disponibilité de ces équipements étant primordiale pour leurs utilisateurs, il faut disposer d'un outil de monitoring permettant de prévenir toute défaillance. Cet outil doit être capable de détecter et d'identifier les défauts présents, afin d'apporter une réponse adaptée.

Depuis de nombreuses années, le monitoring des PSEM en AC est réalisé grâce à la mesure des décharges partielles. Malheureusement, les connaissances des DP dans les PSEM en DC sont encore lacunaires, et les techniques d'identification des défauts sont intrinsèquement liées à l'environnement AC. De nouvelles techniques sont donc nécessaires en DC.

Ce travail de thèse avait pour but de caractériser les décharges partielles dans les postes sous enveloppe métallique en tension continue, et de mettre en place une solution de reconnaissance automatique des défauts.

Pour cela, un banc de mesure des décharges partielles a d'abord été mis en place. Afin de garantir la pertinence des résultats pour des systèmes industriels, les travaux ont été réalisés dans une section de PSEM sous tension continue. Le comportement des DP a été étudié pour deux types de défauts : les pointes sur le conducteur haute-tension et les particules métalliques libres. La caractérisation a porté sur l'influence de plusieurs paramètres : la nature et la pression du gaz, le niveau et la polarité de la tension.

La mesure des DP a d'abord été réalisée en conformité avec la norme IEC 60270, permettant ainsi d'évaluer la pertinence de cette méthode pour les applications DC. La caractérisation a été complétée grâce à d'autres chaînes de mesure : une mesure de courant stationnaire, une mesure de courant haute-fréquence, une mesure de lumière, et une mesure des ondes ultra-haute fréquence (UHF).

Le travail sur l'identification des défauts a d'abord consisté à construire une signature pertinente à partir des mesures de DP, puis à constituer une base de données, et enfin à implémenter un algorithme de reconnaissance automatique.

La première phase de la caractérisation a montré que la mesure conventionnelle des décharges partielles présentait des limites pour la détection des décharges couronne. Dans le SF₆, cette méthode s'est révélée aveugle dans les conditions expérimentales explorées. On

s'est ensuite placé dans l'azote, où il est plus facile de détecter les décharges. En polarité positive, les DP sont mesurées, mais de manière intermittente. En polarité négative en dessous de 0,3 MPa, la mesure n'est possible que sur une certaine plage de pression au-delà de laquelle la détection cesse.

Quand les DP ont pu être mesurées, l'effet de la pression et du niveau de tension a été décrit dans les deux polarités.

En présence d'une particule métallique libre, les résultats suggèrent que la formation des DP est principalement déterminée par le mouvement de la particule dans le poste. Les autres paramètres semblent jouer un rôle secondaire.

Afin d'expliquer les lacunes de la méthode conventionnelle de mesure des DP et d'obtenir plus d'informations sur les DP en DC, d'autres expériences ont été réalisées.

Tout d'abord, la mesure de lumière a permis de prouver qu'une activité de DP avait bien lieu en présence d'une pointe dans l'azote même quand on cessait de la détecter avec la mesure conventionnelle. Elle a ensuite montré que dans le SF₆, les défauts de type pointe provoquent aussi des DP dans les deux polarités à partir d'un certain niveau de tension qui croît avec la pression. Ces résultats ont ensuite été confirmés par les autres types de mesures.

L'étude des mesures de courant stationnaire a montré que les défauts de type pointe génèrent un courant stationnaire qui croît de manière quadratique avec la tension à partir de l'apparition des DP. Le travail sur les équations des caractéristiques courant-tension a permis de montrer que la mobilité des porteurs de charge suit une loi exponentielle par rapport à la pression du gaz.

Si la mesure du courant stationnaire n'a donné aucun résultat pour les défauts de type particule, elle pourrait être un moyen efficace de détection des DP générées par un défaut de type pointe. L'augmentation du courant atteint en effet 3 à 4 décades dès l'apparition des décharges partielles, dans l'azote comme dans le SF₆ et dans les deux polarités. Toutefois l'implémentation d'une telle mesure sur un PSEM en conditions réelles d'utilisation nécessiterait un effort de conception supplémentaire.

Après les mesures stationnaires, la mesure haute-fréquence du courant au niveau du défaut a permis de décrire la disparition des impulsions de courant générées par les pointes négatives dans l'azote et l'avènement d'un régime continu de décharge.

La mesure UHF a permis de détecter aussi bien les défauts de type pointe que les particules libres métalliques dans toutes les configurations expérimentales, à l'exception des pointes en polarité négative dans le SF₆. En fait, toutes les mesures réalisées dans le SF₆ (lumière, courant, UHF) suggèrent que l'activité de DP est beaucoup plus faible en polarité négative qu'en polarité positive. L'explication de ce constat est encore à trouver.

Le travail de détection des ondes UHF ouvre la voie à une caractérisation des DP grâce à cette méthode. Elle pourrait même permettre d'obtenir des mesures utiles à la classification des défauts, y compris dans des configurations où on n'arrive pas à en obtenir avec la mesure conventionnelle des DP.

Pour finir, un outil de reconnaissance automatique des défauts a été développé, avec un taux de reconnaissance supérieur à 98,5 %.

Pour cela, une signature représentative des différents types de défauts a été élaborée à partir du diagramme $q(\Delta t)$. Ce dernier a été extrait des données obtenues grâce à la mesure conventionnelle des décharges partielles. La normalisation systématique de cette signature a permis de gommer certaines différences introduites par les conditions expérimentales entre des signatures de défauts de même nature.

Une base de données contenant 227 575 échantillons a ensuite été créée. Cette base de données a été utilisée pour entraîner un algorithme de reconnaissance automatique des défauts par réseau de neurones. La structure du réseau a été optimisée pour obtenir un taux de reconnaissance supérieur à 98,5 %. Ce taux de reconnaissance a toutefois été validé grâce à une base de validation qui ressemble à la base d'apprentissage. En conséquence, l'algorithme a fait plus d'erreurs de classification quand les données étaient tout à fait nouvelles. Pour répondre à ce problème, la procédure de traitement des nouveaux fichiers de mesure a été améliorée : une redondance a été introduite, ce qui permet d'éliminer les prédictions minoritaires et d'augmenter significativement la robustesse de la prédiction finale.

Pour résumer, la méthode conventionnelle de mesure des DP présente certaines limites pour la détection des décharges partielles en DC, notamment pour les décharges couronne. Elle a tout de même permis de faire une bonne partie du travail de caractérisation.

Les résultats obtenus avec les autres chaînes de mesure utilisées dans ces travaux ont permis d'expliquer les lacunes de la méthode conventionnelle. Ils ont également permis un véritable apport pour la caractérisation des DP engendrées par des défauts de type pointe et particule. Enfin, une classification automatique des défauts performante a été mise en place. Elle s'appuie sur le diagramme $q(\Delta t)$ issu des données de la mesure conventionnelle des décharges partielles et sur un algorithme de réseau de neurones.

La plus grande limite constatée en DC pour la méthode conventionnelle des DP est sans aucun doute la difficulté à mesurer les décharges produites par les pointes dans le SF₆. Les résultats obtenus dans ces conditions suggèrent que la détection pourrait être améliorée en recherchant des niveaux de tension supérieurs à la limite imposée par le matériel utilisé dans ces travaux (200 kV).

L'utilisation de différentes chaînes de mesure n'a pas permis d'identifier une méthode unique capable de détecter les DP dans toutes les configurations expérimentales. Malgré tout, la mesure des ondes UHF est proche de cet objectif, et les dernières lacunes semblent liées à un problème de résolution. Une étude plus poussée de la chaîne de mesure UHF serait donc souhaitable. La mesure UHF possède en outre un potentiel important pour l'identification des défauts. Ce potentiel ne demande qu'à être confirmé et exploité.

L'efficacité de l'identification automatique des défauts a pu être établie pour un équipement précis, mais la question de la généralisation à d'autres PSEM se pose toujours. Pour faire face

à ce problème, la base de données doit être complétée par des mesures de DP obtenues dans des conditions expérimentales plus variées. On pourrait notamment utiliser d'autres tailles de PSEM, faire varier la température ou la pureté du gaz, ou encore introduire d'autres géométries de pointes et de particules. Cela permettrait d'améliorer la performance de la reconnaissance pour des équipements inconnus.

Pendant ces travaux, on s'est concentré sur les défauts de type pointe et particule. La méthodologie développée permettrait de caractériser et d'identifier d'autres types de défauts que l'on rencontre dans les PSEM, comme les éléments flottants ou les défauts en surface des isolants.

Même si la reconnaissance par réseau de neurones est performante, il serait intéressant d'explorer aussi la piste de la reconnaissance par chaînes de Markov. La structure de ces algorithmes respecterait le caractère séquentiel des données de DP, si bien que l'analyse des paramètres du modèle pourrait être une source d'informations supplémentaires.

Références

Bibliographie

- [1] IEC60270, "High Voltage test techniques - Partial discharges measurements 3.1." 2015.
- [2] G. W. Trichel, "The Mechanism of the Positive Point-to-Plane Corona in Air at Atmospheric Pressure," *Phys. Rev.*, vol. 55, no. 4, pp. 382–390, 1939.
- [3] G. W. Trichel, "The Mechanism of the Negative Point to Plane Corona Near Onset," *Phys. Rev.*, vol. 54, pp. 1078–1086, 1938.
- [4] R. J. VanBrunt, "Physics and chemistry of partial discharge and corona. Recent advances and future challenges," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, no. 5, pp. 761–784, 2002.
- [5] U. Fromm, "Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage," TU Delft, Delft University of Technology, 1995.
- [6] K. Asano, R. Hishinuma, and Y. Yatsuzuka, "Bipolar DC corona discharge from a floating filamentary metal particle," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 38, no. 1, pp. 57–63, 2002.
- [7] P. Segur, "Gaz isolants," *Tech. l'ingénieur*, 1990.
- [8] IEC 60270, "High Voltage test techniques - Partial discharges measurements - 3rd edition." 2000.
- [9] M. J. Druyvesteyn and F. M. Penning, "The Mechanism of Electric Discharges in Gases of Low Pressure," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 12, no. 2, pp. 87–174, 1940.
- [10] J. Townsend, *Electricity in gases*. Clarendon Press, Oxford, 1915.
- [11] T. W. Dakin, "Breakdown of gases in uniform fields, Paschen curves for nitrogen, air and sulphur-hexafluoride," *Electra*, vol. 32, pp. 64–70, 1974.
- [12] J. M. Meek and J. D. Craggs, *Electrical Breakdown Of Gases*. Oxford, The Clarendon Press, 1953.
- [13] L. B. Meek J.M. et Loeb, *The Mechanism of the Electric Spark*. 1940.
- [14] F. H. Kreuger, *Industrial High Voltage*. 1995.
- [15] P. H. F. Morshuis, "Partial discharge mechanisms: mechanisms leading to breakdown, analyzed by fast electrical and optical measurements," TU Delft, Delft University of Technology, 1993.
- [16] M. Coulibaly, "Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide. Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale," ECL, 2009.
- [17] S. Sangkassad, "Corona Inception and Breakdown Voltages in nonuniform Fields in

- SF₆,” in *International High Voltage Symposium*, 1975.
- [18] S. Y. Blufpand, “Partial Discharge Recognition of Defects in Gas Insulated Systems under DC Voltage,” TU Delft, Delft University of Technology, 2014.
- [19] M. Florkowski, B. Florkowska, and P. Zydron, “Partial discharge forms for DC insulating systems at higher air pressure,” *IET Sci. Meas. Technol.*, vol. 10, no. 2, pp. 150–157, 2016.
- [20] Y. S. Akishev, M. E. Grushin, A. A. Deryugin, A. P. Napartovich, M. V Pan’kin, and N. I. Trushkin, “Self-oscillations of a positive corona in nitrogen,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 32, no. 18, p. 2399, 1999.
- [21] J. Dupuy and A. Gibert, “Comparison of point-to-plane discharges in air and SF₆,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 15, no. 4, pp. 655–664, 1982.
- [22] G. L. Weissler, “Positive and Negative Point-to-Plane Corona in Pure and Impure Hydrogen, Nitrogen, and Argon,” *Phys. Rev.*, vol. 63, no. 3–4, pp. 96–107, 1943.
- [23] M. Seeger, L. Niemeyer, and M. Bujotzek, “Partial discharges and breakdown at protrusions in uniform background fields in SF₆,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 41, no. 18, 2008.
- [24] C. M. Cooke, R. E. Wootton, and A. H. Cookson, “Influence of particles on AC and DC electrical performance of gas insulated systems at extra-high-voltage,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 96, no. 3, pp. 768–777, 1977.
- [25] Y. Kudo, T. Sugimoto, and Y. Higashiyama, “Corona and micro-gap discharge at a wire particle in precessional motion under a DC electric field,” *Electr. Eng. Japan*, vol. 157, no. 2, pp. 8–14, 2006.
- [26] S. Okabe, G. Ueta, and T. Utsumi, “Behavior of metallic particles in GIS under DC voltage,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 5, pp. 2889–2897, 2015.
- [27] A. Diessner and J. G. Trump, “Free Conducting Particles in a Coaxial Compressed-Gas-Insulated System,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-89, no. 8, pp. 1970–1978, 1970.
- [28] U. Fromm and E. Gulski, “Statistical behaviour of internal partial discharges at DC voltage,” in *Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994., Proceedings of the 4th International Conference on*, 1994, vol. 2, pp. 670–673.
- [29] R. A. Fouracre, E. Santos, I. Timoshkin, M. J. Given, and S. J. MacGregor, “Surface Discharge Propagation: The Influence Of Surface Charge,” in *Power Modulator Symposium, 2006. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International*, 2006, pp. 39–42.
- [30] IEC 60270, “High Voltage test techniques - Partial discharges measurements 3.1.” 2015.
- [31] E. Lemke, S. Berlijn, E. Gulski, M. Muhr, E. Pultrum, T. Strehl, W. Hauschild, J. Rickmann, and G. Rizzi, “Guide for partial Discharge measurements in compliance to IEC 60270,” *CIGRE Work. Gr. D1.33*, 2010.
- [32] E. Gulski, T. Strehl, M. Muhr, S. Tenbohlen, S. Meijer, M. D. Judd, R. Bodega, E. Lemke, R. A. Jongen, S. Coenen, B. Larzelere, M. Hanai, and P. Agoris, “Tech Brochure 444 - Guidelines for Unconventional Partial Discharge Measurements,” *CIGRE Work. Gr. D1.33*, 2010.
- [33] M. D. Judd and O. Farish, “High bandwidth measurement of partial discharge current pulses,” in *Electrical Insulation, 1998. Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on*, 1998, vol. 2, pp. 436–439.
- [34] S. M. Hoek, M. Koch, A. Kraetge, P. Winter, and M. Heindl, “Emission and

propagation mechanisms of PD pulses for UHF and traditional electrical measurements,” in *Electrical Insulation (ISEI), Conference Record of the 2012 IEEE International Symposium on*, 2012, pp. 454–458.

- [35] S. Meijer, “Partial discharge diagnosis of high-voltage gas-insulated systems,” TU Delft, Delft University of Technology, 2001.
- [36] W. Gao, D. Ding, D. Zhao, and W. Liu, “Propagation Properties of High-Frequency Electromagnetic Wave Through Typical In-Field GIS Structures,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 6, pp. 2476–2484, 2014.
- [37] U. Schichler, W. Koltunowicz, D. Gautschi, A. Girodet, H. Hama, K. Juhre, J. Lopez-Roldan, S. Neuhold, C. Neumann, S. Okabe, J. Pearson, R. Pietsch, U. Riechert, and S. Tenbohlen, “Tech Brochure 654 - UHF Partial Discharge Detection System for GIS: Application guide for sensitivity verification,” 2016.
- [38] R. Albarracin, G. Robles, J. M. Martinez-Tarifa, and J. Ardila-Rey, “Separation of sources in radiofrequency measurements of partial discharges using time/power ratio maps,” *ISA Trans.*, vol. 58, pp. 389–397, 2015.
- [39] M. Yoshida, H. Kojima, N. Hayakawa, F. Endo, and H. Okubo, “Evaluation of UHF Method for Partial Discharge Measurement by Simultaneous Observation of UHF Signal and Current Pulse Waveforms,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 2, pp. 425–431, 2011.
- [40] S. Tenbohlen, D. Denissov, S. M. Hoek, and S. M. Markalous, “Partial discharge measurement in the ultra high frequency (UHF) range,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, no. 6, pp. 1544–1552, 2008.
- [41] J. S. Pearson, B. F. Hampton, and A. G. Sellars, “A continuous UHF monitor for gas-insulated substations,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 469–478, 1991.
- [42] D. F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment*. Butterworth & Co., 1989.
- [43] A. F. Kip, “Onset Studies of Positive Point-to-Plane Corona in Air at Atmospheric Pressure,” *Phys. Rev.*, vol. 55, no. 6, pp. 549–556, Mar. 1939.
- [44] L. B. Loeb, A. F. Kip, and G. G. Hudson, “Pulses in Negative Point-to-Plane Corona,” *Phys. Rev.*, vol. 60, pp. 714–722, 1941.
- [45] L. Caliap, “Etude de l’optimisation des isolants d’un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS,” Université de Grenoble, 2010.
- [46] R. Morrow, “The theory of positive glow corona,” *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 30, no. 22, p. 3099, 1997.
- [47] N. Hayakawa, K. Hatta, S. Okabe, and H. Okubo, “Streamer and leader discharge propagation characteristics leading to breakdown in electronegative gases,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 4, pp. 842–849, 2006.
- [48] M. Wang, A. J. Vandermaar, and K. D. Srivastava, “Review of condition assessment of power transformers in service,” *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 6, pp. 12–25, 2002.
- [49] Y. Chen, C. Li, and W. Wang, “Fourier series method on eliminating narrow frequency noise in partial discharge detection,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP ’05. 2005 Annual Report Conference on*, 2005, pp. 430–433.
- [50] A. A. Girgis and F. M. Ham, “A Quantitative Study of Pitfalls in the FFT,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-16, no. 4, pp. 434–439, 1980.
- [51] Z. Xin and Q. Jiangtao, “De-noising of GIS UHF Partial Discharge Monitoring based on Wavelet Method,” *Procedia Environ. Sci.*, vol. 11, Part C, pp. 1302–1307, 2011.

- [52] C. F. F. C. Cunha, A. T. Carvalho, M. R. Petraglia, and A. C. S. Lima, "A new wavelet selection method for partial discharge denoising," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 125, pp. 184–195, 2015.
- [53] X. Ma, C. Zhou, and I. J. Kemp, "Interpretation of wavelet analysis and its application in partial discharge detection," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 3, pp. 446–457, 2002.
- [54] X. Ma, C. Zhou, and I. J. Kemp, "Automated wavelet selection and thresholding for PD detection," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 2, pp. 37–45, 2002.
- [55] J. Li, T. Jiang, S. Grzybowski, and C. Cheng, "Scale dependent wavelet selection for de-noising of partial discharge detection," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 17, no. 6, pp. 1705–1714, 2010.
- [56] T. Lin, R. K. Aggarwal, and C. H. Kim, "Wavelet transform and artificial intelligence based condition monitoring for GIS," in *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2003 IEEE PES, 2003*, vol. 1, pp. 191–195.
- [57] L. Satish and B. Nazneen, "Wavelet-based denoising of partial discharge signals buried in excessive noise and interference," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, no. 2, pp. 354–367, 2003.
- [58] S. Wenrong, L. Junhao, Y. Peng, and L. Yanming, "A New Approach to Extract PD Pulse using Independent Component Analysis," in *Electrical Insulation, 2008. ISEI 2008. Conference Record of the 2008 IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 351–354.
- [59] D. J. Hamilton and J. S. Pearson, "Classification of partial discharge sources in gas-insulated substations using novel preprocessing strategies," *IEE Proceedings-Science, Meas. Technol.*, vol. 144, no. 1, pp. 17–24, 1997.
- [60] A. G. Sellars, O. Farish, and M. M. Peterson, "UHF detection of leader discharges in SF₆," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 1, pp. 143–154, 1995.
- [61] C. Neumann and B. Krampe, "PD measurements on GIS and of different designs by non-conventional UHF and sensors," *CIGRE 15-305 Sess. 2000*, 2000.
- [62] R. Piccin, "Partial Discharge Analysis in HVDC Gas Insulated Substations," TU Delft, Delft University of Technology, 2013.
- [63] A. Krivda, "Automated recognition of partial discharges," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 5, pp. 796–821, 1995.
- [64] Beyer, "Space charge and partial discharge phenomena in high voltage DC devices," TU Delft, Delft University of Technology, 2002.
- [65] E. Gulski and A. Krivda, "Neural Networks as a Tool for Recognition of Partial Discharges," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 8, pp. 984–1001, 1993.
- [66] Y. Khan, A. A. Khan, F. N. Budiman, A. Beroual, N. H. Malik, and A. A. Al-Arainy, "Partial discharge pattern analysis using support vector machine to estimate size and position of metallic particle adhering to spacer in GIS," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 116, pp. 391–398, 2014.
- [67] P. Morshuis and G. Hoogenraad, "Partial discharge diagnostics for DC equipment," in *Electrical Insulation, 1996., Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on*, 1996, vol. 1, pp. 407–410.
- [68] P. H. F. Morshuis and J. J. Smit, "Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, no. 2, pp. 328–340, 2005.
- [69] T. Klueter, J. Wulff, and F. Jenau, "Measurement and statistical analysis of Partial

- Discharges at DC voltage,” in *Power Engineering Conference (UPEC), 2013 48th International Universities’*, 2013, pp. 1–5.
- [70] A. Contin, G. C. Montanari, and C. Ferraro, “PD source recognition by Weibull processing of pulse height distributions,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 7, no. 1, pp. 48–58, 2000.
- [71] A. Echelard, J. Levy-Vehel, and I. Taralova, “Application d’outils fractals pour la classification d’images microscopiques de matieres grasses laitieres,” in *20eme Colloque sur le traitement du signal et des images, FRA, 2005*, 2005.
- [72] U. Fromm and P. H. F. Morshuis, “Partial discharge classification at DC voltage,” in *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995. ICSD’95., Proceedings of the 1995 IEEE 5th International Conference on*, 1995, pp. 403–407.
- [73] L. Satish and W. S. Zaengl, “Can fractal features be used for recognizing 3-d partial discharge patterns,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 3, pp. 352–359, 1995.
- [74] R. J. VanBrunt, M. Misakian, S. V Kulkarni, and V. K. Lakdawala, “Influence of a dielectric barrier on the stochastic behaviour of Trichel-pulse corona,” *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 3, pp. 405–415, 1991.
- [75] R. J. VanBrunt and S. V Kulkarni, “Method for measuring the stochastic properties of corona and partial discharge pulses,” *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 60, no. 9, pp. 3012–3023, 1989.
- [76] G. Hoogenraad, P. H. F. Morshuis, and C. Petrarca, “Classification of partial discharges for DC equipment,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 1996., IEEE 1996 Annual Report of the Conference on*, 1996, vol. 1, pp. 110–112.
- [77] U. Fromm, “Interpretation of partial discharges at dc voltages,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, no. 5, pp. 761–770, 1995.
- [78] A. Pirker and U. Schichler, “Partial discharges at DC voltage - measurement and pattern recognition,” in *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016 International Conference on*, 2016, pp. 287–290.
- [79] C. Boya, M. Ruiz-Llata, J. Posada, and G.-S. J.A., “Identification of multiple partial discharge sources using acoustic emission technique and blind source separation,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 3, pp. 1663–1673, 2015.
- [80] J. Tang and Y. Liu, “Blind Source Separation of Mixed PD Signals Produced by Multiple Insulation Defects in GIS,” in *IEEE transactions on power delivery*, 2010, vol. 25, no. 1, pp. 170–176.
- [81] L. Hao, P. L. Lewin, J. A. Hunter, D. J. Swaffield, A. Contin, C. Walton, and M. Michel, “Discrimination of Multiple PD Sources Using Wavelet Decomposition and Principal Component Analysis,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 18, no. 5, pp. 1702–1711, 2011.
- [82] R. J. VanBrunt and D. Leep, “Characterization of point-plane corona pulses in SF₆,” *J. Appl. Phys.*, vol. 52, no. 11, pp. 6588–6600, 1981.
- [83] K. Wang, J. Li, S. Zhang, R. Liao, F. Wu, L. Yang, J. Li, S. Grzybowski, and J. Yan, “A hybrid algorithm based on s transform and affinity propagation clustering for separation of two simultaneously artificial partial discharge sources,” *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 22, no. 2, pp. 1042–1060, 2015.
- [84] T. Klueter, J. Wulff, and F. Jenau, “Time domain analysis of partial discharges at DC voltage in air and insulation oil,” in *Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2013 12th International Conference on*, 2013, pp. 308–312.
- [85] M.-X. Zhu, J.-N. Zhang, Y. Li, Y.-H. Wei, J.-Y. Xue, J.-B. Deng, H.-B. Mu, G.-J. Zhang,

- and X.-J. Shao, "Partial discharge signals separation using cumulative energy function and mathematical morphology gradient," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 23, no. 1, pp. 482–493, 2016.
- [86] M. Peiqing, L. Xiuwei, H. Yue, and J. Gehao S. Xiuchen, "Multi-source separation method for partial discharge detection in substations," in *Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, 2012, pp. 1–5.
- [87] L. Hao, P. L. Lewin, Y. Tian, and S. J. Dodd, "Partial discharge identification using a support vector machine," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on*, 2005, pp. 414–417.
- [88] D. Zheng, C. Zhang, G. Yang, and X. Sun, "An experiment study of partial discharge pattern recognition method based on wavelet neural networks," in *Electrical Insulation, 2006. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on*, 2006, pp. 230–233.
- [89] X. Wu, H. Xie, and S. Wu, "Application of wavelet analysis for detection of defects in insulation system," in *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1995. ICSD'95., Proceedings of the 1995 IEEE 5th International Conference on*, 1995, pp. 229–233.
- [90] G. Fleury, *Analyse spectrale - Methodes non-parametriques et parametriques*. Ellipses, 2001.
- [91] O. Perpinan, M. A. Sanchez-Uran, F. Alvarez, J. Ortego, and F. Garnacho, "Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 95, pp. 56–65, 2013.
- [92] V. M. Catterson and B. Sheng, "Deep neural networks for understanding and diagnosing partial discharge data," in *Electrical Insulation Conference (EIC), 2015 IEEE*, 2015, pp. 218–221.
- [93] M. Majidi and M. Oskuoee, "Improving pattern recognition accuracy of partial discharges by new data preprocessing methods," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 119, pp. 100–110, 2015.
- [94] G. Cybenko, "Approximation by superpositions of a sigmoidal function," *Math. Control. signals Syst.*, vol. 2, no. 4, pp. 303–314, 1989.
- [95] H. de Oliveira Mota, L. C. D. da Rocha, T. C. de Moura Salles, and F. H. Vasconcelos, "Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 81, no. 2, pp. 644–659, 2011.
- [96] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, *The Elements of Statistical Learning: data mining, inference and prediction*, 2nd ed. New York: Springer, 2009.
- [97] D. Wang, J. Tang, R. Zhuo, J. Lin, J. Wu, and X.-X. Zhang, "SA-SVM incremental algorithm for GIS PD pattern recognition," in *High Voltage Engineering and Application (ICHVE), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 388–391.
- [98] L. Satish and B. I. Gururaj, "Use of hidden Markov models for partial discharge pattern classification," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, no. 2, pp. 172–182, 1993.
- [99] T. Abdel-Galil, Y. G. Hegazy, M. M. A. Salama, and R. Bartnikas, "Partial discharge pulse pattern recognition using Hidden Markov Models," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 11, no. 4, pp. 715–723, 2004.
- [100] W. J. K. Raymond, H. A. Illias, A. H. A. Bakar, and H. Mokhlis, "Partial discharge classifications: Review of recent progress," *Measurement*, vol. 68, pp. 164–181, 2015.
- [101] A. Contin, A. Cavallini, G. C. Montanari, G. Pasini, and F. Puletti, "Digital detection and fuzzy classification of partial discharge signals," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 9, no. 3, pp. 335–348, 2002.

- [102] Y. Freund and R. E. Schapire, "A Decision-Theoretic Generalization of On-Line Learning and an Application to Boosting," *J. Comput. Syst. Sci.*, vol. 55, no. 1, pp. 119–139, 1997.
- [103] A. A. Mas'ud, B. G. Stewart, S. G. McMeekin, and A. Nesbitt, "Recognition of partial discharges using an Ensemble of Neural Networks," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP), 2011 Annual Report Conference on*, 2011, pp. 497–500.
- [104] M. Hartje, L. Kästingschäfer, M. Farahani, P. Werle, A. Pirker, and U. Schichler, "Applicability of IEC 60270 for Partial Discharge Measurements under DC Voltage - Results of a Round Robin Test," in *20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina*, 2017.
- [105] C. E. Shannon, "Communication in the Presence of Noise," *Proc. IRE*, vol. 37, no. 1, pp. 10–21, 1949.
- [106] F. Endo, A. Giboulet, A. Girodet, H. Hama, M. Hanai, K. Juhre, J. Kindersberger, W. Koltunowicz, H.-G. Kranz, S. Meijer, C. Neumann, S. Okabe, U. Riechert, and U. Schichler, "Tech Brochure 506 - Gas Insulated System for HVDC DC Stress at DC and AC Systems," *CIGRE Work. Gr. D1.33, Task Force 11*, 2012.
- [107] R. J. VanBrunt, "Stochastic properties of partial-discharge phenomena," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 26, no. 5, 1991.
- [108] Y. Liu, X. Cui, T. Lu, Z. Wang, X. Li, Y. Xiang, and X. Wang, "Detailed characteristics of intermittent current pulses due to positive corona," *Phys. Plasmas*, vol. 21, no. 8, p. 82108, 2014.
- [109] W. N. English, "Positive and Negative Point-to-Plane Corona in Air," *Phys. Rev.*, vol. 74, no. 2, pp. 170–178, 1948.
- [110] E. Kuffel and W. S. Zaengl, *High voltage engineering fundamentals*. Robert Maxwell, M.C., 1984.
- [111] Y. Akishev, M. Grushin, I. Kochetov, V. Karal'nik, A. Napartovich, and N. Trushkin, "Negative corona, glow and spark discharges in ambient air and transitions between them," *Plasma Sources Sci. Technol.*, vol. 14, no. 2, p. S18, 2005.
- [112] P. Mraz, P. Treyer, and U. Hammer, "Evaluation and limitations of corona discharge measurements - an application point of view," in *Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), 2016 International Conference on*, 2016.
- [113] T. N. Giao and J. B. Jordan, "Modes of Corona Discharges in Air," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, no. 5, pp. 1207–1215, 1968.
- [114] A. Pirker and U. Schichler, "HVDC GIS/GIL - PD Identification by NoDi* pattern," in *20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina*, 2017.
- [115] T. Takahashi, N. Hayakawa, S. Yuasa, S. Okabe, and H. Okubo, "Space charge behaviour and corona stabilization effect in SF₆ gas viewed from sequential generation of a dc partial discharge," *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 34, no. 12, pp. 1878–1884, 2001.
- [116] Y. P. Raizer, *Gas Discharge Physics*, 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1991.
- [117] K. Asano, K. Yatsuzuka, and T. Yamaki, "DC Corona Discharge of a Metal Filament Particle Within Parallel-Plate Electrodes," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, no. 1, pp. 87–92, 2000.
- [118] C. Heitz, "A general stochastic approach to partial discharge processes," in *Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998. ICSD '98. Proceedings of the 1998 IEEE 6th International Conference on*, 1998, pp. 139–144.

- [119] E. Ouss, L. Zavattoni, A. Beroual, A. Girodet, and P. Vinson, "Measurement and Analysis of Partial Discharges in HVDC Gas Insulated Substations," in *20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina*, 2017.
- [120] E. Ouss, L. Zavattoni, A. Beroual, A. Girodet, and P. Vinson, "Measurement and Analysis of Partial Discharges in HVDC Gas Insulated Substations," *Cigre Sci. Eng.*, vol. 11, pp. 62–69, 2018.
- [121] F. Pedregosa, G. Varoquaux, A. Gramfort, V. Michel, B. Thirion, O. Grisel, M. Blondel, P. Prettenhofer, R. Weiss, V. Dubourg, J. Vanderplas, A. Passos, D. Cournapeau, M. Brucher, M. Perrot, and E. Duchesnay, "Scikit-learn: Machine Learning in Python," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 12, 2011.
- [122] V. N. Vapnik, *The Nature of Statistical Learning Theory*, 1st ed. Springer-Verlag New York, 1995.
- [123] M. Ianotto, "Apprentissage numérique à partir d'exemples," 2013.
- [124] R. J. VanBrunt and S. V Kulkarni, "Stochastic properties of Trichel-pulse corona: A non-Markovian random point process," *Phys. Rev. A At. Mol. Opt. Phys.*, vol. 42, no. 8, pp. 4908–4932, 1990.

Contributions scientifiques

E. Ouss, L. Zavattoni, A. Beroual, A. Girodet, and P. Vinson, "Measurement and Analysis of Partial Discharges in HVDC Gas Insulated Substations," in *20th International Symposium on High Voltage Engineering, Buenos Aires, Argentina*, 2017. [119]

E. Ouss, L. Zavattoni, A. Beroual, A. Girodet, and P. Vinson, "Measurement and Analysis of Partial Discharges in HVDC Gas Insulated Substations," in *CIGRE Science & Engineering*, vol. 11, pp. 62-69, 2018. [120]

Annexe A. Développement d'un outil de reconnaissance des défauts

A.1. Implémentation d'un algorithme de réseau de neurones

Ce paragraphe donne des éléments techniques relatifs à l'implémentation d'un algorithme de réseau de neurones conformément aux paragraphes 5.3.1 et 5.3.2.

Le perceptron est implémenté en Python grâce à la classe `MLPClassifier` de *scikit-learn* [121].

L'apprentissage est réalisé par un algorithme de descente de gradient stochastique optimisé pour les grandes bases de données. Dans l'implémentation en Python, ce réglage est effectué grâce au paramètre :

```
solver = 'adam' (46)
```

La fonction d'activation des nœuds du réseau est la fonction unitaire rectifiée. Dans l'implémentation Python, ce réglage est effectué grâce au paramètre :

```
activation = 'relu' (47)
```

A.2. Développement d'une interface

Ce paragraphe présente des captures d'écran illustrant un cas d'utilisation réel de l'outil de reconnaissance automatique des défauts développé pendant cette thèse. Les principes de fonctionnement en sont donnés dans le Chapitre 5.

On donne un aperçu de la fenêtre obtenue à l'ouverture de l'outil en Figure 107.

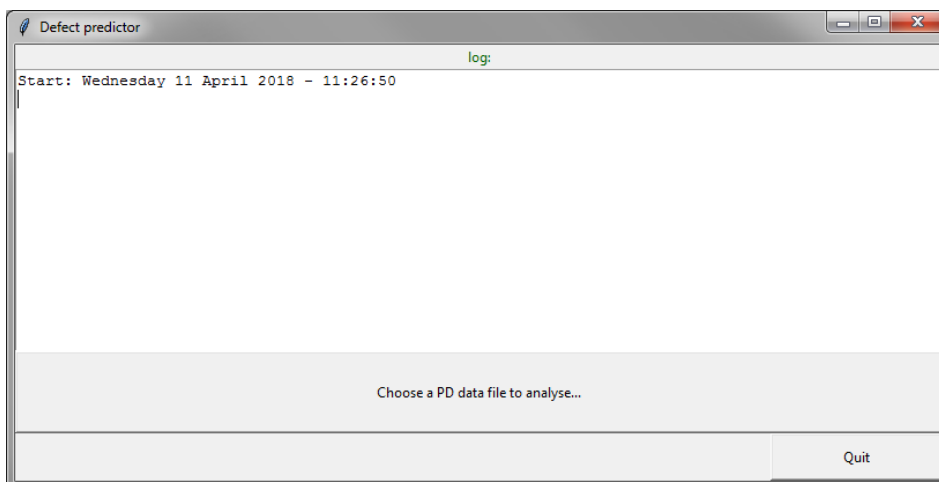


Figure 107 : Aperçu de l'outil de reconnaissance automatique des défauts développé pendant la thèse au moment de l'ouverture.

Le bouton « Choose a PD file to analyse... » ouvre une fenêtre de dialogue qui permet de choisir l'enregistrement de DP à analyser (Figure 108). Le fichier choisi ne fait pas partie de la base de données d'apprentissage.

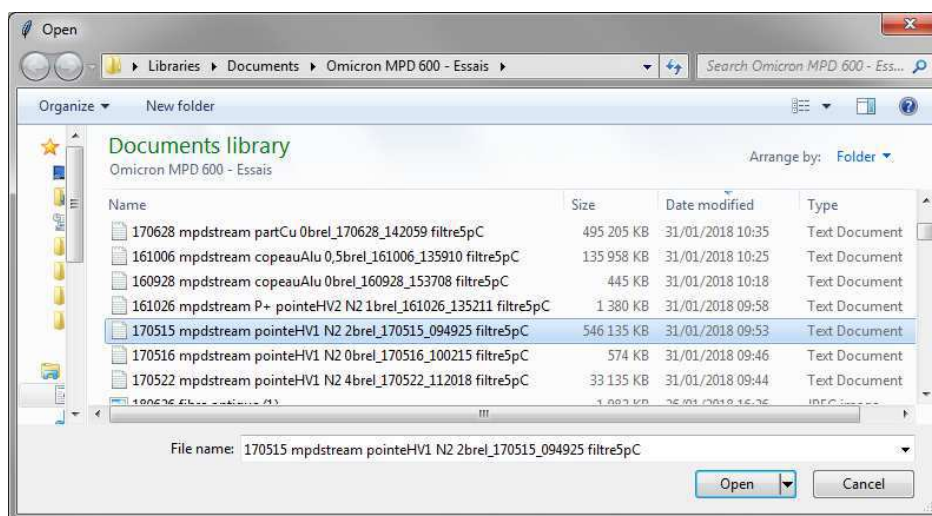


Figure 108 : Outil de reconnaissance automatique des défauts développé pendant la thèse – Choix du fichier de DP à analyser.

Dans l'exemple de la Figure 109, le fichier sélectionné comportait 18 409 801 points, ce qui a permis de générer 18 409 échantillons.

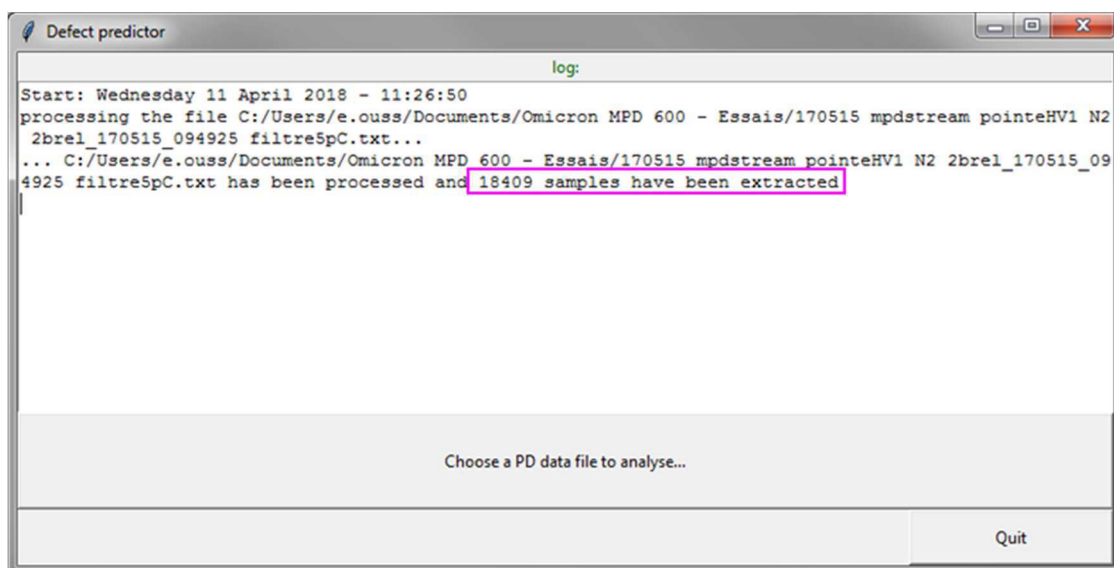


Figure 109 : Outil de reconnaissance automatique des défauts développé pendant la thèse – Génération des échantillons.

Tous les échantillons font l'objet d'une prédiction par l'algorithme de reconnaissance. Les résultats sont synthétisés sous forme de pourcentage (Figure 110). Si 66 % des prédictions désignent le même type de défaut, ce dernier est considéré comme étant à l'origine des décharges partielles mesurées.

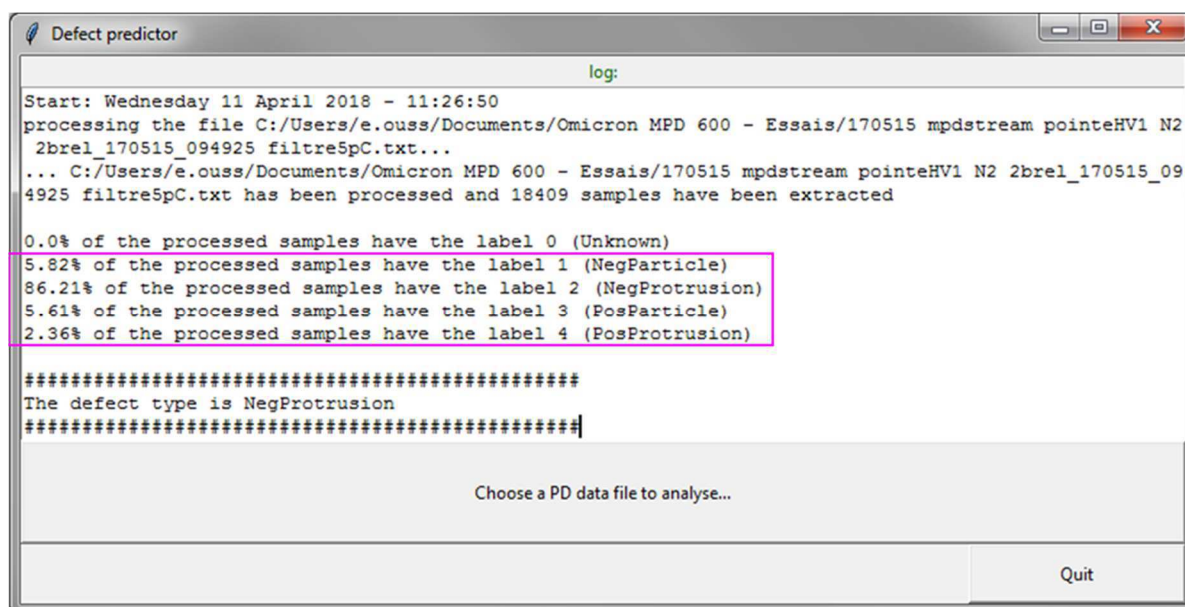


Figure 110 : Outil de reconnaissance automatique des défauts développé pendant la thèse – Prédiction du type de défaut.

Le bouton « Choose a PD file to analyse... » peut à nouveau être sollicité pour analyser un nouveau fichier de DP.

Remerciements

Voilà une aventure qui se termine, et beaucoup y ont participé de près ou de loin. Voici venu le moment de les remercier chaleureusement.

Commençons par le moment décisif de l'évaluation finale. Merci à **Nelly Bonifaci** et à **Thierry Lebey**, rapporteurs, d'avoir pris la peine de lire attentivement ma thèse à la lumière de vos expertises propres. Vos commentaires et vos remarques constructives m'ont fait progresser. Merci également à **Serge Agnel**, venu présider ce jury de qualité. Lors de la soutenance, vous avez tous les trois eu à cœur de me faire profiter de vos réflexions en posant des questions très intéressantes.

Merci également à **Abderrahmane Beroual**, directeur de thèse dont la réputation n'est plus à faire, d'avoir été si disponible pendant toute la durée des travaux.

Merci à **Alain Girodet**, directeur de programme à SuperGrid, d'avoir initié ce projet de thèse et de m'avoir fait confiance pour le mener à bien. Plus d'une fois, ton expertise m'a guidé dans la conduite de mon travail et l'analyse de mes résultats. A ce titre, comment ne pas remercier aussi **Thanh Vu** ? En prenant la responsabilité du sous-programme « GIS DC », tu t'es également beaucoup investi dans le suivi de mes travaux, et tes conseils pour la rédaction de ma thèse m'ont bien aidé à avancer.

Merci **Guillermo Ortiz Hernandez** pour tout le temps et l'énergie que tu m'as consacrés, particulièrement pendant cette dernière année de thèse. Tu as fait l'effort de me transmettre le fruit de ton expérience de chercheur et de me pousser dans mes retranchements. Ton exigence m'a permis de rechercher un travail de meilleure qualité.

Avant lui, c'est **Laëtitia Zavattoni** qui m'a accompagné pendant mes deux premières années de thèse. Merci Laëtitia, car c'est toi qui m'a permis de prendre mes marques à SuperGrid dans les meilleures conditions possibles. Ton dynamisme m'a bien aidé à lancer mes travaux avec sérénité.

J'ai trouvé à SuperGrid un environnement incroyablement favorable à la conduite de cette recherche.

Merci à **Nicolas Rafenoarisoa**, **Maxime Gery**, **Clément Carribon** et **Nicolas Deveaux** pour votre assistance dans la conception des maquettes. Vos conseils pertinents m'ont été

très utiles, et j'ai beaucoup apprécié la qualité de votre écoute quand je venais vous soumettre toutes sortes de projets de modification.

Merci à **Anaël Agier, Michel Valfré, Franck Tuffay et Pascal Robin** pour l'aide que vous m'avez apportée dans la réalisation de mes maquettes. Lorsque j'ai travaillé avec vous, vous avez su me faire bénéficier de votre expérience pour m'enseigner des bonnes pratiques, et de votre sens pratique pour me dépanner en toutes circonstances. Vous m'avez surtout permis de passer de bons moments à l'atelier, et c'est pourquoi j'associe **les autres techniciens et monteurs** à ces remerciements. Ensemble, nous avons tout connu, des rigueurs de l'hiver dans l'ancien atelier aux péripéties du déménagement. L'étage des bureaux n'est pas en reste de ce point de vue. Merci à vous, **chers voisins**, pour votre agréable compagnie. Les journées de travail sont plus légères quand chaque moment de pause est propice à une sympathique conversation.

A l'échelle de l'entreprise, j'ai beaucoup apprécié les contacts avec **tous mes collègues**, merci à vous.

Avant même le début de mon travail, à l'occasion de son stage de fin d'études, **Benjamin Jacquet** avait pu entamer une étude bibliographique et réaliser une étude de marché intéressante pour différents équipements de mesure. Merci pour le temps que tu m'as fait gagner.

J'ai également eu le plaisir de travailler avec **Damien Gadou-Sanyal**. Merci à toi, Damien, car tu as fourni beaucoup d'effort pour être capable d'évoluer avec aisance dans une problématique complexe. J'espère que les longues heures de manipulations à l'atelier te resteront comme un bon souvenir de ton passage à SuperGrid. En tous cas, elles m'ont apporté des données précieuses.

Je remercie enfin ma chère épouse **Marie** et mes enfants **Maximilien et Joséphine**. C'est en particulier grâce à vous que je n'ai pas travaillé trop tard le soir ! Je rends grâce pour la joie que vous m'apportez.

Le nerf de la guerre :

Ce projet a bénéficié d'une aide de l'Etat au titre du programme d'Investissements d'avenir portant la référence (ANE-ITE-002-01).

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 25 mai 2016,

Vu la demande du directeur de thèse

Monsieur A. BEROUAL

et les rapports de

Mme N. BONIFACI

Chargée de Recherche CNRS, HDR- G2ELab - 21 avenue des Martyrs - 38031 Grenoble

et de

M. T. LEBEY

Directeur de Recherche CNRS - Laplace - 118 route de Narbonne - 31062 Toulouse cedex 9

Monsieur OUSS Etienne

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE

Fait à Ecully, le 18 septembre 2018

P/Le directeur de l'E.C.L.
La directrice des Etudes

