



HAL
open science

Etude de l'optimisation des isolants d'un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS

Lucian Caliap

► **To cite this version:**

Lucian Caliap. Etude de l'optimisation des isolants d'un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2010. Français. NNT: . tel-00585494

HAL Id: tel-00585494

<https://theses.hal.science/tel-00585494>

Submitted on 13 Apr 2011

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

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

**UNIVERSITE DE GRENOBLE
INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE**

N° attribué par la bibliothèque

|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|_|

THESE

pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'Université de Grenoble
délivré par l'Institut polytechnique de Grenoble**

Spécialité : « Génie Electrique »

préparée au **Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2ELab)**

dans le cadre de l'**Ecole Doctorale** « *Electronique, Electrotechnique, Automatique & Traitement du Signal* »

présentée et soutenue publiquement

par

Lucian CALIAP

le 16 septembre 2010

Etude de l'optimisation des isolants d'un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS

***Olivier LESAIN
André DENAT***

JURY

M. François BURET	, Président
M. Lucian DĂSCĂLESCU	, Rapporteur
M. André DENAT	, Co-encadrant
M. Alain GIRODET	, Examineur
M. Olivier LESAIN	, Directeur de thèse
M. Jean-Hugues PAILLOL	, Rapporteur

Résumé

Cette étude concerne les isolants support, utilisés dans l'appareillage haute tension blindé sous pression gazeuse. La réduction de la taille du matériel est une demande constante pour des questions de coût. Elle impacte directement les isolants et l'optimisation diélectrique est rendue nécessaire. On peut considérer que les points qui nécessitent une attention particulière sont : La zone de **point triple** : point de jonction entre un isolant, le gaz et le métal, zone sensible aux décharges partielles et aux particules qui peuvent s'y accumuler. Les **particules métalliques** qui peuvent se trouver à l'intérieur du système haute-tension et les problèmes d'accumulation de **la charge** sur la surface de l'isolant qui peuvent réduire sa tenue diélectrique lors de l'application d'une surtension. Ces trois points représentent la base de départ de cette étude qui caractérise la multitude de phénomènes complexes qui apparaissent en présence de haute tension.

Abstract

In gas insulated switchgears (GIS), high voltage electrodes are supported by solid insulators. The reduction of the size of the equipment for cost considerations, impacts directly on the insulator and a careful optimization becomes necessary. A **triple junction** (TJ) exists at the interface between metal, insulating solid, and gas. In this sensitive area, partial discharges may appear, triggered by the presence of high voltage. Also, a further degradation of insulation performance can occur if solid **particles** are present in that zone. The **accumulation of electric charge** on the surface of the insulator can also reduce the system's dielectric strength when applying high voltage. These three points represent the starting point of this study that characterizes the multitude of complex phenomena that occur in the presence of high voltage.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le laboratoire de Génie Electrique de Grenoble (G2Elab) au sein de l'équipe Matériaux Diélectriques et Electrostatique en collaboration avec la Areva T&D dans le cadre d'une thèse CIFRE.

Je tiens dans un premier temps à remercier Monsieur Olivier Lesaint, Directeur de Recherche au CNRS et Directeur adjoint actuel du G2Elab, pour avoir encadré et dirigé avec beaucoup de dévouement ce travail. Ses qualités scientifiques et techniques m'ont permis de mener à bien cette étude.

C'est avec reconnaissance que je remercie Monsieur André Denat, Directeur de Recherche au CNRS. Nos échanges réguliers, ses connaissances et compétences ainsi que sa disponibilité inconditionnelle m'ont permis de guider ce travail et d'approfondir le domaine dans lequel je poursuis ma carrière. Il m'a témoigné son soutien et son aide d'une façon continue durant ces trois années.

Je remercie également Madame Nelly Bonifaci, Directrice de Recherche au CNRS, mon troisième encadrant, pour tout l'équilibre et l'aide qu'elle a apportés à mon travail.

Je tiens à remercier François Buret, Maître de Conférences (HDR) à l'Ecole Centrale de Lyon qui m'a fait l'honneur de présider ce jury.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Jean-Hugues Paillol, Professeur des Universités à l'Université de Pau et des Pays de l'Adour pour avoir rapporté ce travail.

Je tiens à remercier vivement Monsieur Lucian Dăscălescu, Professeur des Universités à l'Université de Poitiers, en premier temps, pour le fait d'avoir accepté d'être rapporteur de ma thèse. En deuxième temps, pour tous les conseils et l'aide donnés pendant mon stage de fin d'études, mon stage de Master 2 et ma thèse. Je lui suis profondément reconnaissant pour la bienveillance qu'il n'a cessée de manifester à mon regard pendant les derniers 6 ans.

Ce travail est le fruit d'une collaboration entre le G2ELab et la société Areva T&D.

Je voudrais tout d'abord remercier Monsieur Alain Girodet, responsable de recherche en haute-tension à Areva T&D Villeurbanne, pour m'avoir fait confiance tout au long de ce travail et m'avoir fait partager son savoir.

J'exprime également toute ma gratitude à Monsieur Guilhem Blanchet, ingénieur support technique et innovation à Areva T&D, Aix-les-Bains, qui m'a beaucoup appris grâce à son expérience en haute-tension et qui a été prêt chaque fois à répondre à mes nombreuses questions.

Je remercie par ailleurs Monsieur Bernard Gelloz pour ses conseils pendant les réunions et Monsieur Philippe Ponchon pour m'avoir accepté pour ce travail.

Mes remerciements s'adressent ensuite aux personnels de l'équipe MDE qui m'ont permis de travailler dans d'excellentes conditions et dans une ambiance toujours sympathique.

Je remercie en particulier l'équipe technique du G2ELab : Messieurs Lucien Saragossi, François Montanvert, Alain Tisserand, Christophe Pollet, Jean-Luc Palenzuela et Jean-Paul Baroux pour leur disponibilité dans la réalisation et le dépannage des dispositifs expérimentaux. Je veux remercier aussi à Julien Bamberger pour la rapidité de ses interventions dans les problèmes informatiques (et de son top-spin au ping-pong). Je n'oublie pas de remercier également Mesdames Claire Roux et Geneviève Teissedre pour leur gentillesse, leur disponibilité et leur efficacité dans les travaux administratifs.

Je tiens à remercier l'équipe des doctorants de l'équipe MDE pour tous ces très bons moments passés ensemble.

Merci à Quentin Guegan. Ses conseils scientifiques m'ont énormément aidé dans le déroulement de ma thèse.

Merci aussi à mes collègues de bureau pour m'avoir supporté et pour m'avoir battu au ping-pong : Elysée Obame et Hoan Van Tran.

Merci à tous les autres doctorants qui sont devenus très vite mes amis : Christelle Dubois, Jonathan Raisin, Emilie Brun et Vincent Boucher. Vous êtes toujours mes français préférés.

Je vais enfin remercier mes parents et mes grands-parents, mes amis roumains d'ici, de Roumanie et d'ailleurs. Plus spécialement, je vais finir en remerciant Ștefana pour son soutien et ses encouragements au cours de ces années passées ensemble. Mulțumesc mult!

Table de matières

INTRODUCTION	13
1. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE : CLAQUAGE ET DECHARGES PARTIELLES DANS LES GAZ.....	15
1.1. Mécanismes de claquage	15
1.1.1. Généralités sur les gaz.....	15
1.1.2. Décharges électriques dans les gaz	17
1.1.3. Facteurs influençant la tenue diélectrique des gaz	23
1.2. Décharges partielles.....	27
1.2.1. Définition	27
1.2.2. Classification.....	27
1.2.3. Circuit équivalent 'à trois capacités'	28
1.2.4. Charge apparente	30
1.2.5. Effets des DP.....	31
1.3. Le point triple (ou jonction triple).....	31
1.3.1. Calculs du champ électrique	33
1.3.2. Calculs de la tension d'apparition des DP.....	34
1.4. Travaux entrepris dans cette thèse.....	35
2. METHODES EXPERIMENTALES	37
2.1. Cellule d'essai « AREVA ».....	37
2.2. Cellule à champ électrique quasi-uniforme	40
2.3. Essais en tension alternative	43
2.3.1. Système d'alimentation.....	43
2.3.2. Détection et mesure électrique des décharges partielles	45
2.3.3. Système optique	49
2.3.4. Détection et mesure optique des DP sous impulsion de tension.	50
2.4. Essais en tension impulsionnelle.....	52
2.4.1. Système d'alimentation.....	52
2.4.2. Détection et mesure des décharges partielles	54
2.5. Etude de l'isolant solide.....	54
2.5.1. Mesure du déclin de potentiel des échantillons plans	54
2.5.2. Mesure du potentiel de surface des isolants utilisés dans la cellule AREVA	56
2.6. Logiciels spécifiques utilisés.....	58
2.6.1. QuickField 4.2.....	58
2.6.2. FEMM.....	58
3. ETUDE DES DP AU POINT TRIPLE	59
3.1. Essais en tension alternative (50Hz).....	59
3.1.1. Tensions spécifiques mesurées	59
3.1.2. Caractérisation électrique.....	64

3.1.3.	Caractérisation optique	68
3.1.3.	Influence de la nature de l'isolant solide sur les DP.....	76
3.2.	Mesures en tension impulsionnelle	77
3.2.1.	Résultats avec le SF ₆	77
3.2.2.	Résultats avec l'air sec.....	83
3.2.3.	Caractérisation visuelle des DP.....	85
3.3.	Evaluation de la tension d'amorçage U_{DP} des décharges partielles	95
3.4.	Détermination des tensions de claquage	101
3.5.	Conclusions.....	106
4.	MODELE DU POINT TRIPLE AVEC PARTICULE METALLIQUE FIXEE.	109
4.1.	Caractérisation sous tension alternative	110
4.1.1.	Tension d'apparition des DP (U _a) et tension d'amorçage des DP (U _{DP}).....	110
4.1.2.	Tension de claquage (U _b).....	110
4.1.3.	Caractérisation des DP	111
4.1.4.	Mesures en tension alternative.....	112
4.1.5.	Dispersion de U _b	114
4.2.	Tension impulsionnelle	121
4.2.1.	Dans le SF ₆	121
4.2.2.	Dans l'Air Sec.....	132
4.2.3.	Commentaires sur l'effet d'une particule fixée.....	136
4.3.	Décharges apparaissant après l'impulsion de tension	137
4.4.	Effet des claquages sur l'isolant.....	140
4.5.	Conclusions.....	141
5.	CELLULE A BARRIERE DIELECTRIQUE	143
5.1.	Tensions d'apparition des DP	143
5.2.	Circuit électrique pour la mesure des DP par alternance.....	148
5.3.	Conclusions.....	150
6.	CARACTERISATION DE L'ISOLANT	151
6.1.	Déclin du potentiel des échantillons	151
6.1.1.	Résine époxy.....	151
6.1.2.	Autres échantillons.....	153
6.1.3.	Discussion.....	154
6.2.	Mesures du potentiel sur la surface de l'isolant porteur.	155
6.3.	Conclusions.....	164
	CONCLUSIONS GENERALES.....	165
	ANNEXE 1.....	169

ANNEXE 2.....	171
BIBLIOGRAPHIE	175

Introduction

Le progrès technologique caractérisant le 20^{ème} siècle a demandé l'augmentation de la puissance électrique fournie (la première ligne HT supérieure à 100kV a été réalisée en 1912, en Allemagne et en 1985, au Japon, une ligne de 1200kV a été construite). Cela a influencé l'évolution de l'appareillage à haute tension et a nécessité la construction d'appareillage qui peut gérer des tensions et des courants de plus en plus élevés. En parallèle, la concurrence a poussé les constructeurs à réaliser des appareils de plus en plus économiques et le développement des moyens de calcul a permis de mieux optimiser les dimensions et la géométrie de ces appareils.



Appareillage blindé utilisé à 420 kV.

Les coûts des terrains dans la zone urbaine et la difficulté de trouver des surfaces suffisantes, a fait apparaître, au milieu du siècle, une nouvelle technique d'appareillage HT appelée **sous-enveloppe métallique (SEM)**. La particularité de ce type de postes réside dans le fait que les différents systèmes (disjoncteurs, sectionneurs, jeux de barres, transformateurs de mesure, etc.) sont enfermés dans des enceintes métalliques étanches (enveloppes) mises à la terre. L'**isolation** est réalisée par un gaz sous pression qui assure, à la fois, l'isolement à la masse, et l'isolement entre l'entrée et la sortie des appareils de coupure ou d'interruption. A 420kV, pour l'air à pression atmosphérique la distance minimale nécessaire entre le conducteur et la

structure métallique reliée à la terre est d'environ 3 m et pour un poste sous enveloppe métallique cette distance peut être diminuée à 20 cm (en utilisant, par exemple, le SF₆ à 7,3 bar). Les disjoncteurs à l'huile utilisés jusqu'aux années 60 pouvaient couper des courants inférieurs à 40 kA ; leur prix de construction et de maintenance ainsi que l'augmentation constante de la puissance circulée dans les lignes haute-tension ont provoqué l'apparition des disjoncteurs à gaz (SF₆ ou vide) qui peuvent couper un courant jusqu'à une valeur 63 kA.

La réduction de la taille du matériel est une demande constante pour des questions du coût de production. Elle impacte directement les isolants et une optimisation diélectrique plus approfondie des composants et de l'ensemble est nécessaire.

Cette étude, réalisée au sein du **Laboratoire de Génie Electrique de Grenoble** (G2ELab) au cours d'un contrat CIFRE avec **Areva T&D**, Aix-les-Bains, concerne les isolants-support utilisés dans l'appareillage haute-tension blindé.

On peut considérer que les points importants qui nécessitent une attention particulière dans ces systèmes haute-tension sont :

- La **zone de point triple** qui est définie comme le point de jonction entre un isolant, le gaz, et le métal. A cause du renforcement du champ qui apparait, cette zone est susceptible de provoquer l'apparition de décharges partielles et d'attirer les particules métalliques.
- Les **particules métalliques** qui peuvent se trouver à l'intérieur du système haute-tension. Celles-ci peuvent provenir de l'usinage des parties qui composent l'ensemble et leur taille peut être de quelques millimètres. En présence d'une haute tension, les particules sont attirées dans certaines zones du système où le champ électrique est renforcé. Sous la présence d'un gaz électronégatif à haute pression (comme le cas du SF₆ dans les PSEM), les effets négatifs que ces particules peuvent avoir (décharges partielles, tension de claquage du système) augmentent.
- Les problèmes d'**accumulation de charge** sur la surface de l'isolant qui peuvent réduire sa tenue diélectrique lors de l'application d'une surtension spécifique (surtension temporaire, choc de manœuvre, choc de foudre).

Ces trois points ont représenté la base de départ de cette étude, dans laquelle nous avons essayé de mesurer, simuler, analyser et comprendre la multitude de phénomènes complexes qui peuvent apparaître sous la présence de la haute tension.

1. Etude bibliographique : claquage et décharges partielles dans les gaz

1.1. Mécanismes de claquage

1.1.1. Généralités sur les gaz

Des quatre types d'isolants génériques (vide, gaz, liquide et solide), les gaz sous pression (par exemple le SF₆, les mélanges SF₆/N₂ ou les hydrocarbures perfluorés) offrent de multiples avantages, le premier étant leur tenue diélectrique (Figure 1.1) [1]. Rappelons que les propriétés diélectriques des gaz dépendent de la pression, de la température et de la teneur en impuretés (humidité par exemple).

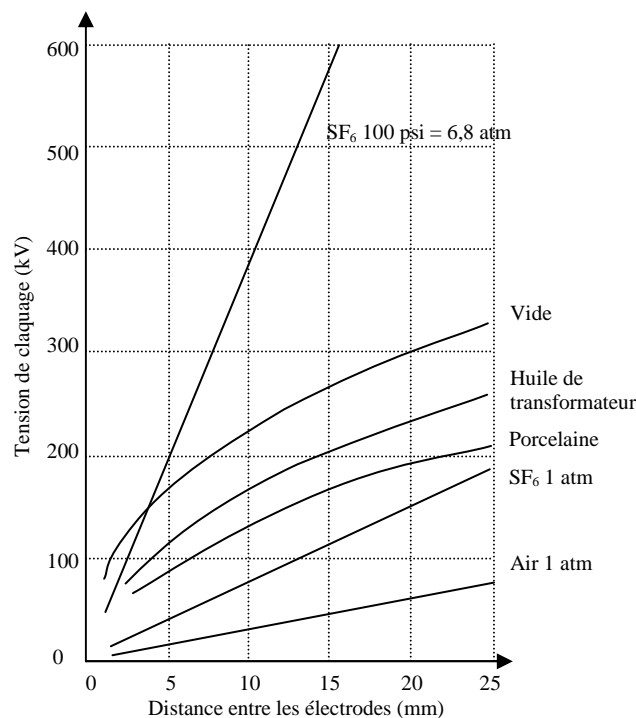


Figure 1.1. La tenue diélectrique dans un champ électrique uniforme de quelques isolants typiques [1]

Depuis les années '50, avec l'apparition des systèmes électriques sous enveloppe métallique (PSEM), de nombreuses études se sont axées sur la caractérisation des décharges dans les gaz. Dans cette étude, nous avons choisi de nous concentrer sur deux isolants gazeux, le SF₆ et l'air sec reconstitué (80% N₂ et 20% O₂). Le SF₆ est actuellement utilisé dans la fabrication des PSEM et l'air sec pourrait l'être également dans certaines applications si le SF₆ (un gaz à effet de serre très élevé), devenait interdit d'utilisation. Même si l'air atmosphérique est le gaz le plus utilisé comme isolant électrique, une étude des propriétés diélectriques de l'air sec comprimé en vue d'applications dans les postes blindés est intéressante, en comparaison avec les performances du SF₆ dans la même application.

L'hexafluorure de soufre (SF₆)

L'hexafluorure de soufre est le résultat de la synthèse directe à partir du fluor et du soufre fondu. C'est un gaz incolore, sans odeur, inerte, ininflammable et très stable chimiquement jusqu'à 800°C. Il est non toxique mais cependant ses produits de décomposition dus aux décharges électriques peuvent l'être.

Découvert par Henri Moissan et Paul Lebeau en 1901, le SF₆ est utilisé depuis les années '50 comme gaz d'isolation dans les appareils industriels haute tension. De nombreuses études ont démontré ses excellentes propriétés diélectriques, thermiques et physiques mais aussi sa remarquable capacité d'extinction de l'arc électrique lors des manœuvres de coupure réalisées sur les disjoncteurs. L'expérience pratique a aussi démontré une bonne fiabilité des appareils isolés avec du SF₆.

Cependant, des travaux récents [2] ont mis en évidence que le SF₆ est le gaz avec le plus grand potentiel de réchauffement global des gaz analysés par le « Intergovernmental Panel on Climate Change » : impact 22800 fois plus grand que le CO₂ pour 100 ans. Cela signifie que 1 kg de SF₆ émis dans l'atmosphère a le même impact sur l'effet de serre global pendant 100 ans que 22800 kg de CO₂ émis durant la même période. En conséquence, des efforts ont été réalisés pour limiter les rejets de SF₆ dans l'atmosphère (-47% en France de 1990 à 2007) [3]. Certains sous-produits du SF₆ produits lors de décharges électriques en présence d'atomes d'oxygène et l'hydrogène, sont connus pour être toxiques :

- SOF₄ et SOF₂ sont peu toxiques ;
- SF₄, SO₂F₂, SO₂ et HF sont moyennement toxiques ;
- S₂F₁₀ est très toxique.

L'alumine, qui est hydrophile, présente dans les isolants porteurs en résine époxy, peut fixer ces produits.

Chu [4] présente une liste détaillée des produits de décomposition, en fonction de plusieurs facteurs présents dans les PSEM (type de décharge, nature de l'électrode, technologie d'analyse, etc.).

Même si la température de liquéfaction à la pression de 4 bars absolus est de -38°C , une diminution de la température, même sans atteindre la température de liquéfaction, peut affecter les propriétés diélectriques du SF_6 . Ainsi, une augmentation du coefficient d'ionisation α , responsable de la diminution de la valeur du champ critique, a été observée [5].

L'air sec

L'air reconstitué de laboratoire est un mélange réalisé artificiellement en mélangeant, en volume, 80% de N_2 et 20% de O_2 .

1.1.2. Décharges électriques dans les gaz

Généralement, les gaz sont considérés comme des isolants parfaits car ils ne contiennent qu'une concentration infime de porteurs de charge. Si les gaz sont soumis à un champ électrique, le courant qui peut apparaître est typiquement de l'ordre du femtoampère, ceci pour des dizaines de kilovolts appliqués sur quelques centimètres d'air. Lorsqu'un champ électrique d'amplitude suffisante est appliqué, un courant nettement plus important est détecté, c'est la décharge électrique qui peut conduire au claquage. En fonction des conditions expérimentales (pression, répartition du champ électrique, type de tension appliquée, etc.), les phénomènes de décharges et de claquage peuvent être de différents types, tant dans leur déroulement que dans leur nature [1].

Claquage de type 'Townsend'

Si un électron libre est soumis à un champ électrique dans un gaz, il est accéléré sous l'action de la force électrostatique donnée par la loi de Coulomb $\vec{F} = q \cdot \vec{E}$ (q – la charge électrique, \vec{E} – le vecteur champ électrique). A partir d'une valeur définie du champ électrique, l'électron possède une énergie suffisante pour ioniser les atomes ou les molécules du gaz, s'il entre en collision avec elles. Le phénomène naturel d'attachement des électrons par les molécules du gaz s'oppose à l'ionisation jusqu'au moment où l'énergie des électrons est suffisante et l'ionisation devient prépondérante par rapport à l'attachement. Le résultat de ces collisions est

la formation de nouveaux électrons qui pourront à leur tour être accélérés et, ensuite, ioniser les atomes ou les molécules du gaz, c'est le phénomène d'avalanche électronique. Le champ électrique minimum nécessaire pour amorcer ce processus de multiplication est appelé champ critique, noté E_{critique} , pour lequel le coefficient d'ionisation α et le coefficient d'attachement η sont égaux. Le coefficient $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ (la différence entre le coefficient d'ionisation et le coefficient d'attachement) est appelé coefficient net d'ionisation. Ensuite, d'autres processus (appelés effets secondaires) vont s'ajouter à l'ionisation directe décrite précédemment pour la renforcer. Suivant les conditions expérimentales (pression et nature du gaz, nature et géométrie des électrodes, etc.), différents processus secondaires peuvent intervenir, on peut citer :

- la production d'électrons à la cathode par l'impact des ions positifs produits dans l'avalanche primaire. Ces électrons créent des électrons dits secondaires qui produisent une nouvelle avalanche qui va s'ajouter à l'ionisation directe (processus secondaire γ) ;
- action des métastables (processus ε) à la cathode ;
- photoémission à la cathode (processus δ) par l'action des photons créés par la décharge ;
- photo-ionisation du gaz (processus β) sous l'action de photons.

Un traitement exhaustif des différents processus conduit à une expression complexe et pratiquement inexploitable compte tenu des nombreux paramètres difficiles à connaître avec une précision suffisante [6]. Aussi un coefficient généralisé d'ionisation est introduit qui peut s'écrire : $\bar{\omega} = \gamma\bar{\alpha} + \varepsilon + \delta + \beta$. Ségur [7] propose la relation suivante comme critère de claquage :

$$1 - \frac{\bar{\omega}(e^{\bar{\alpha}d} - 1)}{\alpha} = 0 \quad (1.i)$$

Ou, si on néglige ε , δ et β :

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (1.ii)$$

Ce critère de claquage est basé sur une série d'avalanches successives qui se développent dans tout l'espace entre les électrodes.

Rappelons que le SF_6 est un gaz très électronégatif (i.e. qui présente un coefficient d'attachement élevé) ce qui entraîne une valeur du champ critique environ 3 fois plus élevée que l'air (90 kV/cmbar à comparer à 30kV/cmbar pour l'air).

L'avalanche électronique initiale nécessite cependant l'existence d'électrons germes. Ces électrons peuvent avoir plusieurs origines :

- La radioactivité naturelle. La contribution de la radioactivité terrestre est en temps normal environ 10^{-4} électrons. s^{-1} . cm^{-3} . Pa^{-1} mais, dans des systèmes qui présentent un écran métallique (cellules d'essais, postes blindés), ces rayonnements sont atténués à environ 2.10^{-5} électrons. s^{-1} . cm^{-3} . Pa^{-1} . La contribution de la radiation cosmique est comparable et s'élève à environ 2.10^{-5} électrons. s^{-1} . cm^{-3} . Pa^{-1} [8]
- L'émission d'électrons par la cathode. La probabilité de trouver des électrons loin de la cathode dépend du champ électrique local, de la nature du métal et de son état de surface (inclusions isolantes, rugosités, etc.). Par exemple, une émission de champ à partir d'une électrode en tungstène (travail de sortie de 4,5eV) est détectée pour une valeur du champ électrique local supérieur à 20 MV/cm. Dans la pratique, ce phénomène peut apparaître à partir d'états de surface microscopiques où l'amplification du champ peut atteindre la valeur suffisante pour l'injection d'électrons.

Loi de Paschen

Dans des conditions expérimentales bien définies (pression, température, distance inter-électrodes, distribution quasi-uniforme du champ électrique [9][10]), en utilisant un gaz donné, il existe une valeur seuil de la tension appliquée au-delà de laquelle un claquage de type Townsend se produit et le gaz cesse d'être un isolant. Friedrich Paschen, au début du XXème siècle, a montré que cette valeur crête de la tension alternative appliquée, est une fonction du produit entre la pression p du gaz (en général à 25°C, 298,15K) et la distance entre les électrodes d . (Figure 1.2). Des déviations à la loi de Paschen sont observées lorsque le mécanisme de claquage n'est plus le mécanisme de Townsend (avalanches d'avalanches dans tout l'espace inter-électrodes). On peut citer :

- aux pressions élevées, pour des distances inter-électrodes fixées, la valeur de la tension de claquage mesurée, U_b , devient inférieure à la valeur indiquée par la loi de Paschen (Figure 1.3). Ces déviations sont attribuées à la « magnification » des défauts de surface des électrodes, due à l'augmentation de la pression [11, 12].
- à des distances inter-électrodes très faibles, la valeur de la tension U_b augmente lorsque le produit pd diminue. L'explication de ce phénomène vient du fait que le libre parcours moyen des électrons devient alors plus grand par rapport à la distance entre les électrodes et le mécanisme d'avalanche de Townsend [1] est quasi-impossible. Les

mécanismes de décharges proposés par [13] indiquent une libération de gaz ou de vapeur par les électrodes, le claquage pouvant se produire dans ce milieu.

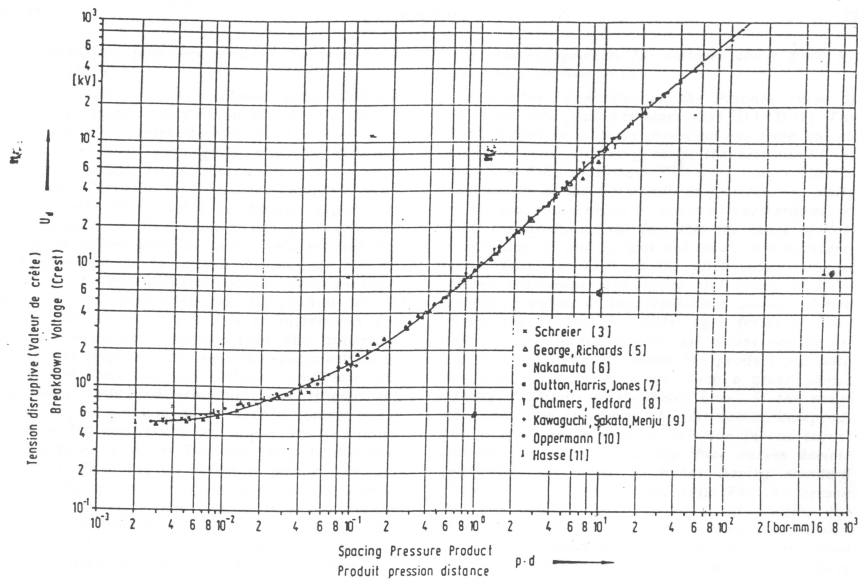


FIGURE D1
 Courbe de Paschen pour le SF₆ en échelles logarithmiques. Température 25 °C.
 Paschen Curve for SF₆ in log-log scale. Temperature 25 °C.

a. SF₆, 25°C.

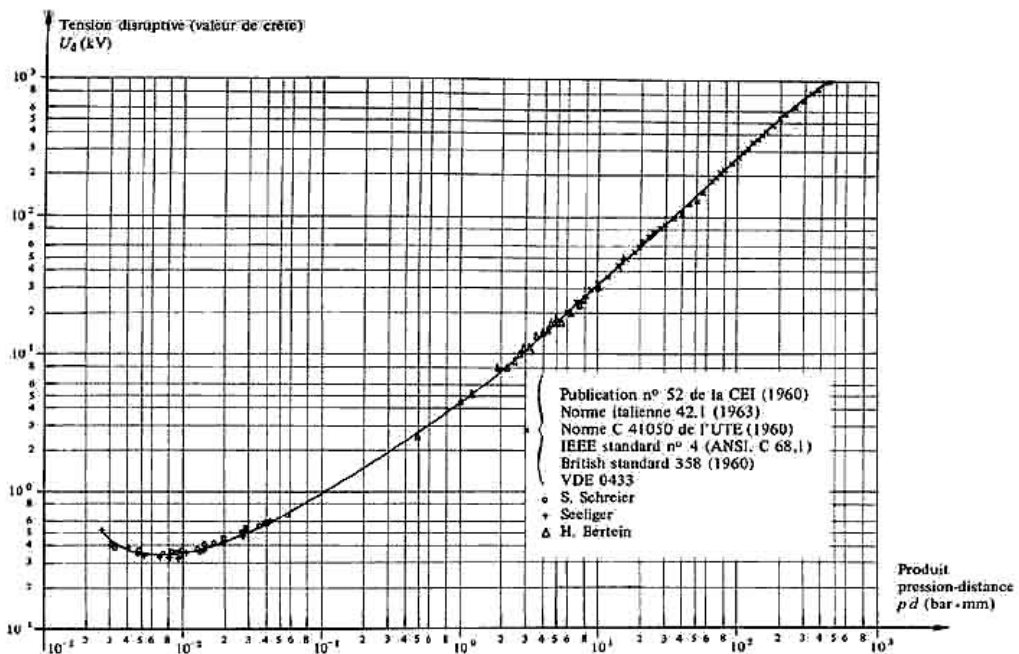


Fig. 9.11 Courbe de Paschen pour l'air en échelles logarithmiques. Température 20°C [262]

b. Air 20°C

Figure 1.2. Les courbes de Paschen pour le SF₆ et l'air [14].

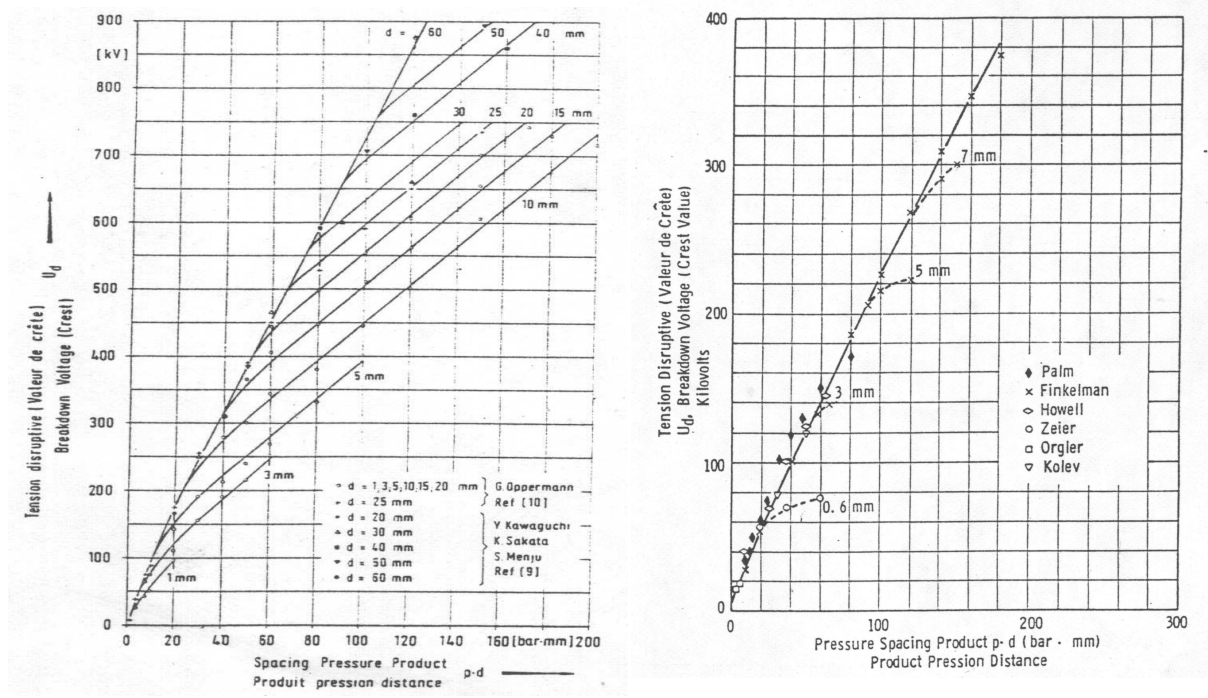


Figure 1.3. Déviations à la loi de Paschen dans le SF₆ et l'azote [14].

Claquage par 'Streamer'

Le mécanisme de claquage type Townsend s'explique par une série d'avalanches qui se développent entièrement dans l'espace inter-électrodes (les électrons initiaux se multiplient par des phénomènes d'ionisations). Ce mécanisme suppose plusieurs générations d'avalanches. Pourtant, l'expérience montre que, notamment pour des pressions de l'ordre des bars et à des distances de l'ordre des centimètres, le claquage intervient avant qu'un électron n'ait pu traverser tout l'espace entre les électrodes, tenant compte de la mobilité de l'électron et de la valeur du champ appliqué. Un mécanisme différent doit donc être envisagé pour expliquer ce type de claquage.

C'est le mécanisme de streamer [15, 16, 17]. Dans ce modèle, on considère une avalanche électronique qui se développe à partir d'un seul électron germe dans un champ électrique intense, par exemple dans la région de champ électrique intense autour d'un fil ou d'une pointe ou lors de l'application d'une forte surtension en champ uniforme. Si le nombre d'électrons produit par cette avalanche, atteint une certaine valeur critique ($\sim 10^8$ dans l'air), la charge d'espace ainsi créée par les ions positifs va très fortement modifier la distribution locale du champ électrique. Devant la tête de l'avalanche, il se forme ainsi un volume où le champ électrique devient supérieur au champ critique et où une nouvelle avalanche va pouvoir se développer à partir d'électrons formés par l'action des radiations UV dans ce volume. Il se forme alors un canal de streamer qui se propage vers l'électrode opposée. Ce

processus se répète jusqu'au claquage si le canal atteint l'électrode opposée ou s'arrête si la chute de tension dans le canal de streamer ne permet plus de maintenir un champ supérieur au champ critique en tête de ce canal.

Plusieurs critères ont été proposés pour prédire la transition au streamer [5, 9, 11, 10, 17], soit fondés sur la déformation des lignes de champ par la charge d'espace formée par les ions positifs (les électrons présentant une vitesse beaucoup plus élevée que celle des ions ne forment pas une charge d'espace suffisamment localisée), soit fondés sur la taille de l'avalanche. Le critère le plus simple et le plus usité est celui basé sur la taille de l'avalanche qui s'écrit :

$$\int_0^{z_0} \bar{\alpha}(z) dz = K \quad (1.iii)$$

z_0 est la longueur critique de l'avalanche pour laquelle sa taille atteint sa valeur critique N_c et K est un coefficient dont la valeur est souvent prise égale à 18 (i.e. $K = \ln(N_c)$ avec $N_c = 10^8$). Cependant, comme Pedersen [11] l'a montré, K ne peut pas être égal à $\ln(N_c)$, c'est donc un coefficient strictement empirique.

Transition au 'Leader'

Dans certaines conditions et plus particulièrement pour les gaz très électronégatifs, le claquage observé ne s'explique ni par un mécanisme de type Townsend ni même par une formation de streamers. En effet, le claquage peut se produire pour un champ moyen bien inférieur au champ critique du gaz considéré (claquage de Townsend) mais également inférieur au champ requis pour la propagation des canaux de streamer (claquage par streamer). Un nouveau mécanisme intervient, il s'agit de la transition du streamer au leader. Cette transition est consécutive à la formation de streamers, puis à l'apparition d'un canal de décharge préférentiel (i.e. où la plus grande partie du courant de décharge s'écoule) dont la température s'élève fortement en modifiant complètement les conditions de champ critique dans ce canal. Ainsi, le mécanisme de leader fait intervenir la formation d'un canal à température élevée ($T > 1500\text{K}$) et donc hautement conducteur. L'apparition du mécanisme de leader dépend fortement de la nature du gaz. Dans l'air, ce mécanisme apparaît pour des valeurs assez élevées du produit densité - distance ($Nd > 2,4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$; soit $p \cdot d > 100 \text{ cm} \cdot \text{bar}$) alors que dans le SF_6 le seuil est beaucoup plus faible : $Nd > 2,4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$; $p \cdot d > 1 \text{ cm} \cdot \text{bar}$).

Dans la configuration d'électrodes pointe-plan, le champ dans l'espace inter-électrodes est considérablement amplifié autour de l'électrode de faible rayon de courbure, le champ est donc fortement non-uniforme. Si le champ près de cette électrode est supérieur au champ

critique, il génère l'apparition d'une avalanche électronique. Dans le même temps, le champ chute très rapidement lorsqu'on s'éloigne de la pointe pour devenir inférieure au champ critique. On a alors une décharge localisée dans la zone de champ fort et on parle d'« effet couronne ». Cependant, dans certaines conditions (pression élevée, gaz électronégatif), une décharge peut se propager dans un intervalle où le champ minimum est inférieur au champ critique et au champ de propagation du streamer. La décharge ne se propage pas de manière continue dans ce cas, mais par étapes successives [18, 19] :

- Développement d'une couronne de streamers dans la zone du champ renforcé et par concentration du courant, échauffement du gaz dans une zone réduite de la couronne qui conduit à la formation d'un premier canal de leader ;
- Un développement rapide d'une zone d'ionisation en tête de ce canal leader accompagnée d'une brève ré-illumination du canal et d'une augmentation brève (impulsion) du courant ;
- Un temps de pause τ à la fin duquel la zone d'ionisation se transforme en une nouvelle section de canal leader et crée une nouvelle zone d'ionisation en avant de la décharge.

On obtient un canal fortement conducteur qui se comporte comme une nouvelle électrode au bout de laquelle se forme un nouvel effet couronne. Par rapport au phénomène du streamer, le leader présente un canal unique qui est beaucoup plus chaud et conducteur que le streamer et au bout duquel il y a une couronne. Le champ de claquage est, alors, beaucoup plus faible (~ 5 kV/cm) que le champ critique qui caractérise le gaz.

1.1.3. Facteurs influençant la tenue diélectrique des gaz

En plus des facteurs évidents (la pression, la température, l'humidité, les impuretés, etc.) qui peuvent influencer la tenue diélectrique des gaz utilisés dans la fabrication des PSEM et CIG (Câbles à Isolation Gazeuse), l'industrie s'intéresse aux phénomènes tendant à modifier la distribution du champ électrique. Comme on l'a vu antérieurement, un champ électrique fortement divergent peut abaisser la tenue diélectrique des systèmes électriques par l'apparition de décharges localisées et par suite de phénomènes de streamers et leaders. En effet, plus le champ local est élevé par rapport au champ critique, plus facilement on peut atteindre la condition de formation du streamer (critère 1.iii). Dans les gaz faiblement électronégatifs comme l'air, le champ de propagation du streamer étant bien inférieur au

champ critique du gaz [19], la tension de claquage sera alors inférieure à la tension de Paschen. Par contre, dans les gaz très électronégatifs comme le SF₆, le champ requis pour la propagation du streamer est pratiquement égal au champ critique, l'abaissement de la tension de claquage par rapport à celui de Paschen est alors la conséquence de la formation d'un canal de leader [19].

Les électrodes

La **géométrie des électrodes** est un des facteurs qui influence le plus la tenue diélectrique d'un gaz. La forme des électrodes utilisées pour appliquer une tension sur le gaz peut être très variée, elle joue fortement sur la distribution du champ électrique dans l'espace. On distingue deux cas majeurs :

- Si le champ électrique est constant en tout point de l'espace inter-électrode, on parle d'un **champ homogène**. Les lois de l'électrostatique démontrent qu'en utilisant des électrodes de dimensions finies, un tel champ est impossible à obtenir, quelle que soit la forme des électrodes. Pourtant, il est possible de choisir des formes d'électrodes telles que le champ électrique ne présente pas une variation importante. Le coefficient d'utilisation du champ ζ représente une mesure de cette variation :

$$\zeta = \frac{E_{\text{moyen}}}{E_{\text{maximum}}} \quad (1.iv)$$

La valeur du coefficient ζ est inversement proportionnelle à la distorsion du champ électrique. Pour des valeurs comprises entre 0,5 et 1, les claquages seront produits par des mécanismes de type Townsend (et/ou streamer pour le SF₆) et on dit que le claquage est direct. Un champ électrique est dit quasi-uniforme si la valeur de son champ critique est du même ordre que celle du champ moyen de claquage.

- Lorsque le rayon de courbure d'une des électrodes est très faible (situation trouvée dans des géométries pointe/plan, fil/cylindre), le renforcement du champ électrique au niveau de l'électrode de faible rayon est très important. Le champ est alors fortement **inhomogène**. Le claquage peut intervenir soit par streamer soit par leader, suivant la pression et le type de gaz testé [20].

Le **matériau** formant l'électrode (en particulier la cathode) peut influencer la tension d'apparition des décharges par l'émission des ions positifs et des photons dans des configurations à haute pression et haute divergence du champ. Expérimentalement, pour un champ électrique uniforme, la tenue diélectrique dans le cas d'électrodes en acier inoxydable

est supérieure à celle observée avec des électrodes en cuivre, qui est elle-même plus importante que pour des électrodes en duralumin. Aucune influence n'a été observée pour des pressions inférieures à 4 bars. Néanmoins, la tension de claquage est probablement plus influencée par les couches d'oxyde et d'impuretés déposées, que du matériau de l'électrode [21].

Un autre facteur important mentionné dans la littérature est la **rugosité de la surface** des conducteurs. Les protubérances génèrent des renforcements locaux du champ électrique à des valeurs supérieures à celles du champ appliqué sans défaut. Hawley [22] définit la valeur du facteur multiplicatif du champ β : $\beta = \frac{2 \cdot h}{\omega}$, avec h la hauteur et, ω la largeur de la protubérance. Pour que la tension de claquage soit modifiée par rapport au cas d'une surface d'électrode parfaitement lisse, il faut que le champ local soit supérieur au champ critique sur une distance telle que le critère de streamer soit atteint (équation 1.iii). Ceci va donc dépendre de la forme des rugosités et de la nature du gaz. Par exemple, avec des électrodes de rugosité maximale R_{max} en champ uniforme dans le SF₆, la tension de claquage suivra la courbe de Paschen tant que le produit pR_{max} sera inférieur à 40 bar·µm [23, 24]. Dans le cas de l'air, un gaz faiblement électronégatif, l'effet des rugosités se fera sentir pour des valeurs de pR_{max} plus élevées.

Particules métalliques

Dans le processus de fabrication ou pendant le fonctionnement des systèmes électriques à isolation gazeuse, des particules métalliques peuvent être introduites dans l'intérieur du système. Généralement, ces particules sont le produit de l'usinage, leur taille pouvant être de l'ordre du millimètre, voir du centimètre. La géométrie des systèmes et la variation de la tension, ainsi que leur taille, peuvent influencer les magnitudes des forces actionnant sur les particules (la force de Coulomb, la force du gradient électrique, la force de viscosité, la force gravitationnelle [25]). Ces forces peuvent influencer l'endroit où les particules peuvent se déplacer:

- Sur la surface de l'isolant porteur, s'il y en a un (les particules étant dirigées par deux forces : la force de Coulomb et la force du gradient électrique [26]).
- Dans les zones de contact entre les isolants et les électrodes (c'est la zone qui correspond à la jonction gaz/solide isolant/électrode) à cause du renforcement du champ présent dans la région.

-
- Sur la surface de l'électrode qui présentent un renforcement du champ électrique (sur les électrodes cylindriques, par exemple). Des études [27] ont montré que les particules s'accumulent sur la surface des électrodes plus souvent dans le N_2 que dans le SF_6 .

Le renforcement du champ, donc la probabilité d'apparition des décharges partielles, est alors augmenté. La présence des particules peut réduire de manière considérable la tension de claquage du système en fonction de leur position, leur taille et de la forme de la tension appliquée. Cookson [28] a montré que les effets disruptifs, dans la géométrie coaxiale, induits par les particules (fils conducteur libres dans le système), augmentent avec leur longueur, leur densité, et diminuent avec leur diamètre.

D'autre part, un comportement très différent des particules a été observé en tension alternative par rapport à la tension continue [27]. Pour les deux types de tension, on observe des oscillations des particules entre les deux électrodes (HT et masse), mais la probabilité qu'elle touche une des électrodes est plus grande en continu qu'en alternatif. En effet, en alternatif, le temps de transit des particules libres (proportionnel au rapport entre leur charge électrique et leur masse [27]) est le plus souvent supérieur à la durée de l'alternance et les particules n'atteignent pas l'électrode opposée [29]. Néanmoins, le transit peut se produire sur une durée de plusieurs alternances [27]. En utilisant des impulsions de tension (du type onde de foudre), on réduit très fortement le temps disponible pour atteindre les électrodes et en conséquence la tension de claquage ne devrait pas être modifiée d'une façon aussi nette par leur présence comme en tension continue ou alternative.

L'industrie a trouvé des solutions (trous, rainures, fentes, coins et d'autres géométries) pour éliminer les particules des points « chauds » dans les systèmes électriques et pour les amener et les piéger dans des régions du dispositif où le champ est très faible (nul si possible), donc les rendre ineffectives [27, 30].

Une solution intéressante, mais effective qu'en certains cas particuliers a été proposée par Bortnik [31], en utilisant le principe de limiter ou retarder le déplacement de la particule par la création d'une surface collante sur la surface intérieure de l'enveloppe métallique (en utilisant une bande adhésive ou en pulvérisant directement de l'adhésif). La tension de claquage a été améliorée jusqu'à 25% par rapport à l'enveloppe non-adhésive.

Influence de la tension

Les effets de chacun des facteurs décrits précédemment sur la tension de claquage d'un système sont directement liés à la nature de la tension appliquée : alternative, continue ou

impulsionnelle. La valeur même de la tension de claquage dépend de la forme de l'onde de tension. Cookson [28] a montré que, pour une géométrie coaxiale, à haute pression, la valeur de la tension de claquage en tension négative continue - appliquée sur l'électrode de plus faible diamètre - est avec 20% inférieure à celle mesurée en tension alternative (crête), tandis que, la tension de claquage en positif est supérieure à 50-60%.

1.2. Décharges partielles

1.2.1. Définition

Dans le domaine du génie électrique, une décharge partielle (*DP*) est un amorçage électrique localisé dans la partie isolante d'un système électrique qui ne court-circuite pas entièrement l'isolation (solide ou liquide). Celles-ci apparaissent, en général, sous l'application d'une haute tension (HT).

1.2.2. Classification

Kreuger [32] classe les décharges en fonction de leur localisation (Figure 1.4) :

- Décharges internes : elles apparaissent aux endroits de l'isolant où la rigidité diélectrique est faible. Exemple : une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide.

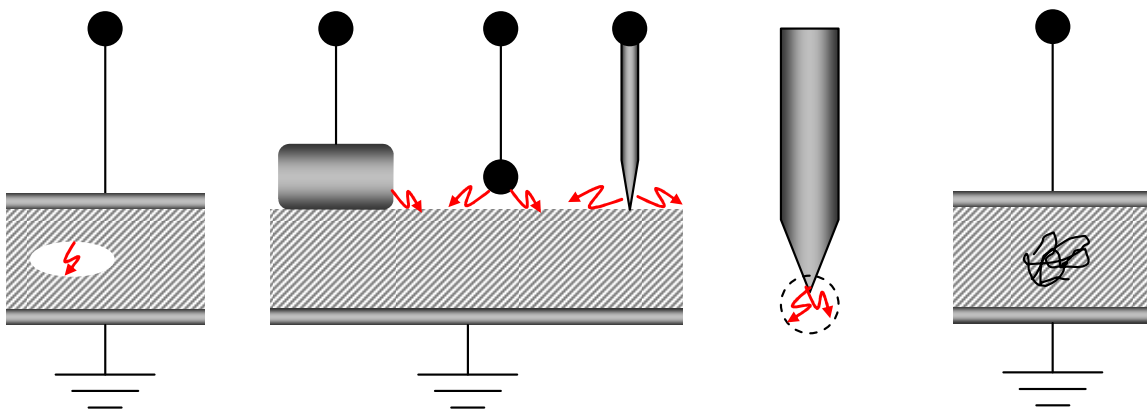


Figure 1.4. Types de décharges partielles : a) internes ; b) de surface ; c) couronne ; d) en arborescence.

-
- Décharges de surface : elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique.
 - Décharges couronne : elles prennent naissance au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone très réduite entourant la pointe.
 - Décharges en arborescence : se produisent à cause d'un défaut dans l'isolation. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices pour l'apparition d'autres DP.

Kemp [33] définit les DP plus simplement en considérant les trois types suivants : les décharges dans les cavités gazeuses, les décharges rampantes sur les surfaces isolantes et les décharges couronne sur des pointes et irrégularités conductrices.

D'après ces classifications, notre étude des PT concernera essentiellement les décharges de surface et les décharges couronne.

Chaque type de DP peut être caractérisé par la réponse donnée par divers systèmes de mesure (mesure de courants transitoires, de charge intégrée, répartition dans la phase, mesures UHF, mesures acoustiques, etc.). A l'aide de ces systèmes de mesures des « signatures » des différents types de DP peuvent être obtenues, et ceci peut aider à leur identification lors de mesures sur des systèmes réels.

1.2.3. Circuit équivalent 'à trois capacités'

Un circuit équivalent simple à trois capacités est souvent utilisé pour modéliser les DP du point de vue électrique. (Figure 1.5) [32, 34].

Les tensions et capacités représentées sur la figure sont :

- C_{PT} – la capacité de la zone où les DP apparaissent (constituée par la zone de point triple dans nos expériences).
- C_s – la capacité du diélectrique en série avec la zone de décharge.
- C_p – la capacité équivalente de l'isolant en parallèle avec C_p+C_s .
- U_{PT} – la différence de potentiel apparaissant dans le gaz dans la zone de décharge (le point triple dans nos expériences).
- U_{app} – la tension appliquée (appelée « tension apparente », car la tension réelle de décharge U_{PT} n'est généralement pas mesurable)

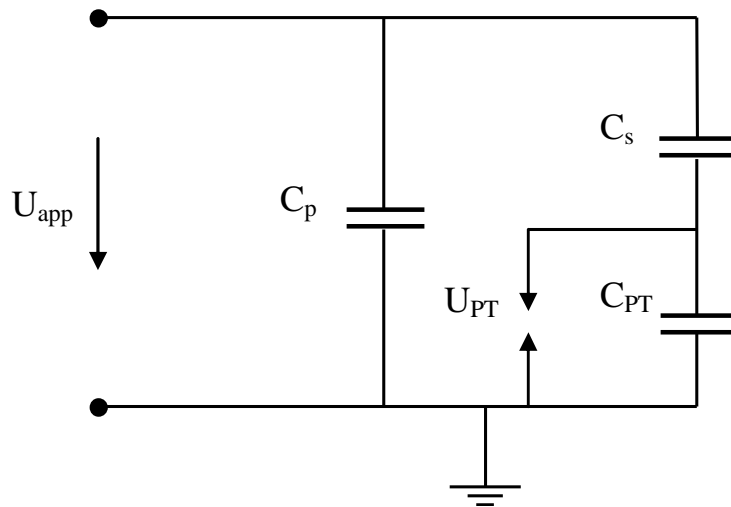


Figure 1.5. Circuit équivalent à trois capacités décrivant un matériau siège de DP.

Par un calcul de la division capacitive présente dans le circuit de la Figure 1.5 on a :

$$U_{PT} = \frac{U_{app}}{1 + \frac{d_s}{\epsilon_s d_g}} \quad (1-v)$$

avec : d_s – l'épaisseur de l'isolant placé en série avec la DP ;

ϵ_s – la permittivité de l'isolant en série avec la DP ;

d_g – l'épaisseur du gaz dans la zone de DP.

Réurrence des décharges partielles

La haute tension alternative appliquée est U_{app} (Figure 1.6). Dans l'alternance positive, lorsque la valeur instantanée de la tension U_{PT} dans la zone de DP dépasse une certaine valeur critique U_i^+ (tension d'ignition correspondant à la tension de Paschen dans le cas d'une cavité gazeuse), une DP apparaît. Des charges électriques générées par la DP sont déposées sur les parois jusqu'à ce que U_{PT} chute jusqu'à une valeur d'extinction U_e^+ à laquelle la décharge s'arrête. Cette chute de tension a lieu en un temps très court (quelques nanosecondes) par rapport à la période de la tension sinusoïdale appliquée (50 Hz). Ensuite, la tension sur la cavité augmente de nouveau, et lorsque elle remonte à la valeur U_i^+ une nouvelle décharge se produit. Ceci se répète jusqu'à ce que la haute tension U_{app} commence à décroître ($\varphi = 90^\circ$). Le même phénomène se produit dans l'alternance négative avec U_i^- et U_e^- (l'arrêt des décharges se produit à $\varphi = 270^\circ$). A chaque chute de tension sur C_{PT} correspond le passage d'une impulsion de courant de durée équivalente (quelques ns) dans les capacités en série

avec C_{PT} . La circulation de ce courant produit à son tour une chute de tension instantanée aux bornes de la « cellule » composée des trois capacités.

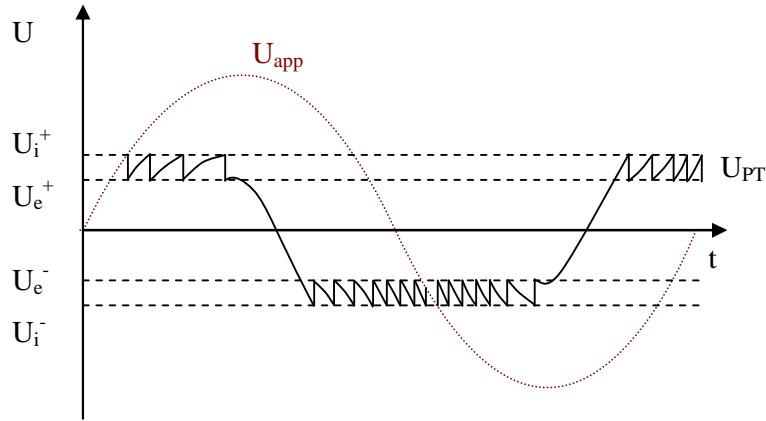


Figure 1.6. Récurrence des décharges partielles

1.2.4. Charge apparente

La chute de tension aux bornes de la « cellule » à trois capacités introduit à son tour l'apparition d'un mouvement de charges q_{app} dans le circuit extérieur à la cellule (alimentation électrique), dont le rôle est de maintenir U_{app} constante. Cette charge, transférée par le circuit extérieur afin de maintenir constante la tension aux bornes de la cellule, est mesurable et appelée « charge apparente ». Notons que la charge apparente est inférieure à la charge q_r qui transite réellement dans la capacité C_{PT} (« charge réelle »), mais qui ne peut pas être mesurée directement. La charge apparente est affectée par la géométrie des électrodes, les propriétés intrinsèques du matériau, ainsi que par toutes les capacités parasites autour du montage de mesure.

Dans le cas du schéma équivalent à trois capacités (Figure 1.5), on peut écrire :

$$q_r = (U_i - U_e) \left(C_{PT} + \frac{C_s \cdot C_p}{C_s + C_p} \right) \quad (1-vi)$$

$$q_{app} = q_r \left(\frac{C_s \cdot C_p}{C_s + C_p} \right) \quad (1-vii)$$

La charge apparente est la seule quantité de charge mesurable par la mesure électrique. Il est possible de calculer la charge réelle correspondante uniquement si les capacités C_s et C_{PT} sont parfaitement connues. Ceci n'est généralement pas le cas, en particulier dans les dispositifs

expérimentaux qui seront utilisés dans cette étude pour reproduire une géométrie de point triple. Ceci limite par conséquent l'analyse quantitative des phénomènes, en particulier la détermination des conditions locales réellement présentes au niveau du point triple (tension d'amorçage U_i et d'extinction U_e , charge réelle transférée, etc.). Les valeurs des DP indiquées dans les résultats expérimentaux qui suivront correspondent aux valeurs de la charge apparente.

1.2.5. Effets des DP

La présence de DP constitue un mécanisme de dégradation, et leur détection constitue une méthode de diagnostic très utilisée. L'effet des DP est variable selon leur intensité et le milieu où elles se déroulent. La décharge partielle est souvent accompagnée d'une génération de gaz (formation de cavités dans le solide), de nouvelles espèces atomiques et moléculaires excitées, de radicaux qui peuvent générer à leur tour des acides attaquant les matériaux. Elles produisent également une érosion mécanique, une carbonisation des surfaces par bombardement d'ions, une élévation de température très localisée. Ces effets engendrent une dégradation irréversible des matériaux diélectriques, en particulier dans le cas des solides, et donc une diminution de la durée de vie de l'ensemble du système électrique.

1.3. Le point triple (ou jonction triple)

Un point triple (PT), également souvent appelé jonction triple, est constitué aux endroits où trois matériaux différents sont présents, souvent à la jonction gaz/solide isolant/électrode. Les points triples constituent souvent un point faible de l'isolation, où le renforcement localisé du champ électrique dans le matériau le plus « faible » (le gaz) peut induire l'apparition des décharges partielles.

Dans les PSEM et les CIG, les électrodes HT coaxiales doivent être soutenues par des supports isolants. Au point de contact entre une électrode métallique (l'électrode HT ou la masse - Figure 1.7), le solide isolant et le gaz, des points triples apparaissent. La distribution du champ électrique près de cette interface de contact dépend de la géométrie et de la permittivité des matériaux (Figure 1.8), et se traduit souvent par un renforcement du champ

dans le milieu dont la permittivité est la plus faible (le gaz), qui présente malheureusement également une tenue diélectrique inférieure à celle des solides isolants.

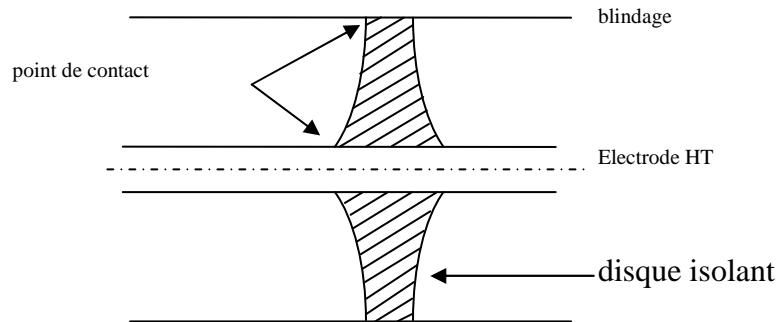


Figure 1.7. Exemple de points (ou jonctions) triples : le disque de support dans un PSEM.

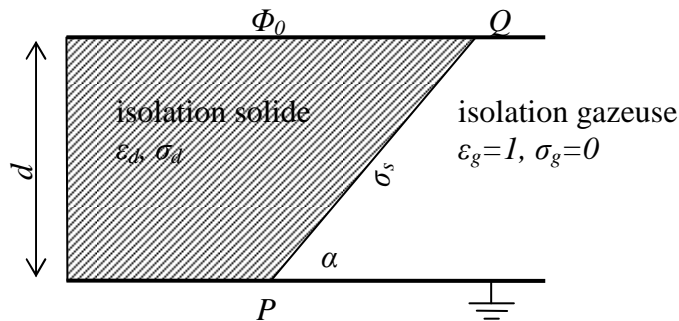


Figure 1.8. Schéma 2D utilisée dans les calculs d'un point triple [35].

Φ_0 – différence de potentiel entre les électrodes ; ϵ_d – permittivité du solide isolant ; σ_d – conductivité volumique de l'isolant ; σ_s – conductivité surfacique de l'isolant.

La Figure 1.9 représente la géométrie de point triple que nous utiliserons lors des expériences. Nous avons également porté sur ce schéma les capacités du circuit équivalent de DP (figure 1.5), qui restent pratiquement impossibles à déterminer, étant donné qu'elles dépendent de la position des DP, et de leur surface d'impact sur l'isolant solide.

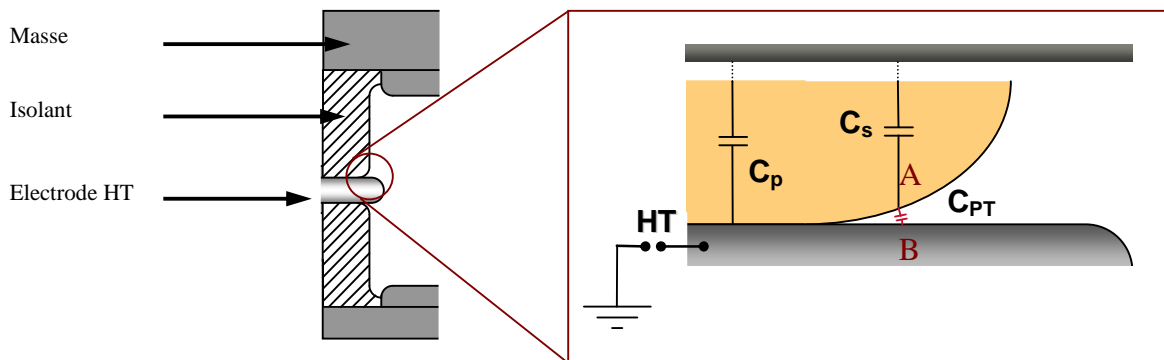


Figure 1.9. Représentation schématique de la zone du PT de la cellule d'essai.

1.3.1. Calculs du champ électrique

Quand la valeur de l'angle de contact est supérieure à 0 et inférieure à $\pi/2$ (mais pas égale), le champ électrique dans le point de contact A est infini ou égal à 0 dans le cas théorique où la conductivité de l'isolateur est nulle. Cette singularité du champ électrique a été analysée par Tagaki par la méthode de la transformation conforme [35]. Pour les isolateurs parfaits, plusieurs études numériques ont été amenées [36], [37], [38] pour caractériser la distribution du champ dans la zone du PT. Tout d'abord, la distribution du champ électrique est représentée dans la Figure 1.10 pour la configuration montrée dans la Figure 1.8, en négligeant la conduction volumique et celle de surface ($\sigma_d=0$; $\sigma_s=0$)

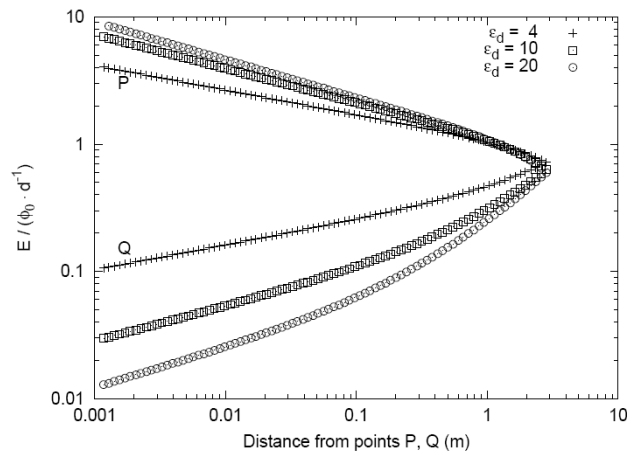


Figure 1.10. Distribution du champ électrique sur la surface de l'isolant (côté isolant) en variant la permittivité ϵ_d [35]

Pourtant, les isolateurs sont loin d'être parfaits, la conductivité volumique n'est pas nulle. En plus, la conductivité de surface peut apparaître à cause de la pollution du gaz et la présence de l'humidité ou des particules. Les calculs ramenés en [38], [39] et [35] montrent que la présence de la conductivité volumique augmente la singularité du champ électrique (Figure 1.11a) pendant que la conductivité de surface prévient que le champ soit nul ou infini dans le point de contact (Figure 1.11b).

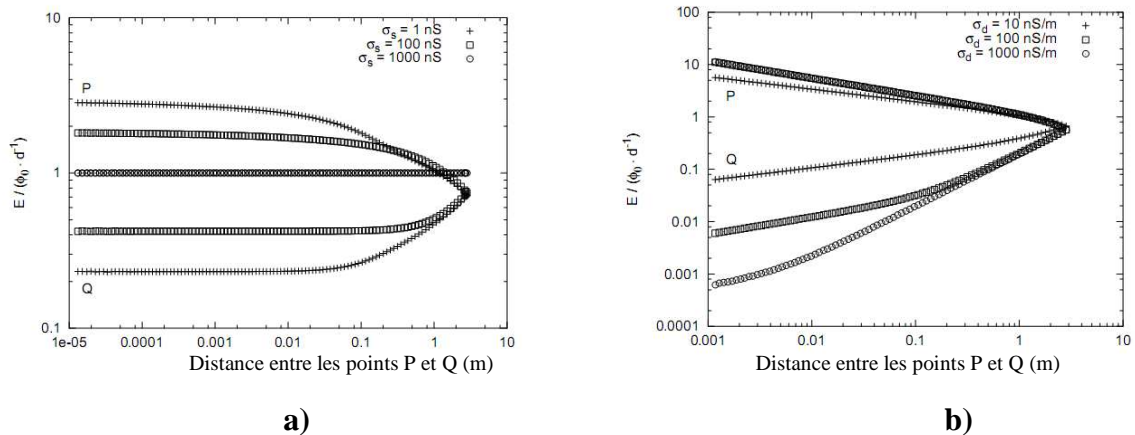


Figure 1.11. Distribution du champ électrique sur la surface de l'isolant (côté isolant) en variant a) la conductivité volumique ou b) la conductivité de surface [35].

1.3.2. Calculs de la tension d'apparition des DP's

Méthode conventionnelle

Habituellement, la condition de décharge dans le voisinage du PT se base sur le critère de décharge de Townsend :

$$\int_0^d \bar{\alpha} dx \geq K (\approx 20)$$

Dans cette méthode conventionnelle, trois difficultés apparaissent [40] :

- La valeur du champ électrique dans le gaz, près du PT est élevée. Pour ces valeurs il n'existe pas de données expérimentales de $\bar{\alpha}/p = f(E/p)$, où E est le champ électrique et p est la pression. Des extrapolations doivent être réalisées à partir des valeurs du champ inférieures.
- le choix de la valeur de constante K est empirique (≈ 20 , proposé par Reather, Meek and Loeb, mais, ensuite, Davies [6] et Pedersen [41] ont proposé d'autres algorithmes de calcul de ce critère de claquage). Il varie, donc, en fonction des auteurs.
- à chaque pression, quand on varie la tension appliquée (c'est-à-dire le champ dans la zone étudiée), le calcul doit être refait.

Méthode de la tension de Paschen

Dans le but d'éviter ces difficultés, nous utilisons une méthode de simulation légèrement différente afin de prédire le seuil de la tension de décharge ainsi que l'emplacement de décharge.

Cette méthode est particulièrement adaptée pour l'étude des DP, puisque dans la zone autour du PT, le champ électrique le long de chaque ligne de champ est quasi-uniforme. Le champ électrique sera calculé à l'aide des logiciels de calcul de champ (FEMM ou QuickField) et les tensions d'apparition de la première DP et la position de cette DP seront calculées à l'aide de la courbe de Paschen. Les de la méthode conventionnelle de calcul de la tension d'apparition des DP sont contournés. La valeur du K n'est pas nécessaire. Une fois qu'une courbe $E(x)$ (distribution du champ en fonction de la distance par rapport au PT) est calculée pour une géométrie, nous pouvons l'utiliser pour n'importe quel gaz.

Les détails de cette méthode seront détaillés dans le Chapitre 3.3 de cette étude.

1.4. Travaux entrepris dans cette thèse

Les nombreuses études réalisées auparavant ont permis une description précise des mécanismes de claquages dans les gaz. Néanmoins, dans des géométries qui impliquent aussi un isolant solide (comme c'est le cas dans la majorité des applications industrielles) les phénomènes deviennent difficiles à prédire, en particulier quand des charges peuvent apparaître sur la surface des isolants [42, 43]. De plus, si la géométrie est complexe (ce qui est le cas des isolants dans les PSEM qui présentent des courbures), le problème est encore plus compliqué. Comme nous l'avons déjà dit, il devient très difficile d'évaluer le rapport entre les charges apparentes mesurées et les charges réelles, ainsi que la quantité de charge déposée sur l'isolant et sa surface d'impact. Pour ces raisons, nous avons privilégié une approche expérimentale pour caractériser et analyser ces phénomènes.

Une cellule d'essai très haute tension sera réalisée pour simuler un point triple sur l'électrode centrale d'un PSEM (**Chapitre 2**). En tenant compte de la littérature sur les différents problèmes et les supports isolants utilisés dans les PSEM, nous caractériserons les décharges partielles en premier lieu dans le SF_6 à différentes pressions, et également dans l'air sec pour comparaison. Un problème important qui n'a pas été traité dans la littérature est la

caractérisation des DP sous ondes impulsionnelles de tension (en particulier le choc de foudre $1/50\mu\text{s}$ qui est l'onde qui détermine le dimensionnement de l'appareillage blindé). En effet, ce type de mesure est impossible à réaliser par mesure électrique conventionnelle, surtout si on veut détecter des décharges de faibles amplitudes (quelques pC). Nous proposerons une méthode de détection optique de grande sensibilité, qui sera calibrée par des mesures sous tension alternative. Celle-ci permettra de détecter et d'estimer l'amplitude des DP, quelle que soit la forme d'onde appliquée (**Chapitre 3**).

Nous proposerons dans les chapitres qui suivront une méthode de calcul des tensions d'apparition des DP au voisinage du PT. La vérification de cette méthode a déjà été réalisée dans des géométries plus simples que la notre [40]. Nous la vérifierons également pour une géométrie simple, dans un champ quasi-uniforme (**Chapitre 5**).

Les matériaux isolants industriels utilisés dans les essais n'ont pas été analysés dans la littérature (en particulier la résine époxy chargée alumine). Nous réaliserons des mesures du temps de décharge des isolants utilisés par la méthode du déclin du potentiel, pour ensuite pouvoir évaluer le comportement des charges déposées par les DP sur leur surface (**Chapitre 6**). Pour les matériaux connus (cas du PMMA) nous prendrons des mesures réalisées auparavant dans la littérature.

Le problème des particules conductrices libres de se déplacer dans un système soumis à la haute tension a été traité largement depuis l'apparition des PSEM. Ce problème est très important du point de vue industriel. Nous étudierons en détail le cas critique pour les applications (selon la littérature [44]) d'une particule métallique localisée à proximité d'un point triple (**Chapitre 4**). Celle-ci vient rendre encore plus complexe l'analyse des phénomènes de décharge.

2. Méthodes expérimentales

Le but de ce chapitre est de décrire les dispositifs, les matériaux et les méthodes utilisées dans le travail de thèse. Les expériences ont été effectuées à l'aide de deux types de cellules. Tout d'abord nous avons utilisé une cellule modèle appelée cellule AREVA où le renforcement du champ dans la région de l'interface triple a été maximisé. Puis, nous avons utilisé une cellule comportant une zone de champ quasi-uniforme sur une distance faible ($<1\text{mm}$) entre un isolant solide et une électrode afin de mesurer précisément les seuils d'apparition des décharges à barrière diélectrique.

2.1. Cellule d'essai « AREVA »

Cette cellule d'essai a été construite par AREVA T&D Aix-les-Bains pour l'étude de l'interface triple des postes blindés effectuée par Chau Tran Duy dans le cadre d'un stage de Master II [45]. La cellule reprend la structure coaxiale classique d'un poste blindé mais avec le choix de maximiser le renforcement du champ dans la région du point triple (Figure 2.1).

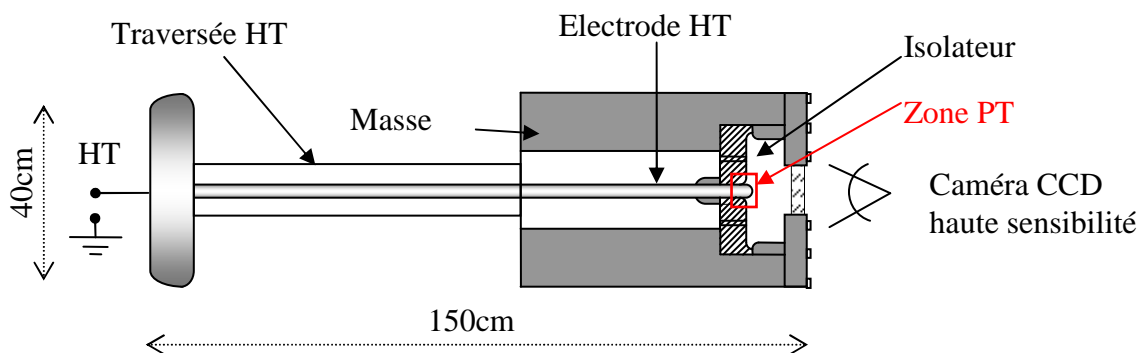


Figure 2.1. Schéma de la cellule d'essai AREVA

La région du point triple (PT) correspond à la zone de raccordement entre l'électrode haute tension, le support isolant et le gaz. L'apparition des décharges partielles dans la région du PT est ainsi facilitée et leur étude pourra s'effectuer en fonction de différents paramètres (tension appliquée, nature et pression du gaz). La cellule comporte également une fenêtre optique placée en face de la région du PT (Figure 2.1). Les décharges partielles pourront ainsi être

simultanément détectées et analysées par des méthodes électriques et optiques (visualisation et photomultiplicateur).

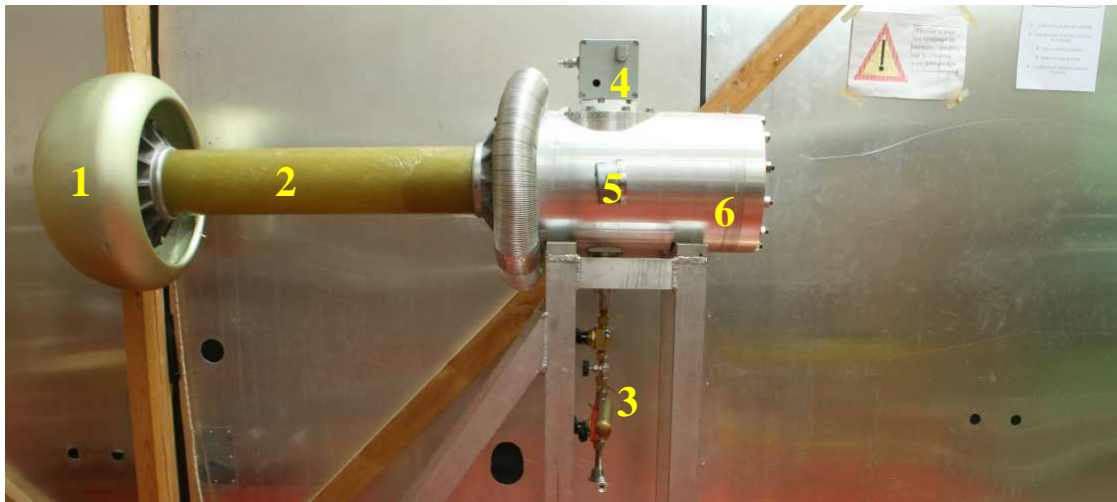


Figure 2.2. Photographie de la cellule d'essai AREVA

1. Bloc de connexion avec l'alimentation HT ;
2. Traversée HT ;
3. Alimentation gaz ;
4. Bloc de mesure DPs ;
5. Indicateur pression ;
6. Cellule d'essai.

La cellule a été construite de telle manière qu'elle ne génère pas de décharges partielles ailleurs que dans la région du PT et ceci jusqu'à la tension de claquage finale entre les deux électrodes.

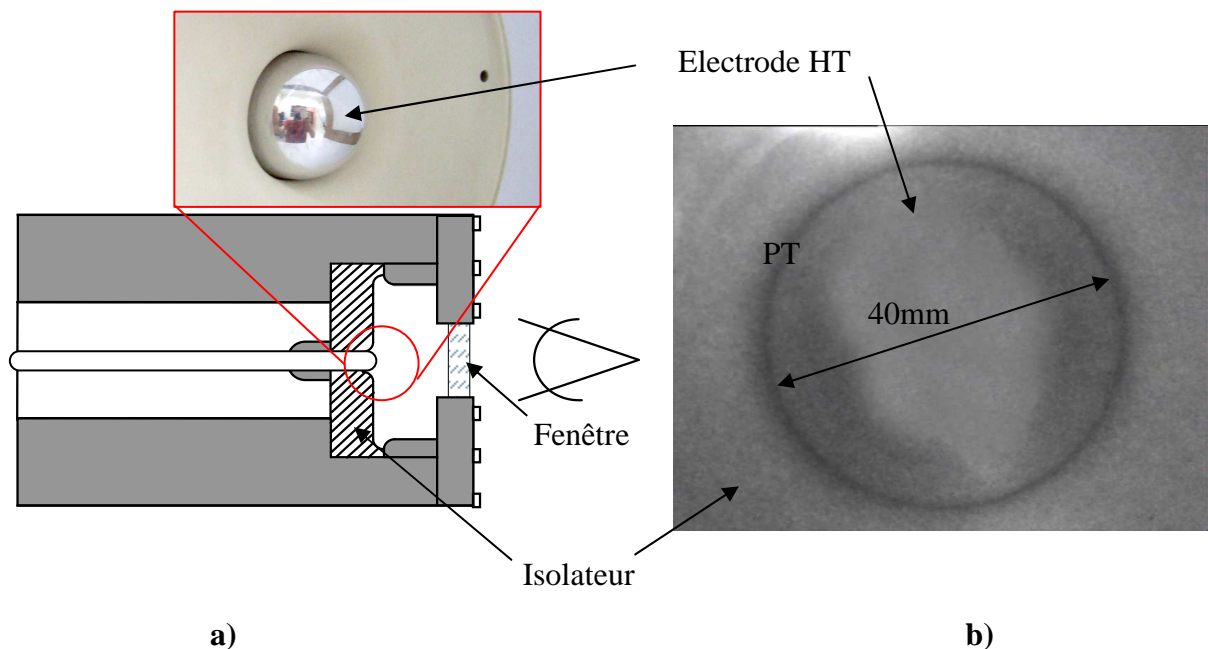


Figure 2.3. Détails de la zone du PT.

- a) Photographie de la zone du PT ;
- b) Image de la zone du PT obtenue avec la caméra CCD.

Cette condition impose une taille importante de la cellule par rapport à la zone du PT étudiée : ~1,5m en longueur, ~40 cm en diamètre avec un volume de gaz total d'environ 20 litres (Figure 2.2). Ce grand volume corrélé avec la taille réduite de la zone du PT (4 cm en diamètre), où les DP ont lieu, permet d'utiliser le même gaz pour plusieurs essais. On considère que le gaz n'est pas contaminé par les éventuels produits de décomposition qui peuvent se former suite aux décharges partielles et claquages.

La pression nominale calculée de la cellule est de 8,2 bar et la pression d'épreuve hydraulique communiquée par le constructeur est de 12 bar.

La zone du PT (Figure 2.3a) peut être visualisée par une caméra haute-sensibilité ou par un photomultiplicateur grâce à la fenêtre posée perpendiculairement sur l'axe de l'électrode HT (Figure 2.3b).

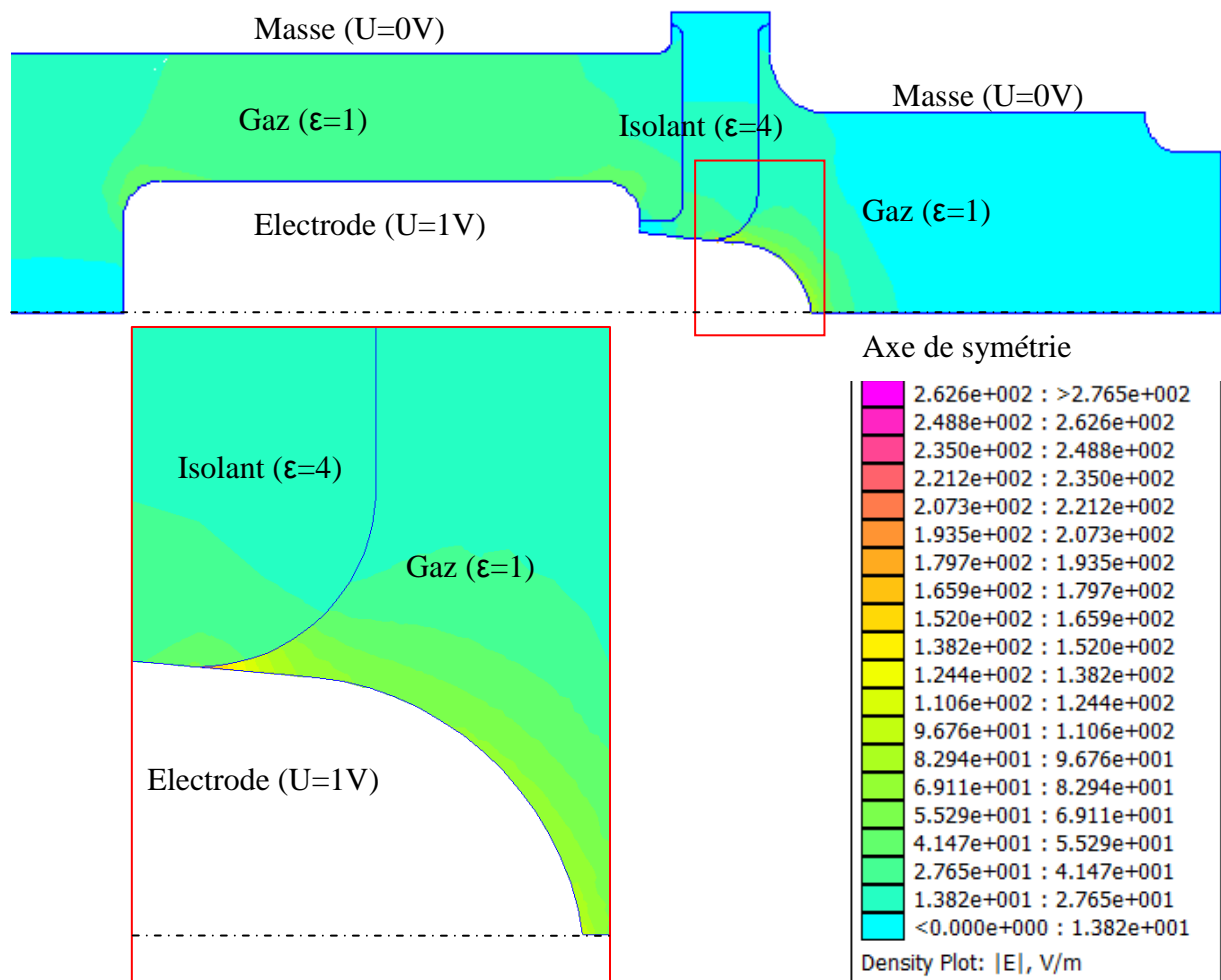


Figure 2.4. Résultat de la simulation des zones de champ renforcé pour l'ensemble de la cellule « AREVA » comprenant la géométrie PT. Détail de la zone du PT.

La simulation de la géométrie réalisée avec le logiciel FEMM montre que la zone du PT est la seule où le renforcement du champ électrique dépasse 100 V/m pour 1 V appliqué sur l'électrode (Figure 2.6).

2.2. Cellule à champ électrique quasi-uniforme

La cellule AREVA décrite précédemment a été modifiée afin d'obtenir une région de champ électrique quasi-uniforme dans un gaz (SF_6 ou air sec), entre un isolant en plexiglas (polyméthacrylate de méthyle - PMMA) de 5 mm d'épaisseur et une électrode métallique. Les décharges à barrière diélectrique se produiront alors dans l'espace rempli de gaz situé entre le plexiglas et l'électrode. Un schéma de cette modification est montré sur la Figure 2.5. Ce nouveau dispositif est introduit dans la cellule AREVA pour faire les essais.

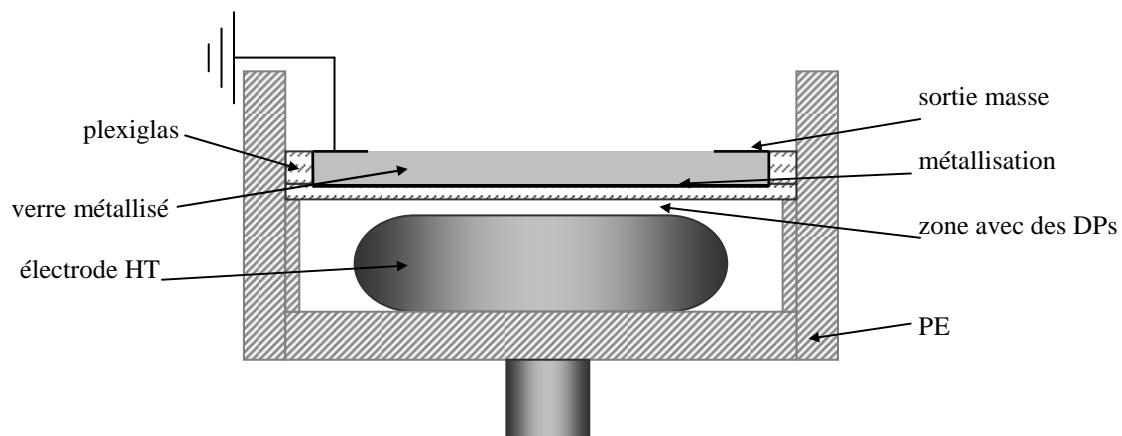


Figure 2.5. Schéma simplifié du nouveau dispositif pour étudier les décharges à barrière diélectrique dans un champ électrique quasi-uniforme

Une étude de la distribution du champ électrique pour cette nouvelle configuration (ancienne cellule + nouveau dispositif) a été effectuée avec QuickField pour déterminer les zones de renforcement du champ. Sur la Figure 2.6 est montré le résultat pour l'ensemble de la cellule. On observe que la zone de champ renforcé se trouve uniquement dans l'espace voulu (électrode-plexiglas).

Pourtant, au niveau des bords de l'électrode métallique, une variation du champ est observée dans le plan parallèle à la barrière diélectrique. Dans un premier temps la courbure de l'électrode, marquée sur la même figure en rouge, a été considérée comme un quart de cercle avec un rayon de 4 mm.

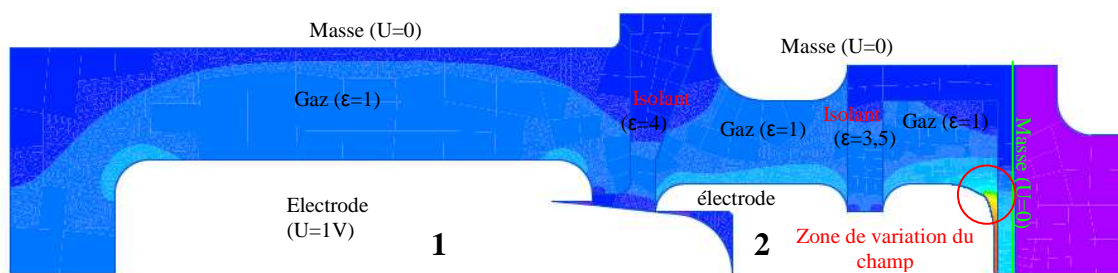


Figure 2.6. Résultat de la simulation des zones de champ renforcé pour l'ensemble de la cellule
1. Ancienne cellule ; 2. Nouveau dispositif

La variation importante de la valeur du champ sur l'axe vertical est montrée sur la Figure 2.7

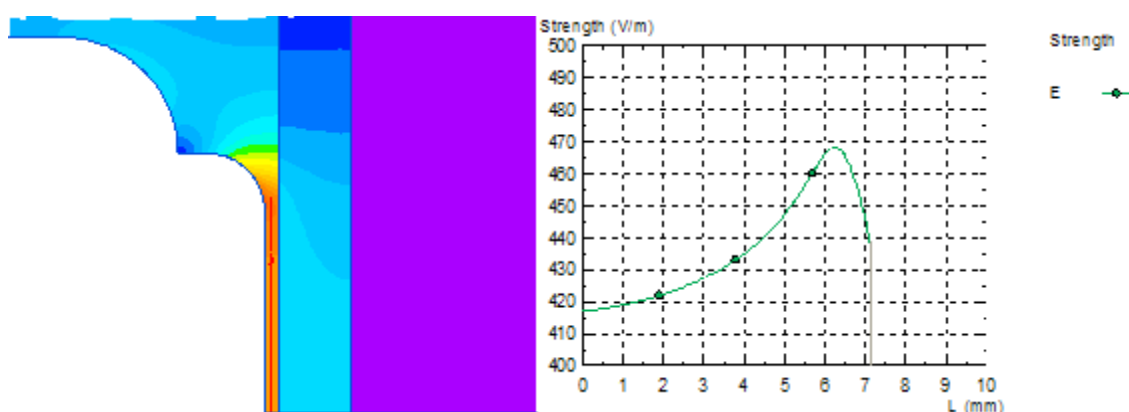


Figure 2.7. Répartition du champ électrique dans le cas d'une courbure ronde

A mi-distance entre l'électrode et l'isolant, le champ électrique varie de 417V/m au centre de l'électrode jusqu'à 468V/m au point de connexion entre la forme ronde et la ligne, ceci pour 1V appliqué. La variation relative du champ est donc de 12,2%. Ce renforcement pourrait favoriser l'apparition des DPs dans cette zone.

Plusieurs contours de ce point critique ont été étudiés pour essayer de minimiser le renforcement du champ en ce point. Sur la Figure 2.8, le cercle a été remplacé par une ellipse. Le champ maximal est descendu à 442 V/m et la variation relative à 6%.

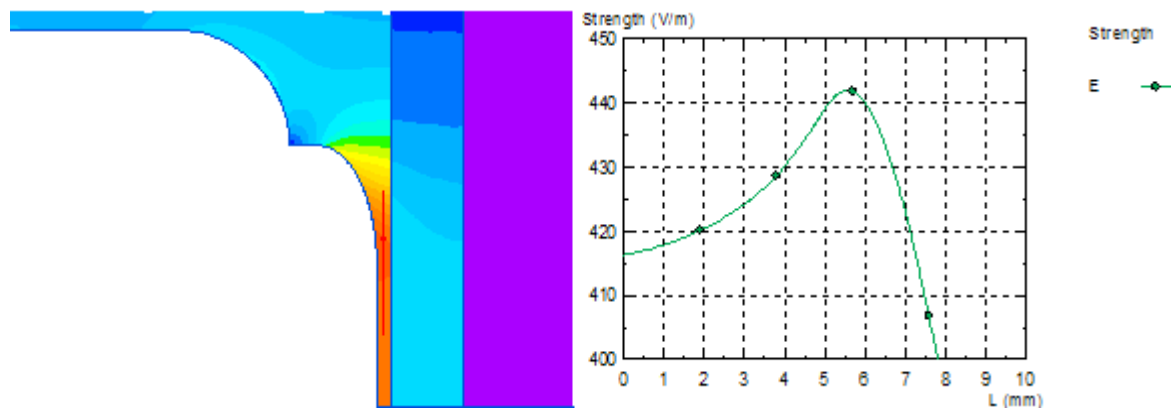


Figure 2.8. Répartition du champ électrique dans le cas d'une courbure ellipsoïdale

Dans le dernier cas, montré sur la Figure 2.9, la valeur de la longueur du demi-grand axe a été doublée. Le champ maximal est alors de 428V/m et la variation relative du champ est de 2,6%.

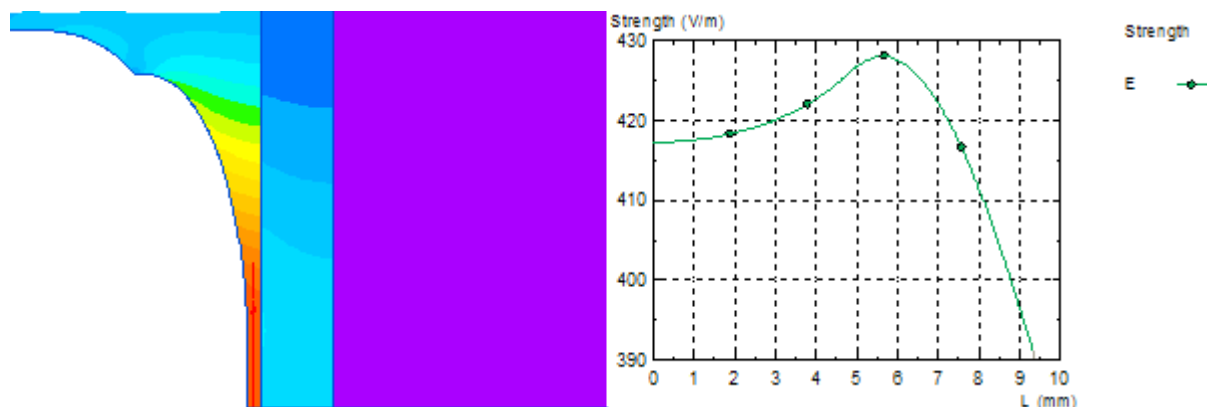


Figure 2.9. Répartition du champ électrique dans le cas d'une courbure ellipsoïdale

Les variations théoriques obtenues ne sont pas compatibles avec l'affirmation d'une distribution quasi-uniforme du champ électrique entre l'électrode HT et la plaque en plexiglas. La littérature propose les profils Rogowski [46] et les profils Bruce [47]. Cependant comme il est très difficile d'envisager l'usinage de l'électrode HT avec ces profils, nous avons utilisé une version simplifiée de ces profils, soit un profil super ellipse hybride avec l'équation :

$$\left(\frac{x}{20}\right)^3 + \left(\frac{y}{10}\right)^2 = 1$$

Le schéma final de la modification de la cellule d'essai est présenté sur la Figure 2.5.

La fixation du verre métallisé sur la pièce en plexiglas est réalisée à l'aide d'un gel silicone. Le plexiglas enduit sur une face d'une couche de gel silicone est mis sous vide pour éliminer les bulles de gaz éventuellement présentes dans le gel, puis le verre est déposé sur ce gel. Même avec ce protocole, après un certain temps passé à la pression atmosphérique, plusieurs bulles de gaz apparaissent entre la métallisation du verre et le plexiglas (Figure 2.10, détail). Les bulles disparaissent aux pressions supérieures à 3,5 bars. Quoi qu'il en soit, les tests effectués ultérieurement montrent qu'il n'y a pas de DP's dans cette zone.

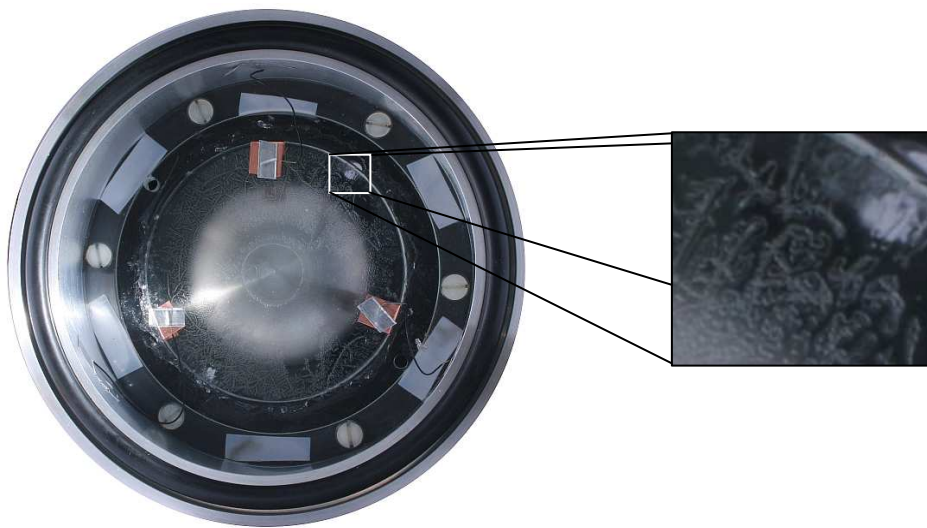


Figure 2.10. Vue de face de la cellule de mesure (champ électrique quasi-uniforme) ; détail montrant les bulles de gaz apparaissant entre la métallisation et le plexiglas.

2.3. Essais en tension alternative

L'ensemble du dispositif de mesure des DP's apparaissant en tension alternative est montré sur la Figure 2.11. Il est composé de trois blocs fonctionnels:

- Système d'alimentation
- Système de détection et mesure électrique des décharges partielles
- Système optique

2.3.1. Système d'alimentation

La source d'alimentation est un transformateur à deux étages 220 V / 220 kV. La commande se réalise grâce à un panneau de commande situé à l'extérieur de la cage de Faraday. La

valeur maximale des DP's produites dans ce bloc isolé est d'environ 4pC pour la tension de 220 kV RMS appliquée (Figure 2.12b).

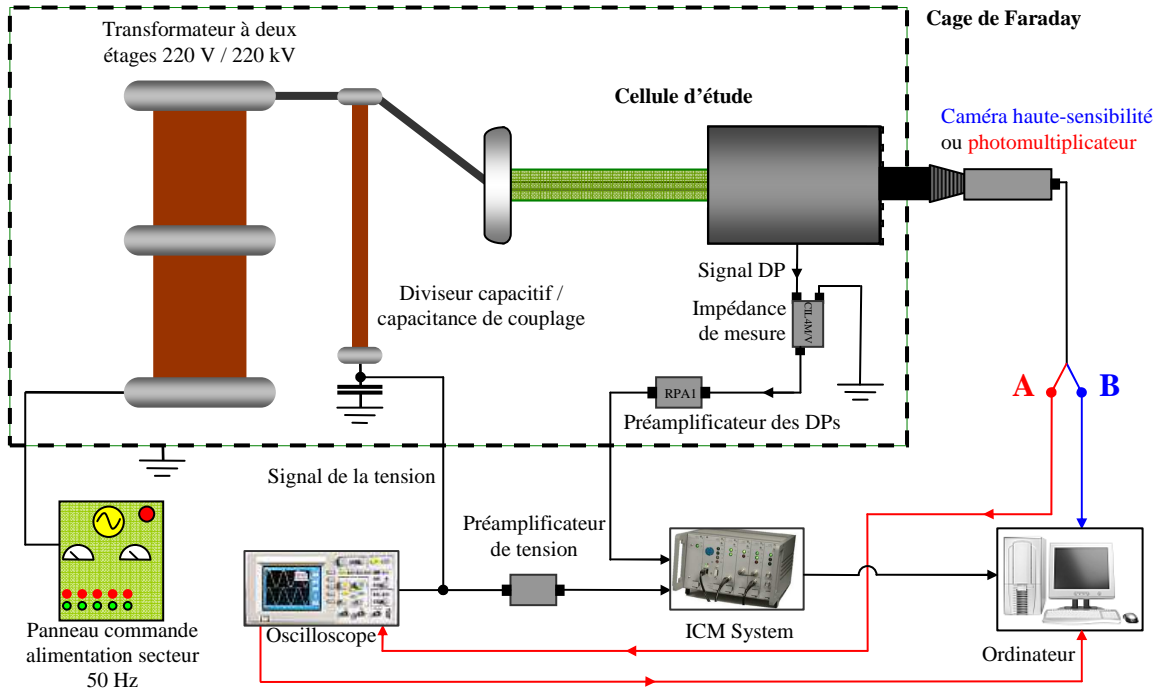


Figure 2.11. Schéma de détection, mesure et visualisation des DP's en tension alternative.

A. Système avec photomultiplicateur ; B. Système avec caméra haute-sensibilité

Dans nos essais, la valeur la plus élevée de tension que nous avons atteinte étant de 140 kV RMS (200 kV crête), le niveau du bruit ne dépasse jamais 1 pC (Figure 2.12a). La mesure de la tension appliquée peut se réaliser par deux méthodes :

- lecture de la tension appliquée au primaire du transformateur, sur le panneau de commande, et prise en compte du facteur de transformation du transformateur ;
- à l'aide d'un oscilloscope à partir d'un diviseur capacitif $1/10^4$ comme indiqué dans la Figure 2.11.

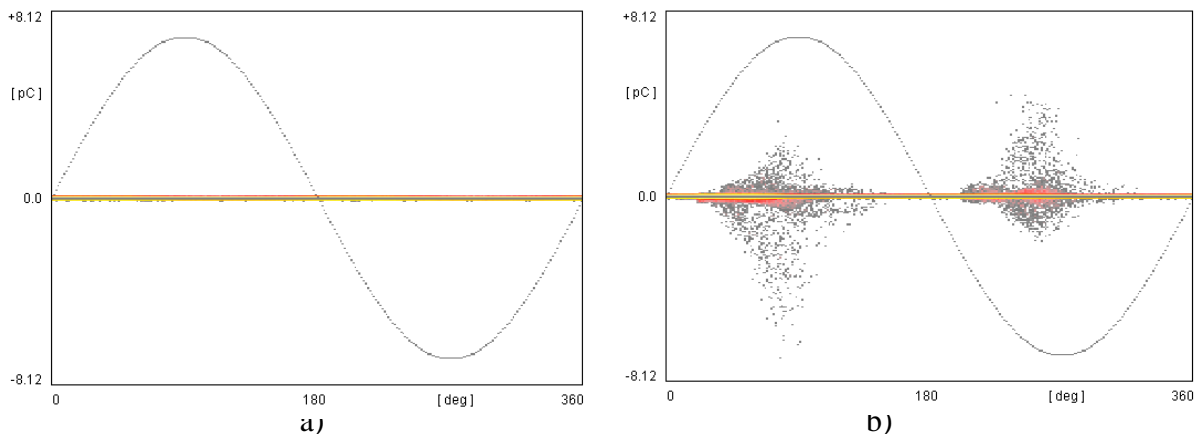


Figure 2.12. Etude du bruit dans le circuit d'alimentation HT pour 2 tensions différentes.

a) bruit à 140kV RMS b. bruit à 220kV RMS

2.3.2. Détection et mesure électrique des décharges partielles

Comme indiqué dans le premier chapitre, une décharge partielle produite dans la zone du point triple génère dans le circuit extérieur un courant associé à une charge apparente q_a . Ce courant est mesuré à l'aide d'une impédance de mesure en configuration de quadripôle comme indiqué dans la Figure 2.13 [48].

Le rôle de l'impédance $R_1 || L_1$ est d'éliminer les composants basse fréquence du courant à 50 Hz ; dans le même temps, les oscillations apparaissant dans le circuit sont rapidement amorties dans la résistance R_1 .

Le signal est ensuite transmis au préamplificateur RPA1 dont les valeurs de la distorsion et du bruit sont faibles [48]. Avant d'être capté, stocké et interprété automatiquement par l'ICM System, ce signal est de nouveau amplifié par un amplificateur intégré dans l'appareillage.

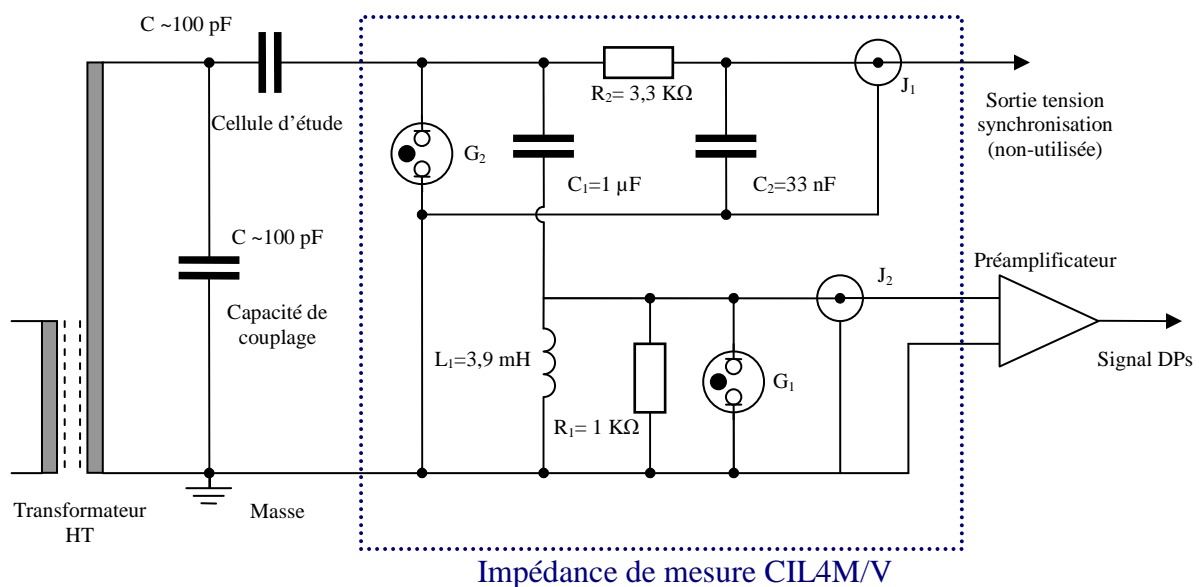


Figure 2.13. Schéma électrique de la mesure des décharges partielles en utilisant une impédance de mesure CIL4M/V ; G_1 , G_2 – éclateurs 90 V et 250 V ;

Le ICM System est un détecteur de décharges partielles, modulaire, entièrement commandé par l'ordinateur dont toutes les commandes et affichages sont accessibles à l'aide d'une interface graphique.

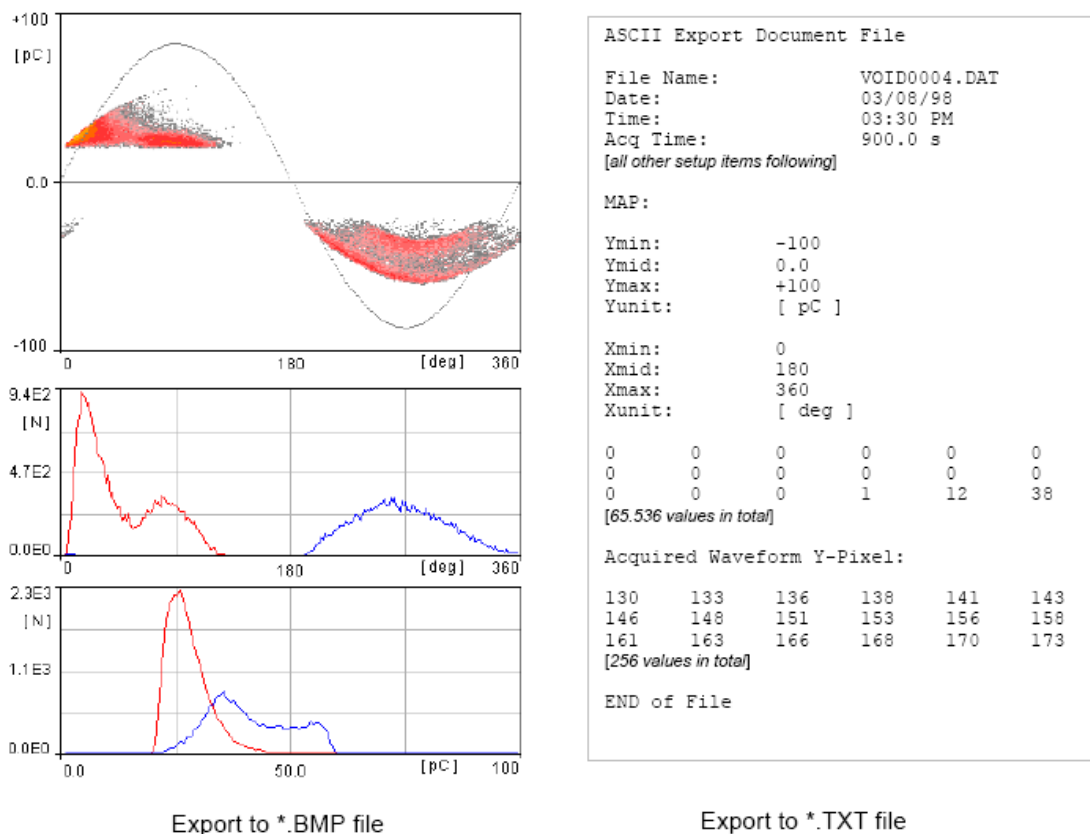


Figure 2.14. Exemple de données fournies par l'ICM System

Les valeurs de l'amplitude et de la position en phase avec la tension appliquée des impulsions de décharge partielle sont acquises. Ensuite, ces valeurs sont stockées et représentées sous la forme d'un graphique 3D comme montré sur la Figure 2.14.

Le gradient de couleur, comme troisième dimension, représente la fréquence d'occurrence des DPs d'une valeur et d'une phase données. D'autres représentations sont possibles, mettant par exemple, l'accent sur le nombre des DPs pour chaque angle de la tension sinusoïdale appliquée.

Le logiciel de gestion de l'ICM system contient toutes les fonctions nécessaires pour commander l'instrument, éditer les paramètres d'installation pour acquérir des données et pour visualiser les résultats.

Quand l'amplitude des décharges mesurées varie, il y a trois paramètres principaux qui doivent être réglés pour obtenir une détection optimale des DPs :

- **les gains des deux amplificateurs ;**

A cause de la variation de l'amplitude des décharges, les gains des amplificateurs (préamplificateur et amplificateur intégré dans l'ICM System) doivent être modifiés. Ils sont abaissés lorsque l'amplitude des décharges sature l'échelle de mesure utilisée.

-
- **le seuil de déclenchement de l'acquisition** (LLD : *low level discriminator*) ;

Le LLD est le seuil minimum de la valeur de l'amplitude du signal de décharge pour déclencher l'acquisition.

- **le temps d'attente** (*dead time*) du système pour effectuer l'acquisition ;

En dépassant le seuil du LLD, une impulsion électrique dans le circuit est considérée comme une décharge et le système se bloque pendant un temps mort qu'on a choisi pour la traiter et l'enregistrer. Pour éviter les erreurs de mesure, les deux paramètres doivent être réglés d'une façon cohérente l'un par rapport à l'autre. Pour de faibles décharges, le LLD doit être réglé juste au-dessus du bruit fond ; tandis que pour de grandes décharges, il est réglé au niveau le plus faible possible pour détecter toutes les décharges quelle que soit leur amplitude. A un LLD donné, un temps d'attente trop court provoque l'enregistrement du signal résiduel d'une décharge tandis qu'un temps d'attente trop long risque de faire perdre des signaux de décharges. Quelques cas possibles qui peuvent apparaître dans les expériences sont montrés et expliqués dans la Figure 2.15 A-E.

Si les cas A-D de la Figure 2.15 sont facilement évités par un bon choix du LLD et du temps d'attente, le cas E, où la fréquence de l'apparition des DPs est plus grande que la durée du temps d'attente, ne peut pas être contourné. Dans les conditions qui facilitent l'apparition des DPs (utilisation de l'air et/ou à faible pression) et pour des acquisitions de longue durée, des signatures de décharges, inversées par rapport à la tension appliquée, peuvent apparaître (Figure 2.16).

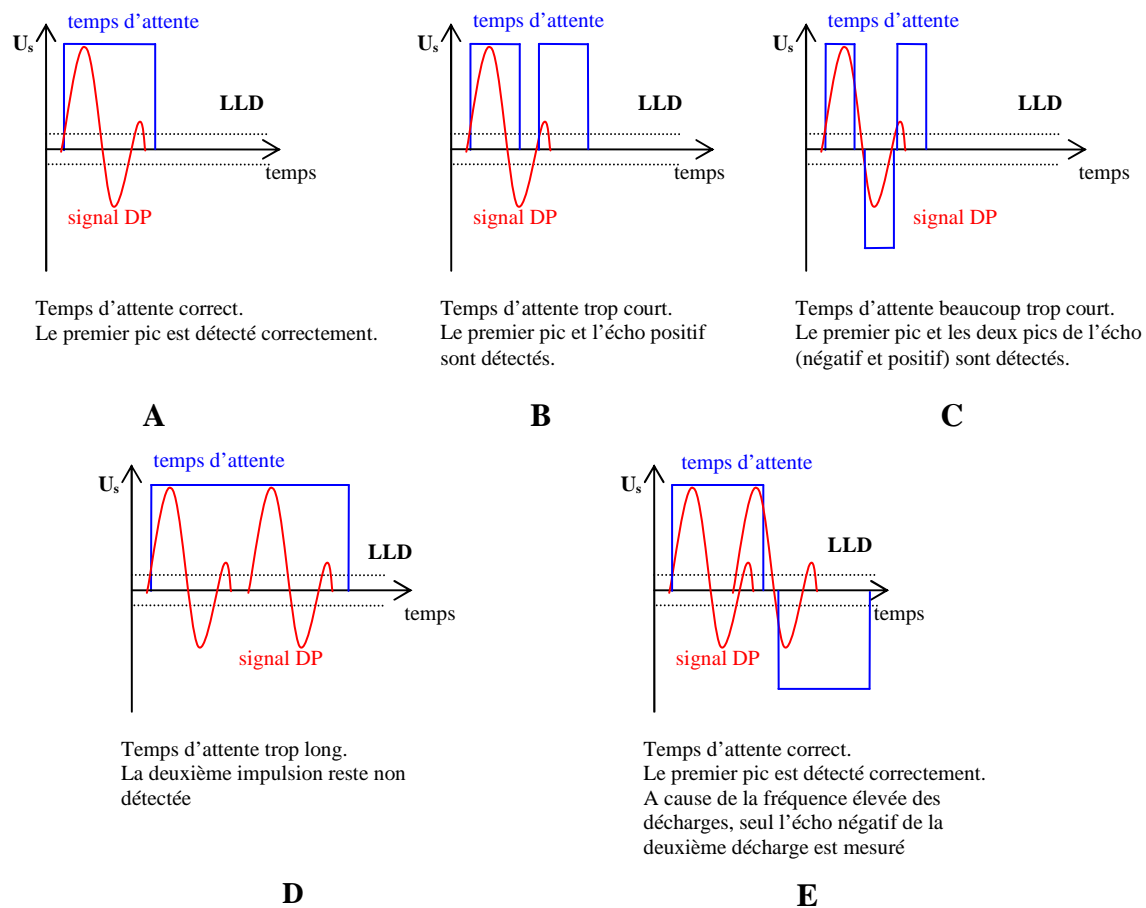


Figure 2.15. Exemples d'acquisitions de DP en fonction du choix du LLD et du temps mort.

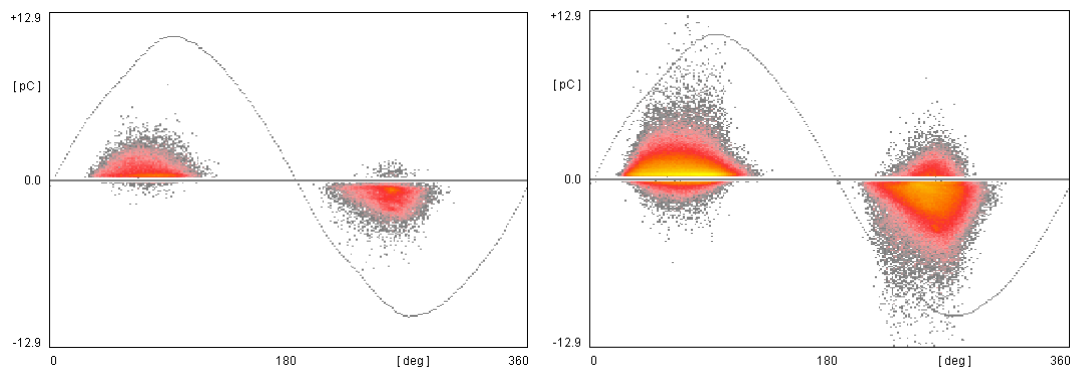


Figure 2.16. Exemples d'acquisition de DP quand la fréquence élevée de l'apparition des décharges produit des artefacts de mesure. Gaz : SF₆, pression 3,5 bar, tension 89 kV et 92 kV RMS.

La mesure de DP est une mesure relative, qui dépend des valeurs des grandeurs électriques des composants du circuit. Avant chaque acquisition, une calibration de la mesure des décharges doit être réalisée en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue (5, 10, 20, 50 ou 100 pC, en fonction de la plage des valeurs attendues) délivrée par une unité de calibration (CAL1A de l'ICM System).

2.3.3. Système optique

La lumière émise pendant les phénomènes de décharge est mesurée par un photomultiplicateur ou visualisée par une caméra haute-sensibilité placée devant la fenêtre optique de la cellule.

Photomultiplicateur

Le système de mesure décrit dans la Figure 2.11A utilise le photomultiplicateur Hamamatsu H7732-10 pour mesurer toute la lumière émise par les DP dans la zone du PT. Le photomultiplicateur est connecté à une entrée 50 Ω de l'oscilloscope. Ce photomultiplicateur détecte la lumière dans la gamme de longueur d'onde 185 nm à 900 nm. La distribution de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde est montrée dans la Figure 2.17

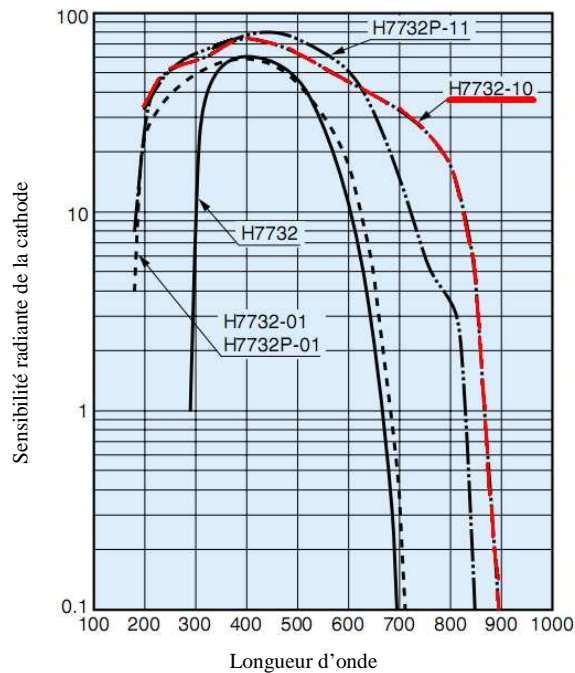


Figure 2.17. Distribution de la sensibilité en fonction de la longueur d'onde pour le photomultiplicateur Hamamatsu H7732-10 utilisé dans les essais [49].

Notons que cette distribution de la sensibilité est suffisante pour capter la totalité des émissions induites dans le domaine UV/visible par des décharges produites dans l'air (300–700 nm [50]) ou dans le SF₆ (420 nm–510 nm [51]).

Caméra CCD

Des images des décharges sont réalisées grâce à une caméra CCD en série avec un intensificateur d'image à gain réglable. A l'aide de celui-ci, la sensibilité de la caméra peut

être contrôlée en fonction de l'intensité de l'émission lumineuse des DP (dans l'air, la quantité de lumière émise est nettement supérieure à celle dans le SF₆). Avec le gain réglé au maximum, ce système a la même sensibilité que le photomultiplicateur. Pourtant, la capacité de détection des photons de la caméra est limitée par le bruit de fond propre, qui se traduit par la présence des points répartis aléatoirement dans le temps et l'espace dans l'image acquise. Un ordinateur possédant une carte d'acquisition vidéo permet d'enregistrer des images et des séquences vidéo montrant l'évolution des décharges. Pour focaliser l'image, on utilise un objectif Olympus de focale 50mm (f 1.4) en série avec différentes extensions optiques, en fonction de la zone que l'on souhaite visualiser (la totalité de la zone du PT ou un secteur de celle-ci).

2.3.4. Détection et mesure optique des DP sous impulsion de tension.

Sous impulsion haute tension, il n'est pas possible de réaliser de mesures électriques de DP avec une sensibilité satisfaisante. Pendant la montée de la tension, un courant élevé correspondant à la charge du dispositif testé circule, et cette impulsion de courant intense sature les dispositifs de mesure de DP. Contrairement au cas de l'alimentation à 50Hz, il n'est pas possible de séparer par filtrage ce courant de charge des impulsions de DP.

Dans ce travail, nous avons tenté de développer une mesure optique des DP qui n'est pas perturbée par le courant de charge du dispositif, et qui peut donc par conséquent être utilisée aussi bien sous tension impulsionnelle qu'alternative. L'intensité instantanée de la lumière émise croît généralement avec le courant de décharge, et on peut donc tenter de comparer la charge des DP (correspondant à l'intégration du courant de DP) avec la quantité totale de lumière émise (correspondant à l'intégration de l'intensité lumineuse). En effet, les mesures simultanées sous tension alternative des impulsions de lumière émise à l'aide du photomultiplicateur (PM) et de la charge des DP (signal de l'ICM) nous ont permis d'établir une corrélation entre ces deux signaux, puis d'en déduire une courbe « d'étalonnage » reliant la lumière à la charge des DP, pour des décharges partielles positives et négatives. Ces mesures seront présentées dans les chapitres suivants.

La Figure 2.18 montre un exemple d'enregistrement synchronisé du signal de l'ICM et du PM. Dans cette mesure, le PM est connecté à une impédance élevée (1M Ω), ce qui lui procure une bande passante peu élevée (quelques kHz). Par conséquent, les impulsions de lumière très brèves de DP (quelques ns) sont bien intégrées dans cette mesure. Un étalonnage exige

l'acquisition d'un grand nombre de signaux corrélés. Pour ce faire, nous avons écrit un programme en VBA (Virtual Basic for Applications, macro d'Excel) permettant d'enregistrer automatiquement les signaux correctement acquis par l'oscilloscope (voir l'annexe 1).

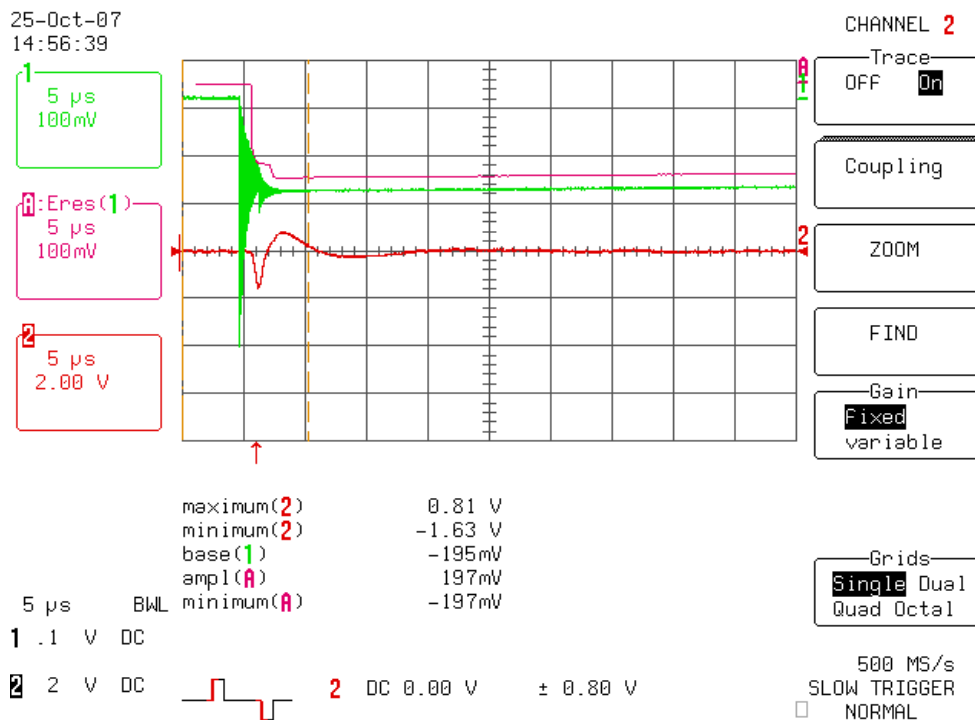


Figure 2.18. Capture d'écran de l'oscilloscope avec les signaux synchronisés de l'ICMSystem (en rouge) et du PM (en vert) ; en rose : ERES (filtre passe-bas) du signal du PM

Le programme ainsi conçu filtre les lignes en fonction des états des paramètres, il ne prend que les lignes pour lesquelles les deux états de MIN et MAX sont « OK ». Il compare les valeurs absolues des MIN et MAX de C2 (signal de l'ICM) pour prendre la plus grande qui correspond à la valeur de la décharge. Ensuite il sauvegarde la ligne sous la forme :

<valeur réponse PM> <valeur décharge>

dans un fichier text ASCII pour importer les données dans Kaleidagraph et les représenter. L'annexe 1 () présente les détails de l'acquisition.

Les mesures commencent quand la tension atteint la valeur d'amorçage des DP (U_{DP}), avec le gain de l'ICMSystem fixé a une valeur suffisante pour détecter la moindre DP qui peut apparaître (le LLD est fixé à 0,2 pC). Ensuite, on augmente la tension et on réduit le gain de l'ICM pour éviter que les valeurs des DP n'atteignent le seuil de saturation pour le gain choisi. On augmente la tension jusqu'à atteindre la tension de claquage, U_b ou le niveau de saturation du PM.

L'intérêt de cette mesure optique, jusqu'à présent jamais utilisée pour l'étude du point triple, est double. Elle permet de détecter l'existence de DP de faibles amplitudes (quelques pC)

sous impulsion de tension, ce qui est totalement irréalisable par mesure électrique. Les courbes d'étalonnage établies en tension alternative, même si elles présentent une dispersion assez importante, sont utilisées afin d'évaluer la charge (en pC) mise en jeu par les DP.

2.4. Essais en tension impulsionnelle

2.4.1. Système d'alimentation

Les modifications réalisées aux blocs fonctionnels sont montrées dans la Figure 2.19.

On utilise un générateur de Marx pour obtenir une tension impulsionnelle ; il s'agit d'un circuit qui utilise des diodes, des éclateurs, des résistances et des capacités arrangés en deux étages de telle manière que les circuits RC sont chargés en parallèle avec une tension maximale de 140kV, délivrée par le transformateur HT. Au moment souhaité, les circuits RC sont mis en série grâce aux éclateurs commandés automatiquement par le panneau de commande. La tension disponible est alors de 280 kV crête, en négligeant les pertes.

La tension impulsionnelle est caractérisée par son amplitude, son temps de montée, t_r (le temps pendant lequel le signal monte de 10% à 90% de sa valeur maximale) et son temps de descente, t_f (le temps pendant lequel le signal décroît de sa valeur maximale à 50% de celle-ci). La Figure 2.20 montre plus spécifiquement ces grandeurs.

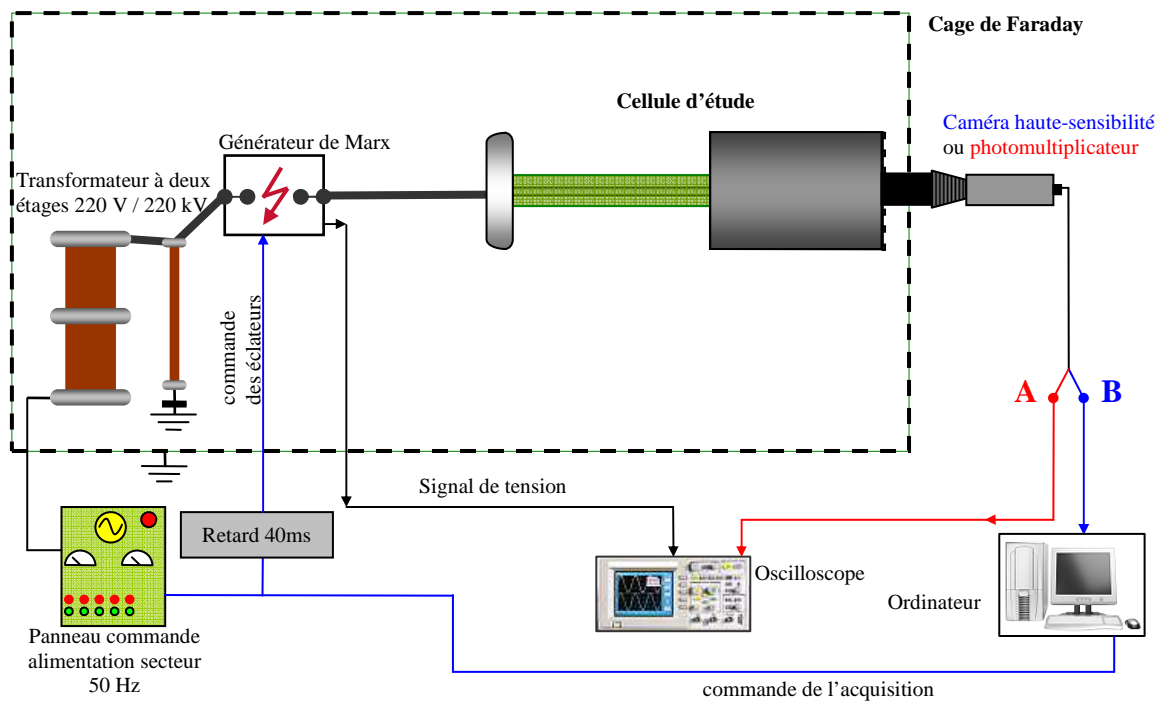


Figure 2.19. Schéma de détection, mesure et visualisation des DP en tension impulsionnelle.

A. Système avec photomultiplicateur ; B. Système avec caméra haute-sensibilité

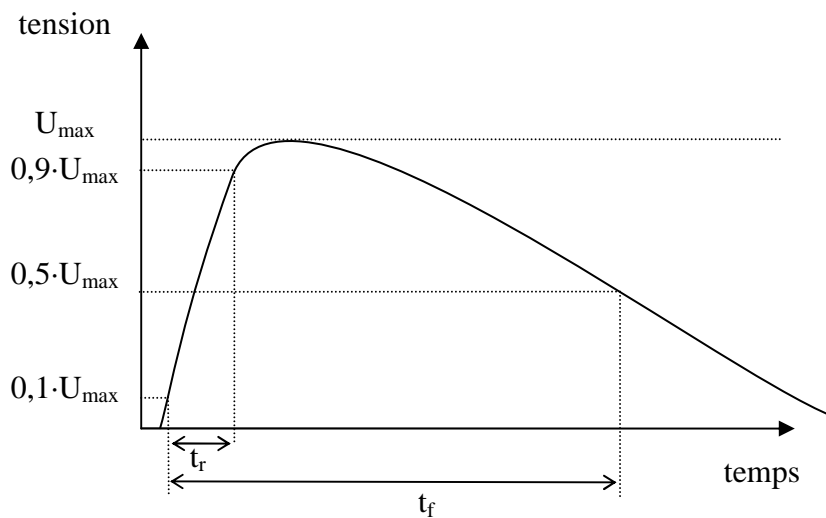


Figure 2.20. Grandeurs caractéristiques d'un signal de tension impulsionnelle.

Les résistances séries du générateur de Marx déterminent la valeur du temps de montée, tandis que le temps de descente est déterminé par les résistances mises en parallèle. Dans nos expériences, la forme d'onde a été fixée avec $t_r=0,4 \mu s$ et $t_f=1000 \mu s$, soit un temps de montée rapide et un temps de descente très lent.

2.4.2. Détection et mesure des décharges partielles

La détection des DP's produites en tension impulsionnelle ne peut se réaliser avec l'ICM System utilisé antérieurement en raison du courant qui apparaît dans le circuit pendant le front ascendant de la tension appliquée. Aussi, nous utiliserons la détection optique des DP's à l'aide du photomultiplicateur ou de la caméra haute sensibilité mais dans des montages légèrement différents.

Système avec photomultiplicateur

Le PM est relié directement à l'oscilloscope qui se déclenche sur le front ascendant du signal de la tension appliquée, provenant du générateur de Marx. Le signal de la tension et celui donné par le PM sont ensuite enregistrés à l'aide de l'ordinateur.

Système avec caméra intensifiée

La caméra CCD capte les phénomènes avec une vitesse de 25 images par seconde, autrement dit une image capturée par l'ordinateur contient la lumière émise pendant 40 ms.

2.5. Etude de l'isolant solide

En fonction de la forme de l'isolant et des valeurs de potentiel mis en jeu, deux systèmes de mesure du potentiel de surface ont été utilisés :

2.5.1. Mesure du déclin de potentiel des échantillons plans

La conductivité (volumique et surfacique) de l'isolant est étudiée en mesurant le déclin du potentiel de la surface en fonction du temps. La surface des différents échantillons en forme de disques (PETP, époxy, Téflon chargé MoS₂ et Téflon chargé Cobalt ; avec des épaisseurs de 1 et 3 mm) est chargée par décharge couronne dans l'air (Figure 2.21 et Figure 2.22).

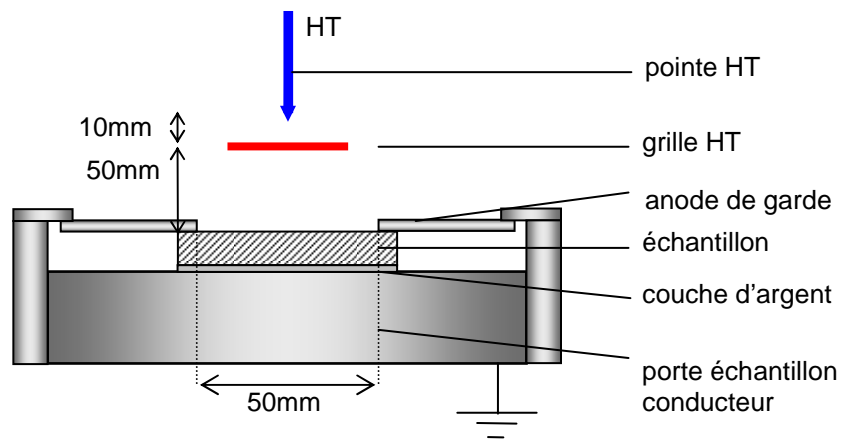


Figure 2.21. Le dispositif pour l'étude du déclin de potentiel. Schéma du dispositif de charge par bombardement ionique

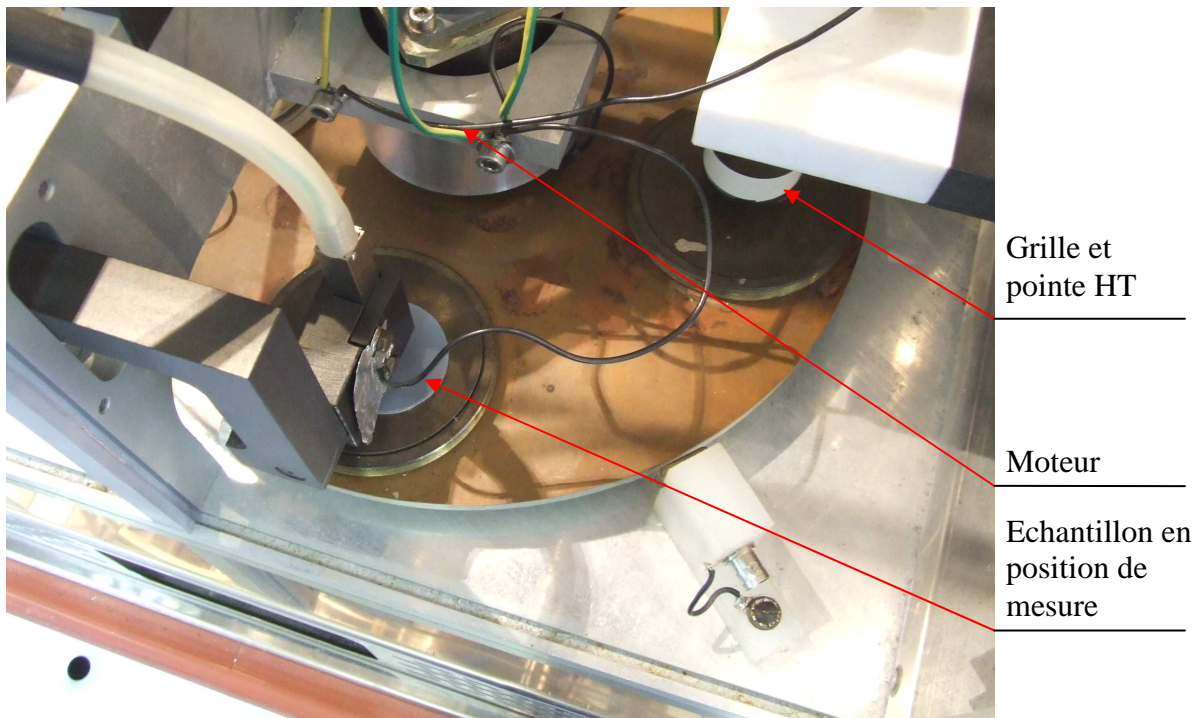


Figure 2.22. Photo du dispositif pour l'étude du déclin de potentiel.

La surface se charge par bombardement ionique avec le même signe que le signe de la tension de la pointe et de la grille. Le support de l'échantillon est ensuite placé en position de mesure par rotation à l'aide d'un moteur pas à pas contrôlé par un logiciel conçu au laboratoire (Figure 2.23).

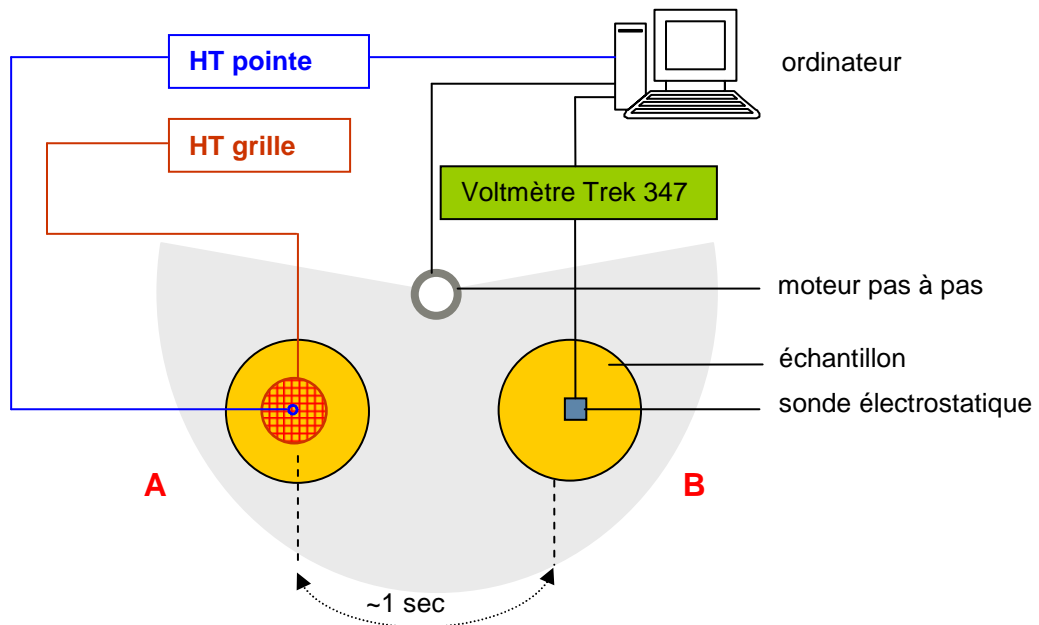


Figure 2.23. Le dispositif pour l'étude du déclin de potentiel. Schéma du dispositif de mesure ; A. Position de l'isolant pour charger la surface ; B. Position de l'isolant pour la mesure du potentiel de surface

Le temps pour que l'échantillon arrive sous la sonde capacitive est d'environ une seconde suite au bombardement ionique. Le potentiel à la surface de l'isolant en fonction du temps est ensuite mesuré par la sonde capacitive connectée à un voltmètre électrostatique (TREK 3kV) et les données sont stockées au format ASCII à l'aide de l'ordinateur.

Pendant toute la durée des essais, les échantillons sont stockés et mesurés dans une étuve à atmosphère contrôlée à une température de 30°C et une humidité relative fixée à 35%. Les échantillons à mesurer sont nettoyés avant chaque expérience avec de l'isopropanol (alcool isopropylique) puis du dichlorométhane (chlorure de méthylène).

2.5.2. Mesure du potentiel de surface des isolants utilisés dans la cellule AREVA

Le potentiel produit par les charges déposées par les DPs dans la région du PT est mesuré à l'aide d'un voltmètre électrostatique connecté à une sonde capacitive verticale 20kV. Malheureusement, il n'est pas possible de mesurer directement le potentiel à la surface du support isolant dans la cellule d'essai du fait de l'espace disponible par rapport à l'encombrement de la sonde et de la nécessité de démonter le hublot qui est fixé par 16 vis à la cellule. Les mesures ont été effectuées à l'extérieur de la cellule dans l'air atmosphérique,

en reproduisant le mieux possible la géométrie réelle de la cellule. Ainsi, le temps qui s'écoule entre l'impulsion de tension et la mesure du potentiel de surface est réduit de 4 minutes à 20 secondes. Les schémas du système de charge de la surface et de mesure du potentiel sont montrés sur la Figure 2.24.

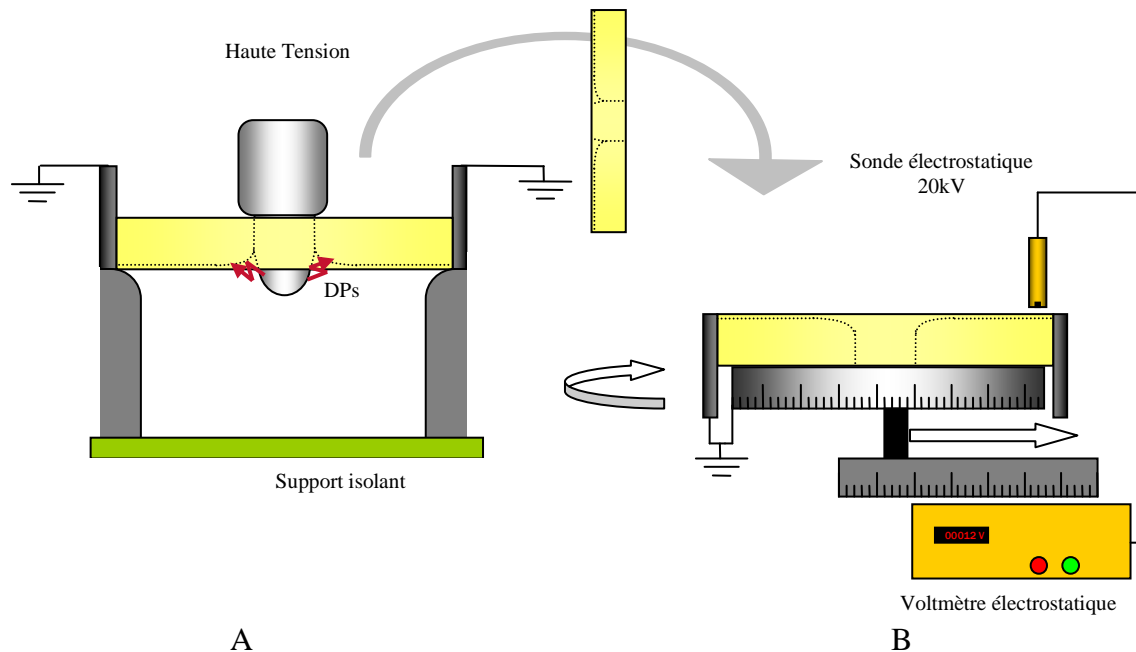


Figure 2.24. Schéma du dispositif d'étude des charges déposées par les DP produites au PT sur la surface de l'isolant ; A. dispositif de charge de la surface ;

B. dispositif de mesure, après basculement à 180° du support isolant chargé

Un des plus importants problèmes rencontrés est la facilité de chargement de la surface par triboélectrisation. En effet, l'isolant en époxy peut acquérir une charge de l'ordre de 10 nC uniquement par frottement de sa surface avec des gants en latex. Le potentiel mesuré sur la zone en cause peut atteindre 5000V. Si ce phénomène peut être évité par un protocole de mesure plus strict, le frottement de l'isolant avec les parois de la cellule est inévitable pendant le dépôt et l'enlèvement du disque de la cellule pour le mesurer. La surface extérieure de l'isolant se charge alors du signe moins par contact avec le métal.

Pour minimiser l'effet de ce paramètre non contrôlable, l'ensemble isolant, électrode métallique, bague de masse est monté et utilisé dans l'atmosphère ambiante, et ceci sans toucher l'isolant ou le déplacer par rapport à ces supports. L'électrode centrale est alimentée en HT, et après l'application de l'onde de tension, l'ensemble est placé sous la sonde électrostatique verticale 20kV. Le contrôle de la position sera assuré par une plaque tournante graduée.

L'isolant est nettoyé à l'isopropanol, ensuite, après application de l'impulsion de tension (en utilisant la même méthode que celle détaillée dans le chapitre 2.4), il est déposé sur un support tournant gradué qui peut être déplacé dans le plan horizontal. La sonde électrostatique est fixée à une distance de 3 mm de l'isolant, distance recommandée par le fabricant. Les graduations du porte échantillon permettent une mesure du potentiel selon des coordonnées polaires (r – distance à partir du centre de l'isolant, θ - angle) précises sur la surface de l'isolant et, donc, une représentation fidèle de la répartition des charges sur l'isolant.

2.6. Logiciels spécifiques utilisés

2.6.1. QuickField 4.2

QuickField est un logiciel utilisé pour l'analyse et la résolution des problèmes électromagnétiques et thermiques simples par la méthode des éléments finis. En présentant des outils avantageux pour les calculs de champ électrique, et une certaine facilité d'utilisation, ce logiciel a été employé au début de la thèse. Ensuite, les besoins de l'étude ont augmenté et QuickField a présenté ses lacunes au niveau de l'interface avec l'utilisateur, la transparence du code et, surtout, au niveau de la documentation disponible.

2.6.2. FEMM

FEMM (Finite Element Method Magnetics) est un logiciel utilisé seulement pour les problèmes électromagnétiques. Celui-ci est libre et gratuit, sa source étant disponible en ligne (www.femm.info). L'utilisation du langage scriptural « Lua » (www.lua.org), permet à l'utilisateur d'avoir une facilité considérable à modifier les paramètres des problèmes et à automatiser des tâches répétitives (changer la valeur de la charge de surface ou modifier la position d'une particule en métal, par exemple).

3. Etude des DP au point triple

Dans ce paragraphe nous décrivons les résultats obtenus en utilisant la cellule Areva dans laquelle le champ électrique est maximisé dans la région du point triple (PT). Ceci permet de générer des décharges partielles dans la région du PT bien avant d'observer le claquage. Nous avons ainsi pu étudier les caractéristiques des DPs en fonction des paramètres suivants : nature et propreté de l'isolant solide, pression et nature du gaz, tension appliquée alternative ou impulsionnelle.

3.1. Essais en tension alternative (50Hz)

3.1.1. Tensions spécifiques mesurées

Pour un système donné (gaz, pression et isolant solide), les phénomènes observés évoluent en fonction de l'augmentation de la tension appliquée. Des régimes de décharge différents sont ainsi détectés à des tensions seuils spécifiques. Nous pouvons définir trois tensions seuils qui correspondent aux phénomènes suivants : apparition des DPs, amorçage des DPs et claquage.

Tension d'apparition des DPs (U_a).

C'est la tension à laquelle apparaissent les premières décharges partielles. Ces premières décharges sont caractérisées par un train instable de quelques impulsions de courant rapprochées dans le temps (Figure 3.1), corrélé avec un train d'impulsions de lumière, en phase avec la mesure électrique (Figure 3.2). Si la caméra CCD est utilisée pour acquérir une image, cette image montre dans la majorité des cas un seul point lumineux dans la zone du point triple. Ce régime de DPs correspond donc à des décharges ponctuelles qui se produisent dans une zone très réduite du PT (Figure 3.3).

En continuant d'augmenter la tension au-dessus de U_a , les décharges se produisent toujours en ce même point du PT jusqu'à atteindre un nouveau régime de décharges que nous définiront plus loin. Le facteur le plus important qui influence la valeur de U_a est la propreté du système (i.e. le soin apporté au nettoyage de la surface l'isolant et au montage de la cellule).

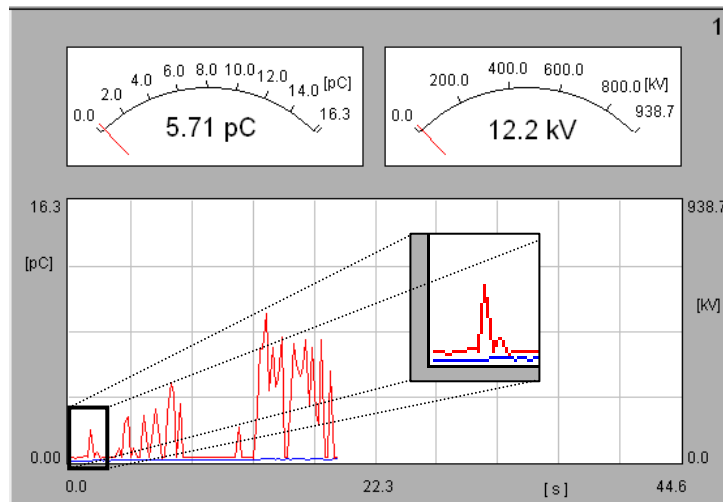


Figure 3.1. Capture d'écran de l'ordinateur montrant le niveau moyen de DP en fonction du temps, apparaissant à la tension d'apparition U_a . Gaz : air sec ; Pression : 1,5 bar.

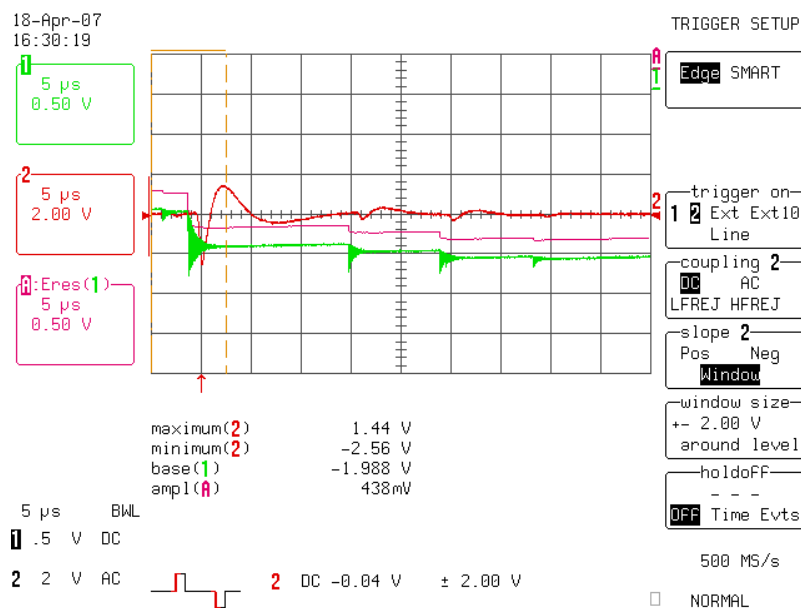


Figure 3.2. Enregistrement montrant les premières DP détectées par l'ICMSys (rouge), et par le PM (vert et en rose – après élimination des hautes fréquences) apparaissant à la tension d'apparition U_a . Gaz : SF6 ; Pression : 4,5 bar.

Suivant les essais, la valeur de U_a peut beaucoup varier car elle dépend de paramètres qui sont difficiles à contrôler et à reproduire. Les résultats, présentés dans le Tableau 3-1, montrent que, dans les mêmes conditions (air sec à une pression de 4,5 bar), U_a varie de 37 kV à un maximum de 82kV. U_a correspond à l'apparition des décharges sur des défauts ponctuels, eux-mêmes fonction du type de préparation de l'ensemble support isolant + électrode HT. Par la suite nous ne présenterons plus ces tensions d'apparition.

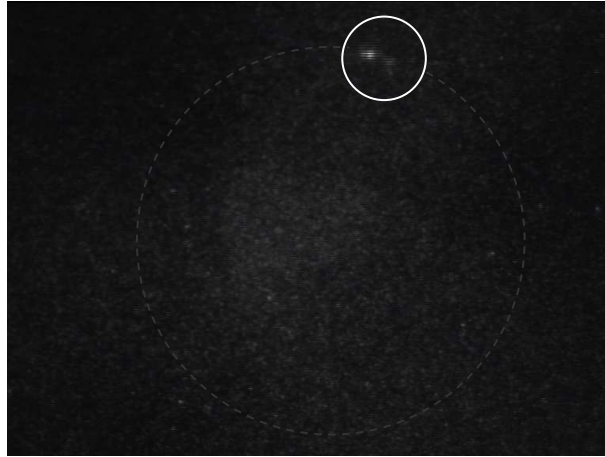


Figure 3.3. Image montrant les premières DP's détectées par la caméra CCD haute-sensibilité apparaissant à la tension d'apparition U_a . Gaz : SF6 ; Pression : 4,5 bar

TABLEAU 3-1. TENSIONS D'APPARITION U_a EN FONCTION DES ESSAIS DANS DIFFERENTES CONDITIONS.

Isolant en résine époxy	gaz	pression (bar abs.)	U_a (kV crête)
Isolant n°1 non-nettoyé et après plusieurs claquages et DP's	Air sec	4,5	50
Isolant n°1 nettoyé à l'isopropanol	Air sec	4,5	69.5
Isolant n°1 nettoyé au papier de verre et à l'isopropanol	Air sec	4,5	82
Isolant n°1 nettoyé au papier de verre et à l'isopropanol – après un premier claquage	Air sec	4,5	37
Isolant n°2 nettoyé au papier de verre et à l'isopropanol	Air sec	4,5	76
Isolant n°2 nettoyé au papier de verre et à l'isopropanol	Air sec	1,0	22
Isolant n°2 nettoyé au papier de verre et à l'isopropanol	Air atm.	1,0	22

Tension d'amorçage des DP's (UDP)

En augmentant la tension au-dessus de U_a , il apparaît à une tension seuil U_{DP} un nouveau régime de DP's qui correspond à l'apparition brutale de multiples points lumineux autour du PT (Figure 3.4 gauche) jusqu'à ce que toute la zone du PT soit concernée par les DP's (Figure 3.4 droite). De plus, ces DP's, mesurées par l'ICMsystem (Figure 3.5), ont une amplitude moyenne sensiblement constante. Dans ce cas, la tension seuil U_{DP} est peu influencée par le protocole de nettoyage, et sa valeur est reproductible. U_{DP} est donc la grandeur pertinente à mesurer en fonction de différents paramètres (tension, gaz, pression, etc.).

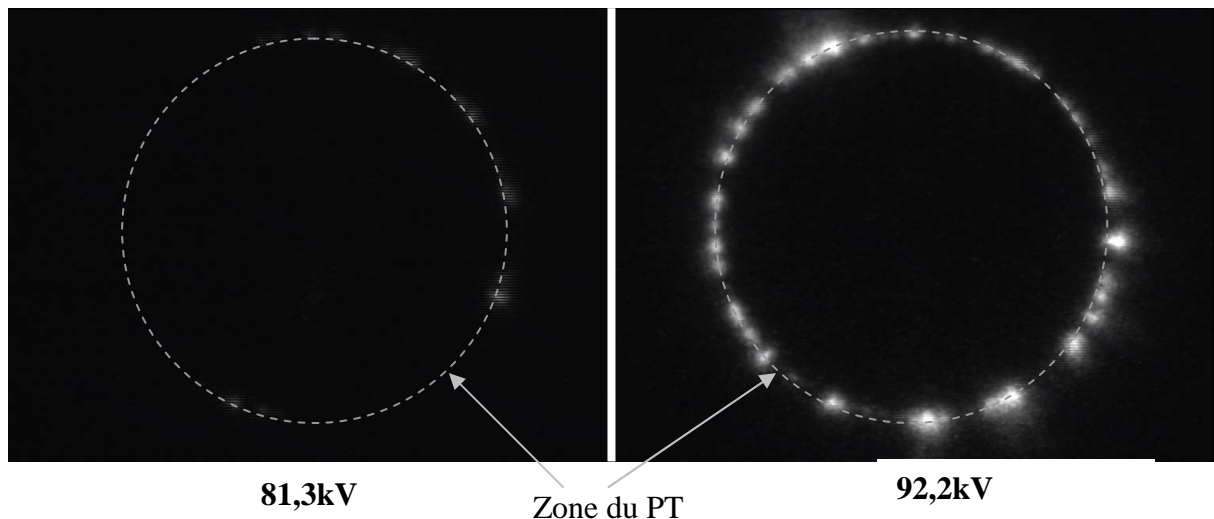


Figure 3.4. Images montrant l'évolution des DPs détectées par la caméra CCD haute-sensibilité, après la tension d'amorçage UDP. Gaz : SF₆ ; Pression : 4,5 bar.

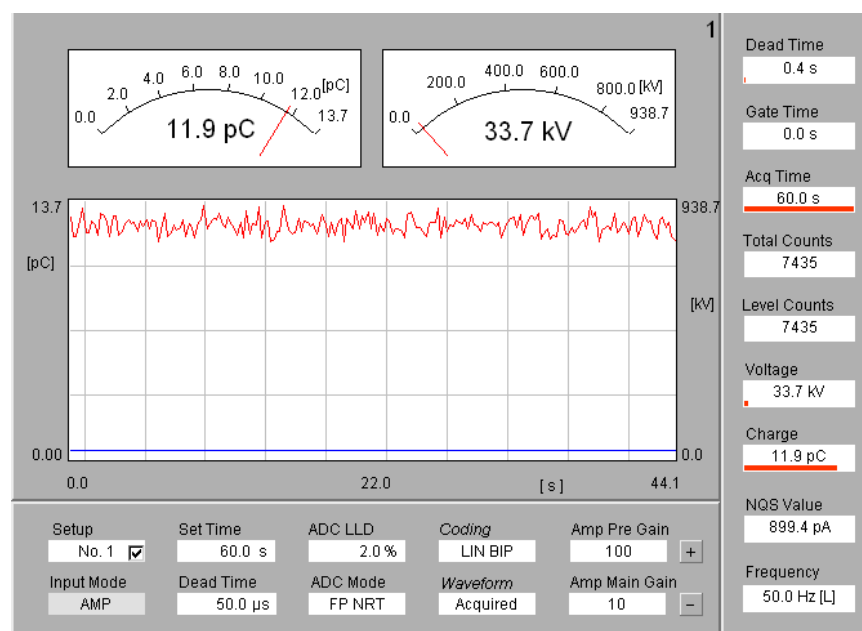


Figure 3.5. Capture d'écran de l'ordinateur montrant le niveau moyen de DP en fonction du temps, pour $U \geq U_{UDP}$. Gaz : Air Sec ; Pression : 3,5 bar.

En poursuivant l'augmentation lente de la tension par paliers, on observe, à une certaine valeur de U_{app} , un nouveau régime instable qui apparaît avec des valeurs de décharges plus élevées ($\sim 50\text{pC}$, Figure 3.6) et qui se superpose au régime stable précédent. Ensuite les décharges deviennent de plus en plus intenses (Figure 3.6) jusqu'à atteindre un nouveau régime quasi-stable de décharges mais avec une valeur moyenne importante ($\sim 150\text{pC}$) qui augmente avec la tension jusqu'au claquage.

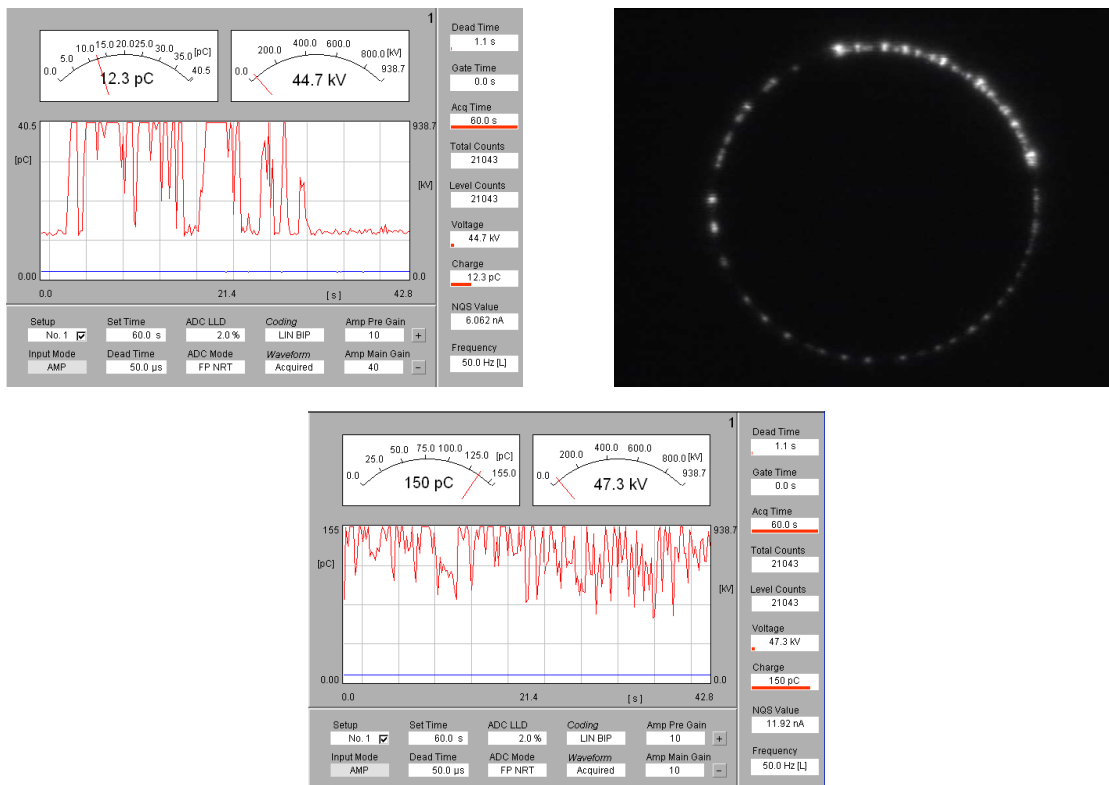


Figure 3.6. Régime de décharges de plus grandes amplitudes ($>50\text{pC}$) qui apparaît pour $U_{\text{app}} \gg U_{\text{DP}}$ (instable à 44.7kV, quasi-stable à 47.3kV). Gaz : Air Sec. Pression : 3,5 bar.

Tension de claquage (U_b)

En augmentant la tension ($U \gg U_{\text{DP}}$), l'amplitude des décharges partielles et leur longueur observée à la caméra augmentent fortement jusqu'à l'apparition du claquage.

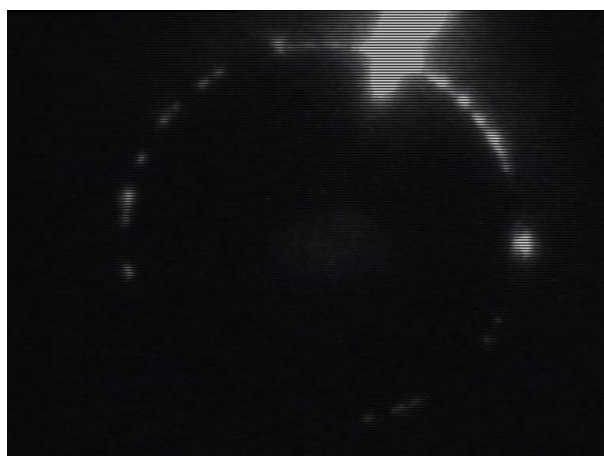


Figure 3.7. Image montrant le claquage (en haut à droite) détecté par la caméra CCD haute-sensibilité, correspondant à la tension de claquage U_b . Gaz : SF₆ ; Pression : 4,5 bar. $U_{\text{app}} = 157\text{ kV}$ crête.

Celui-ci apparaît entre l'électrode centrale mise à la haute tension et le blindage de la cellule mis à la masse (Figure 3.7).

3.1.2. Caractérisation électrique

Pour caractériser électriquement et optiquement les DP, nous avons appliqué sur la cellule d'essai plusieurs paliers de tension pour mesurer la lumière émise dans tout le domaine des valeurs des DP qui apparaissent entre U_{DP} et U_b . Nous avons également réalisé des enregistrements électriques pendant 60 secondes, à l'aide de l'ICM System. Nous pouvons décrire l'évolution des décharges en fonction des paramètres suivants : gaz présent dans la cellule, pression et tension appliquée à partir des exemples suivants.

Air Sec

Dans l'air sec pour toutes les pressions, aux seuils d'apparition de DP, nous observons des DP de faibles amplitudes (de l'ordre de 10 pC), regroupées en « paquets » distincts sur les figures 3.8a, 3.9a, 3.10a. On retrouve des « paquets » positionnés de la même manière aux différentes pressions, les mesures ayant été réalisées sur un isolateur identique. Ces paquets de DP correspondent très probablement à des défauts distincts (de surface de l'isolant ou d'électrode) localisés au PT, et qui produisent les premières décharges de faibles amplitudes. En augmentant la tension, l'allumage du PT se généralise, et les signatures des défauts individuels observées antérieurement sont vite « noyées » par les nombreuses décharges qui apparaissent, beaucoup plus importantes en amplitude (figures 3.8b, 3.9c, 3.10b).

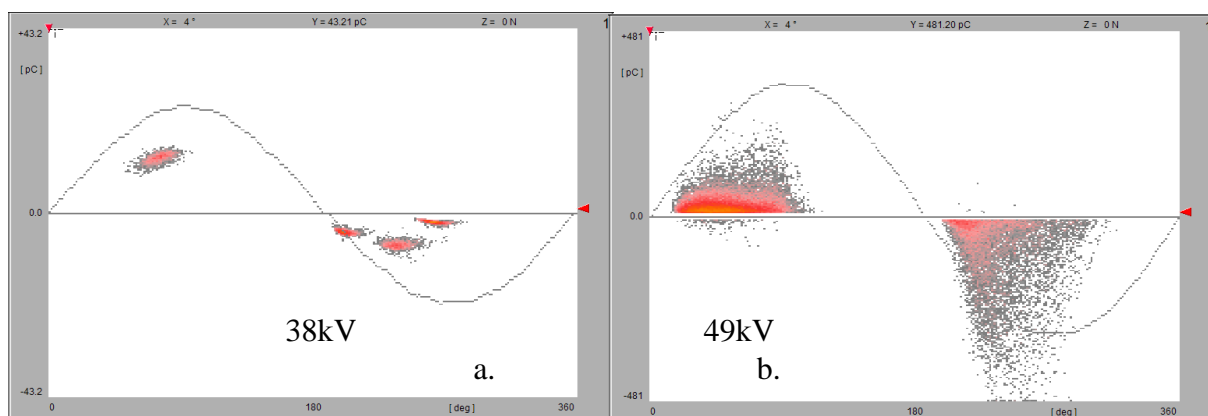


Figure 3.8. Enregistrement des DP dans l'air sec à 2,5 bar.

L'exemple de la Figure 3.9b, réalisé au seuil de l'allumage général avec une sensibilité intermédiaire montre simultanément les « paquets » de DP de faible amplitude encore visibles, et les décharges de plus grande amplitude correspondant à l'allumage généralisé. La

distribution de celles-ci montre l'existence d'une valeur seuil minimum en amplitude. Dans ce cas, l'allure des distributions montre l'existence de décharges de plus grande amplitude en polarité négative.

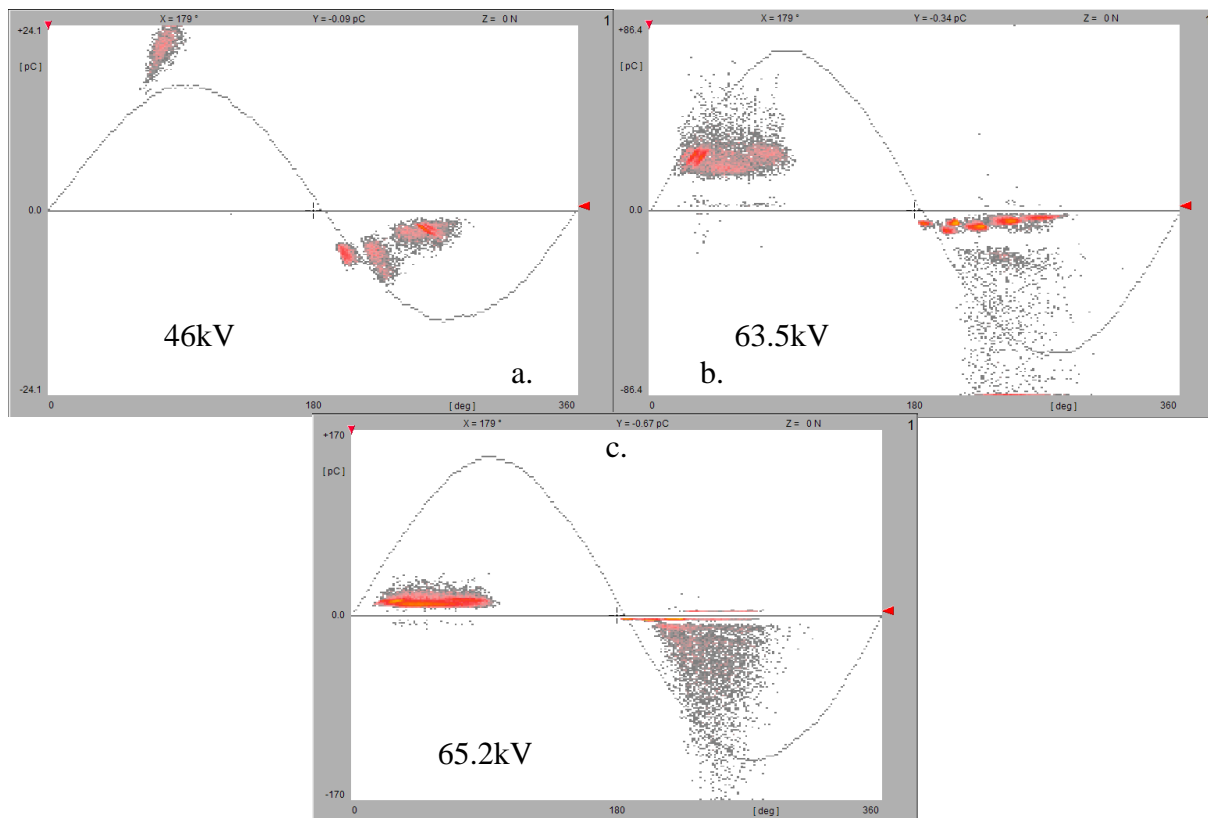


Figure 3.9. Enregistrement des DPs dans l'air sec à 3,5 bar.

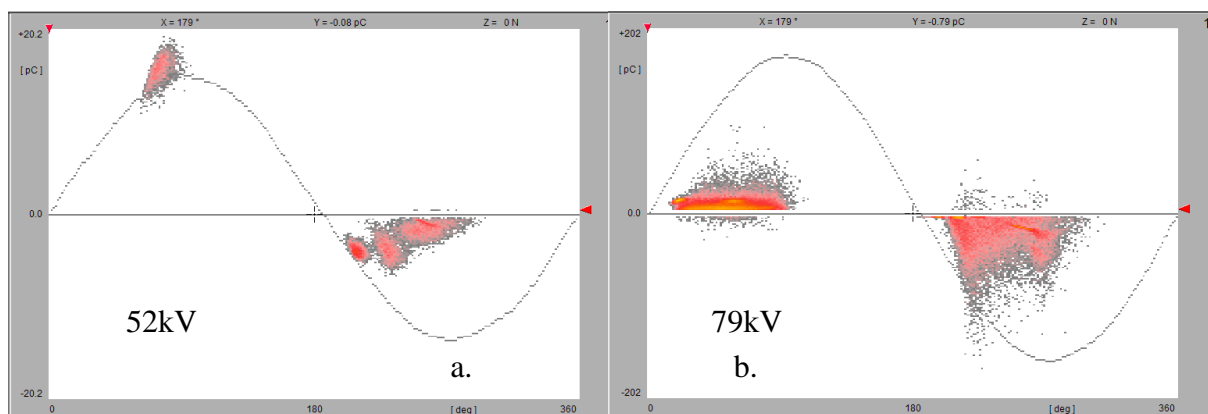


Figure 3.10. Enregistrement des DPs dans l'air sec à 4,5 bar.

SF₆

La différence des signatures des DPs dans le SF₆ par rapport à l'air est très nette. Si dans l'air nous n'observons pas de décharges inférieures à 1pC, les valeurs des plus petites décharges

mesurées dans le SF₆ sont limitées par le bruit de fond du système de mesure (environ 0.2pC), et par le choix du seuil de déclenchement.

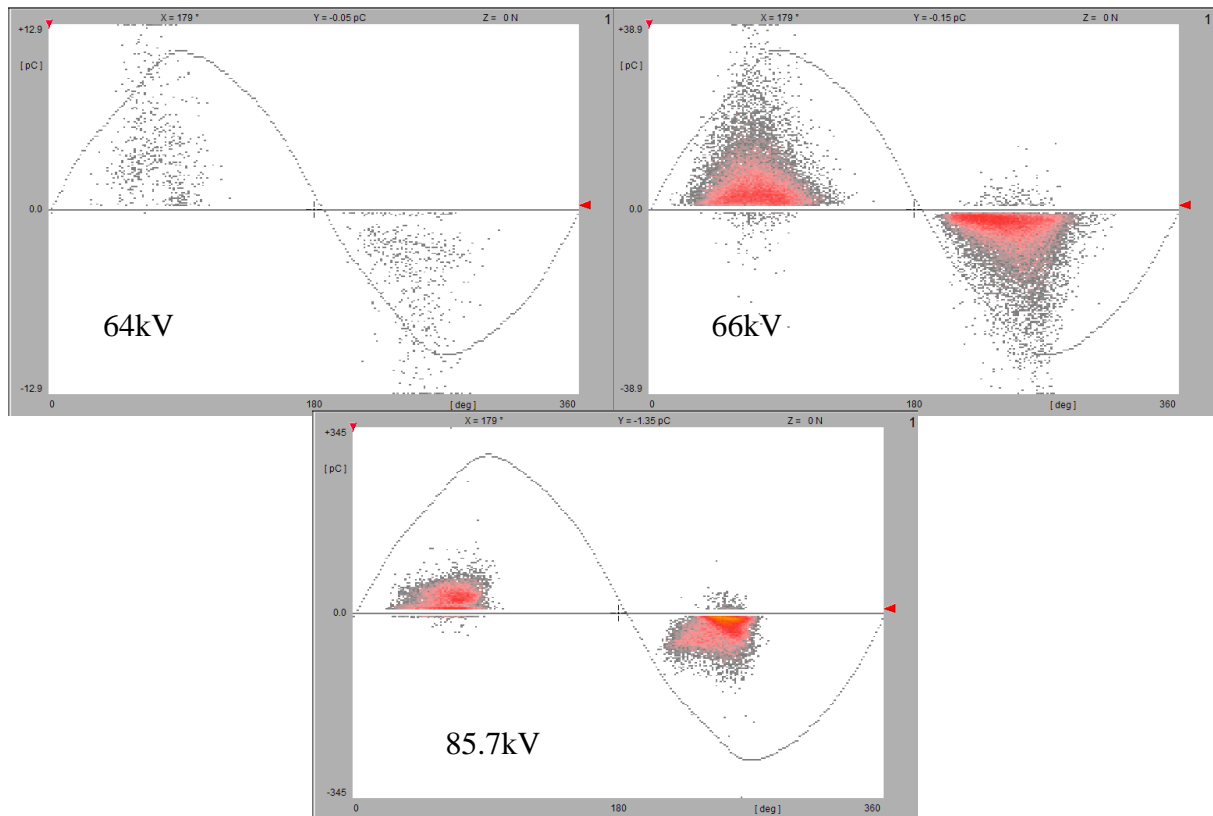


Figure 3.11. Enregistrement des DP dans le SF₆ à 1,5 bar.

Depuis le seuil d'apparition des plus petites décharges 3.12a, 3.14 a, la distribution en fonction de l'alternance est symétrique et ne montre pas de « paquets » distincts. La seule caractéristique qui change quand on augmente la tension est le nombre et l'amplitude des décharges. L'amplitude des DP est également beaucoup plus faible que celle observée dans l'air. Par exemple, à 4.5 bar et 158kV dans le SF₆ (figure 3.15c), les plus grandes décharges sont d'environ 10pC, comparé à environ 200 pC dans l'air à une tension deux fois plus faible (79kV, figure 3.11b).

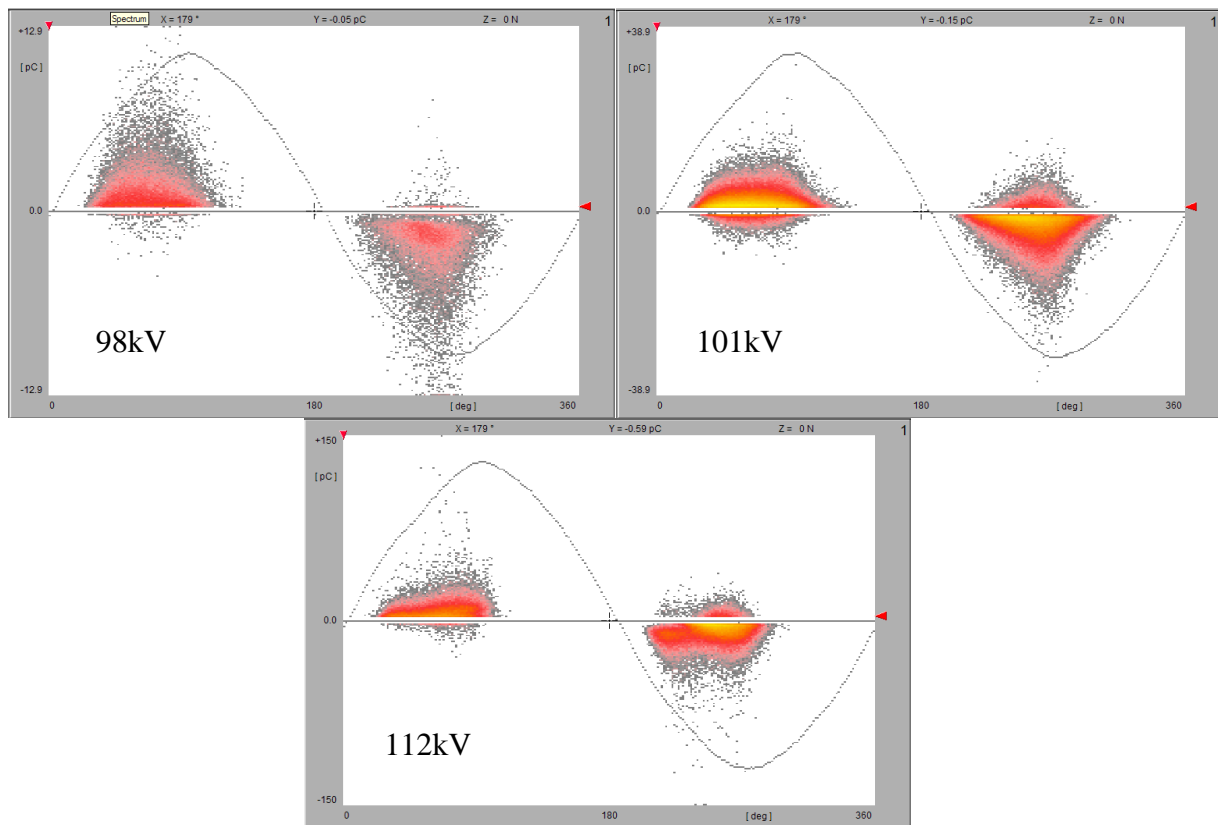


Figure 3.12. Enregistrement des DP dans le SF₆ à 2,5 bar.

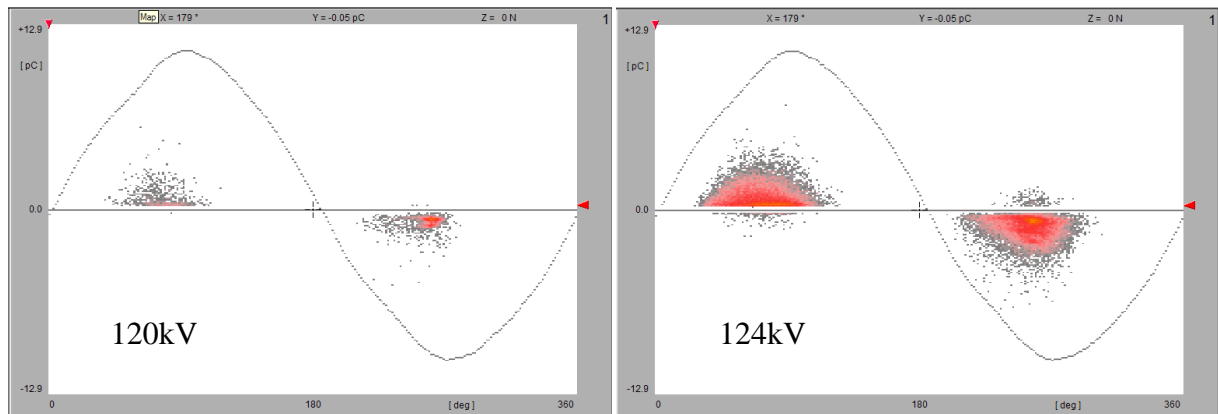


Figure 3.13. Enregistrement des DP dans le SF₆ à 3,5 bar.

Notons que nous avons utilisé les mêmes conditions de mesure (en particulier la même valeur du « temps mort » de 50 μ s et du seuil de déclenchement de 0,2 pC) dans l'air et dans le SF₆. Malgré tout, probablement à cause de la fréquence de récurrence plus élevée des DP dans le SF₆, un plus grand nombre des décharges aberrantes de signe opposé est mesuré avec ce gaz (par exemple Figure 3.12b et c). Ceci correspond probablement au cas de mesure défavorable de la figure 2.16E. Ce phénomène n'est pas observé à faible fréquence de décharge (figures 3.12a, 3.14 a).

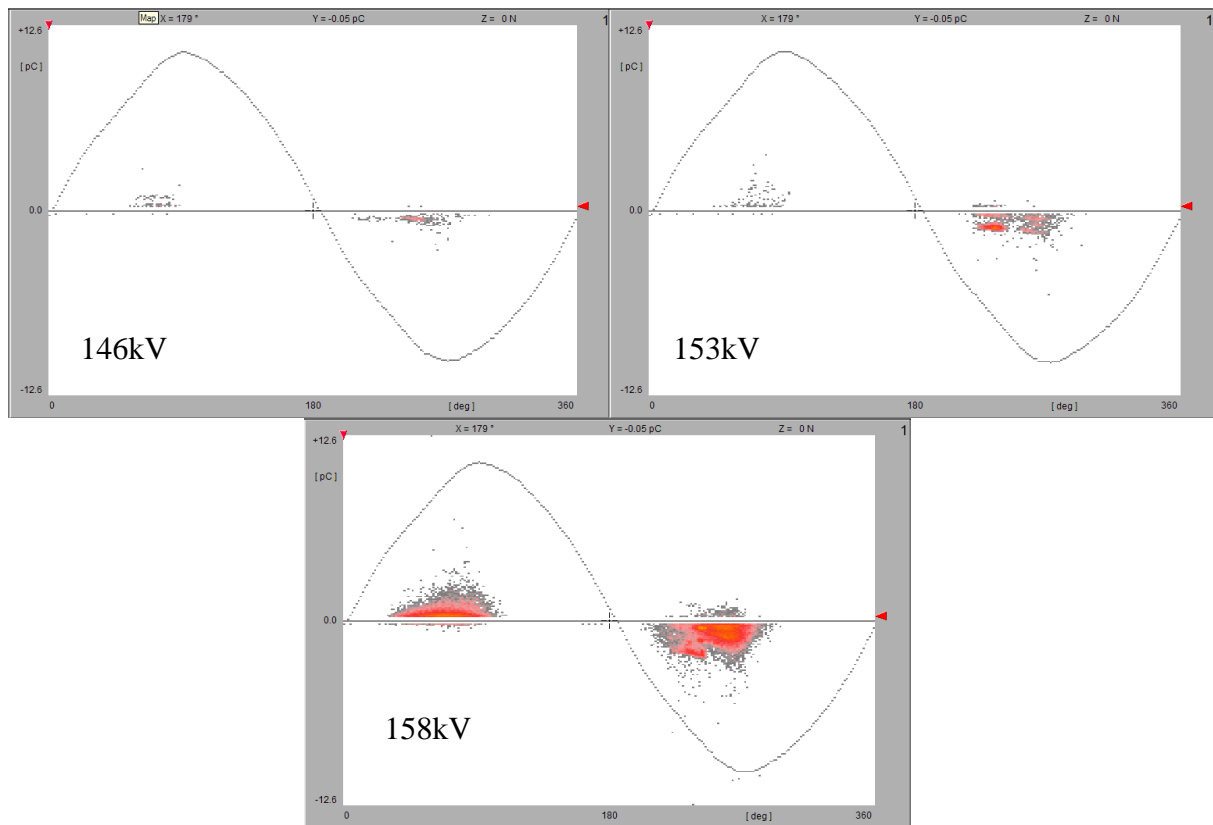


Figure 3.14. Enregistrement des DPs dans le SF₆ à 4,5 bar.

Le déphasage entre la tension appliquée et l'apparition des DP montre de manière évidente dans les deux gaz, à toutes les pressions, l'influence de la charge déposée sur la surface de l'isolant. Les DPs produites sur une alternance déposent des charges qui renforce le champ sur l'alternance suivante. Par conséquent, les premières décharges peuvent être localisées près de la valeur de 90° de la phase (c'est-à-dire au moment où la tension alternative passe par 0).

3.1.3. Caractérisation optique

L'étude de la charge d'une DP (mesurée par l'ICMsystem) et de la lumière émise correspondante (mesurée à l'aide d'un PM), a été effectuée en fonction des paramètres suivants : la pression (de 1,5 à 4,5 bar), la nature du gaz (air sec et SF₆), l'alternance de la tension et le vieillissement de l'isolant. De cette étude, nous pouvons de plus en déduire la relation entre charge et signal lumineux qui pourra être utilisée pour les études des DPs sous tension impulsionnelle. Notons que en raison de la dispersion des résultats, il a fallu accumuler des milliers de valeurs de manière automatisée, afin d'obtenir une relation exploitable entre charge et signal PM.

Influence de l'alternance de la tension

Nous retrouvons dans le SF₆, les principales différences entre les décharges de signe positif (alternance positive de la tension appliquée) et celles de signe négatif (alternance négative) observées sur les mesures de l'ICM. (Figure 3.15, Figure 3.16, Figure 3.17 et Figure 3.18) :

- Le nombre des décharges partielles de signe négatif, DP⁻, est supérieur à celui des décharges positives, DP⁺ (avec le rapport DP⁻/DP⁺ : 3,18 pour 1,5 bar, 2,85 pour 2,5 bar, 8,64 pour 3,5 bar et 15,65 pour 4,5 bar) ;
- On observe sur les figures que les réponses du PM moyennes des DP⁺ semblent légèrement inférieures à celles des DP⁻ ;
- Les courbes de « réponse du PM en fonction de la charge de l'ICMsystem » sont pratiquement indépendantes de l'alternance de la tension ;
- Les décharges négatives se produisent dans le domaine des décharges supérieures à 10pC et également aux pressions de 3,5 et surtout 4,5 bar de SF₆.

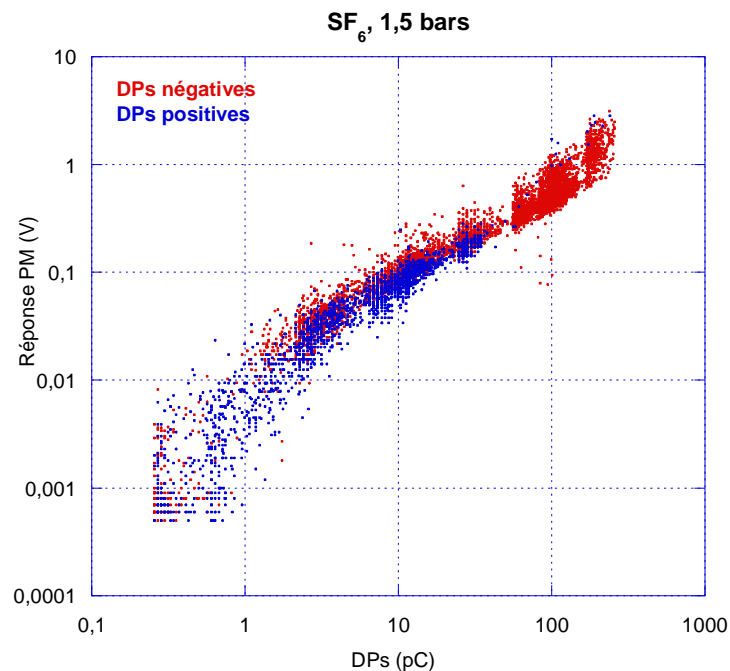


Figure 3.15. Signal du PM en fonction de la valeur de la charge détectée par l'ICMSystem.

Gaz : SF₆ à 1,5 bar.

En conclusion, dans le SF₆, les décharges négatives sont plus fréquentes et d'amplitude moyenne peu élevée que les décharges positives. Le même résultat est obtenu dans l'air sec.

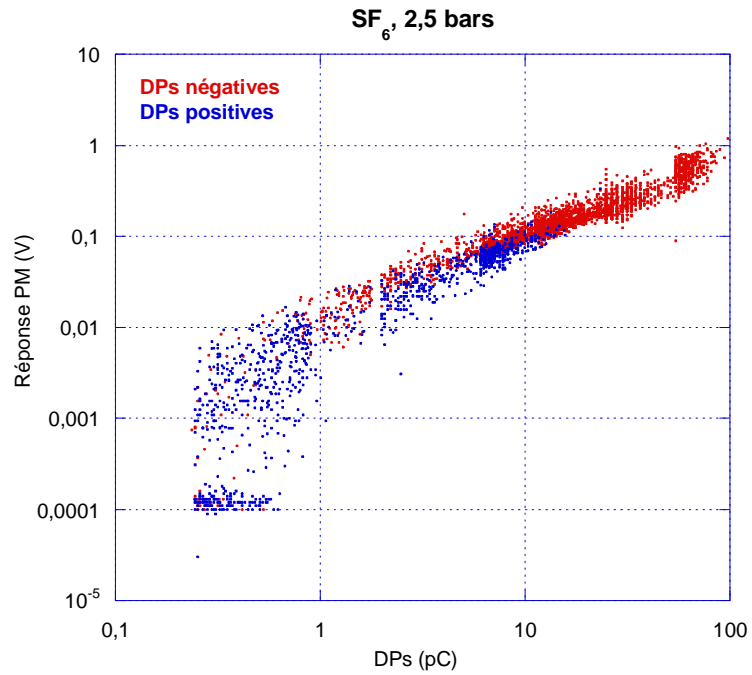


Figure 3.16. Signal du PM en fonction de la valeur de la charge détectée par l'ICMSystem.
Gaz : SF6 à 2,5 bar.

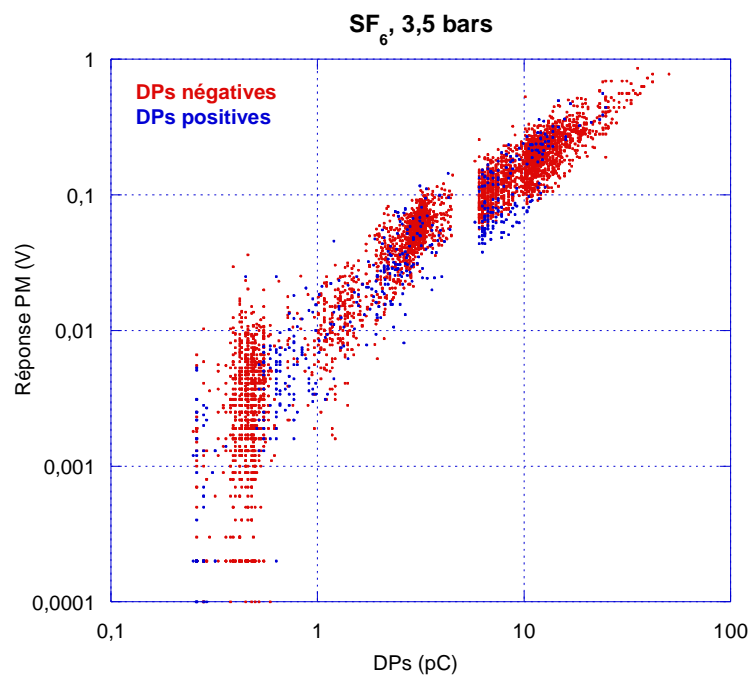


Figure 3.17. Signal du PM en fonction de la valeur de la charge détectée par l'ICMSystem.
Gaz : SF6 à 3,5 bar.

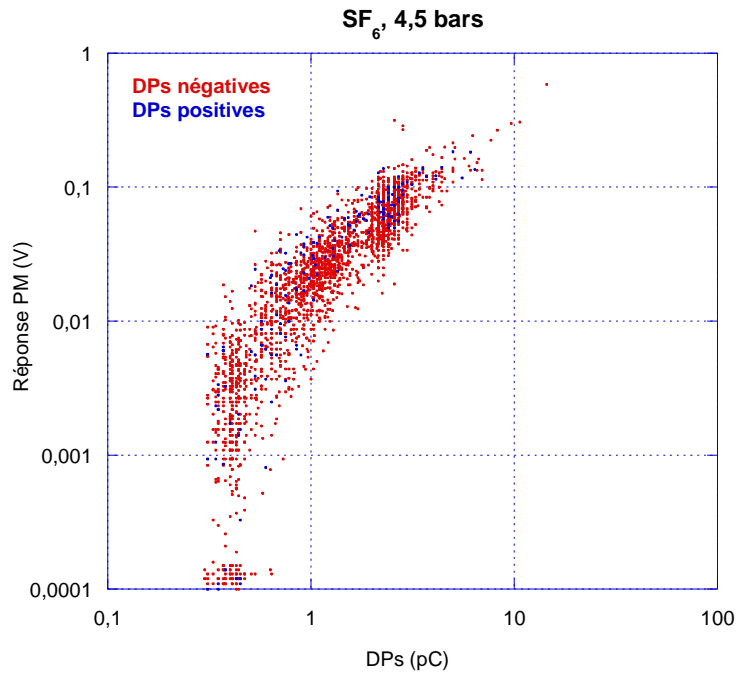


Figure 3.18. Signal du PM en fonction de la valeur de la charge détectée par l'ICMSystem.

Gaz : SF6 à 4,5 bar.

Comme les décharges se produisent au PT entre l'électrode centrale à haute tension et le support isolant, ceci montre que lorsque l'électrode centrale est à une tension négative la décharge se développe plus facilement (la cathode fournit les électrons germes) et sur des longueurs moyennes plus élevées entre le métal et l'isolant qu'en tension positive.

Les figures 3.8 à 3.11 montrent la grande sensibilité des mesures réalisées par voie optique. Les mesures électriques sont caractérisées par un bruit de fond très faible (environ 0,2pC) obtenu grâce au transformateur d'alimentation à faible niveau de DP (figure 2.12) et au blindage de la salle d'essai. Pour les décharges d'amplitude > 1 pC, la corrélation entre signaux optiques et électriques est clairement observée, avec toutefois une dispersion statistique assez large. Cette dispersion augmente avec la pression et elle peut varier de 15% à 1,5 bar, pour atteindre 40% à 4,5 bar. Pour les DP < 1 pC, la dispersion s'accroît fortement et le nuage de points obtenu ne permet plus d'établir de corrélation entre lumière et charge des DP. Il est très probable que le bruit de fond intrinsèque du PM soit à l'origine de ce phénomène. La sensibilité limite de détection optique est donc d'environ 1pC.

Comme les décharges négatives, contrairement au cas des décharges positives, apparaissent dans toute la gamme de pression et de tension étudiées et que, de plus, la variation du signal du PM avec la charge de la DP est approximativement identique pour les deux alternances de la tension appliquée, nous avons choisi d'établir la relation entre la charge et la lumière émise

en utilisant uniquement les décharges de signe négatif. Par conséquent, dans les figures qui suivront les points expérimentaux représentés ne concerneront que les DP de signe négatif.

Influence de la nature du gaz

Une loi en puissance ($y=a \cdot x^b$) permet de suivre la variation charge-signal du PM pour les différentes tensions appliquées. Pour une pression donnée, les coefficients de cette loi dépendent de la nature du gaz (Figure 3.19 - Figure 3.22). Nous avons éliminé de graphique les valeurs de la charge inférieures à 0,8 pC dans le SF₆. Les figures 3.8-3.11 montrent que le domaine 0pC-0,8pC est bruité et les lois de puissance seront influencées par ces valeurs

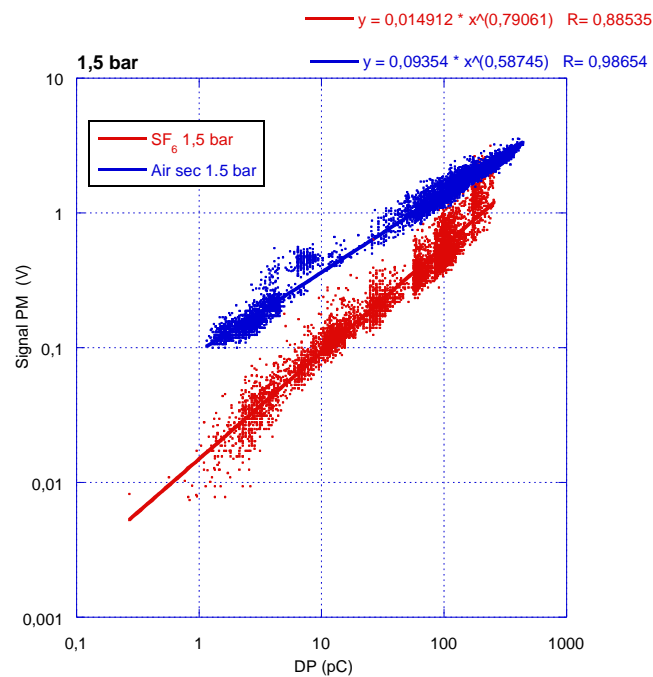


Figure 3.19. Variation de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSysystem dans le SF₆ et dans l'air sec. Pression utilisée : 1,5 bar.

La comparaison entre les gaz montre également que les très petites DP (0.2 - 1pC) observées dans le SF₆ sont pratiquement absentes dans l'air sec, pour lequel les valeurs minimum de DP sont d'environ 1pC.

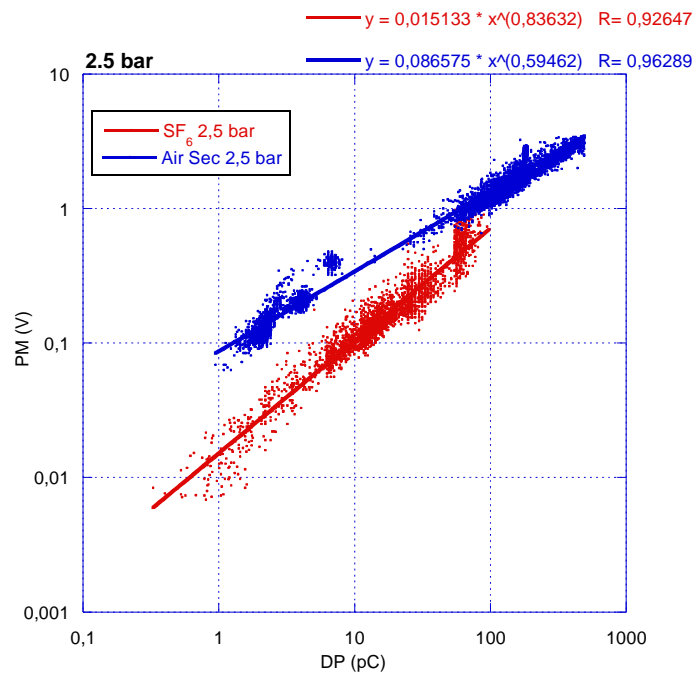


Figure 3.20. Variation de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSytem dans le SF6 et dans l'air sec. Pression utilisée : 2,5 bar.

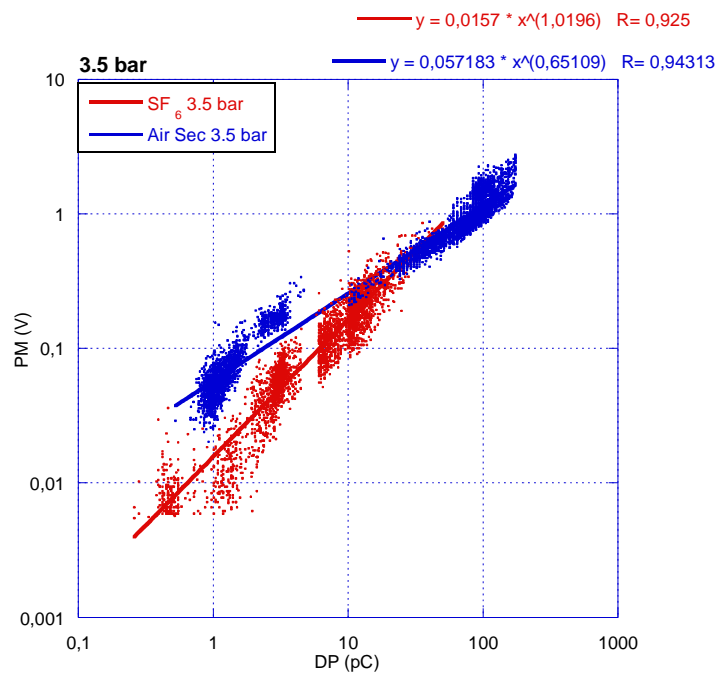


Figure 3.21. Variation de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSytem dans le SF6 et dans l'air sec. Pression utilisée : 3,5 bar.

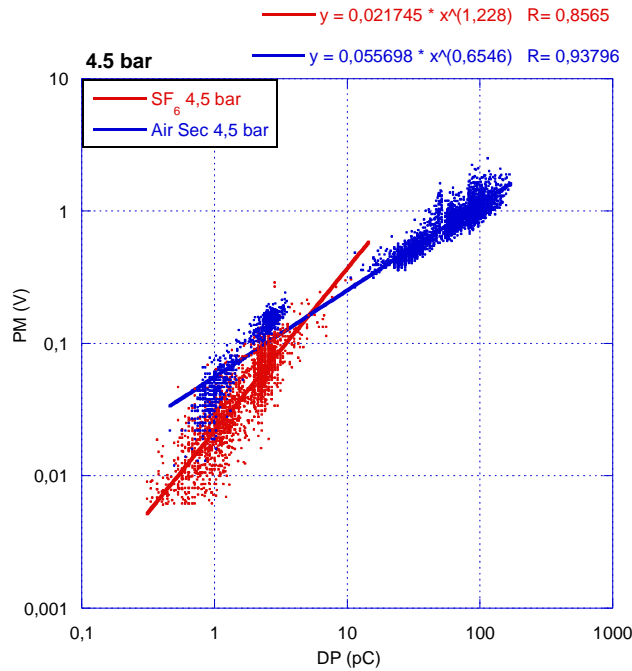


Figure 3.22. Variation de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSystem dans le SF6 et dans l'air sec. Pression utilisée : 4,5 bar.

Influence de la pression

La loi en puissance permet de suivre la variation charge-signal du PM pour différentes tensions appliquées. Cette loi varie pour chaque valeur de pression (Figure 3.23 et Figure 3.24). Nous avons enlevé les valeurs de la charge < 0,8 pC pour le SF₆ et pour l'air, car le domaine est caractérisé par du bruit, comme on l'a vu antérieurement.

En règle générale, pour un phénomène d'excitation donné, l'augmentation de pression diminue le nombre de photons émis par ces états excités, car les phénomènes de désexcitations non radiatifs augmentent avec la fréquence des collisions.

Dans le cas du SF₆, le graphique semble montrer un effet contraire, les pentes des courbes augmentent en fonction de la pression. Ceci pourrait s'expliquer par l'augmentation de la tension requise pour déclencher une DP et donc par l'augmentation de l'énergie dissipée entraînant la formation de nouvelles espèces excitées. Notons cependant que la dispersion des points pour les différentes pressions est telle qu'une pente unique pourrait être utilisée.

Dans l'air sec, l'effet de la pression n'est pas mesurable. Toutes les courbes montrent quasiment la même pente pour les réponses en lumière pour les quatre pressions utilisées.

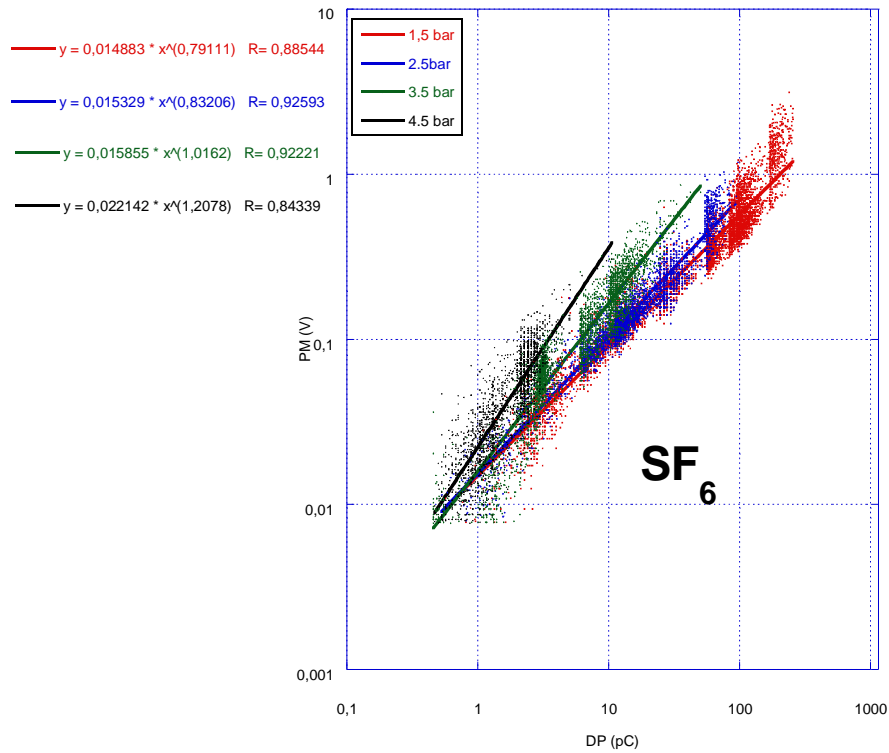


Figure 3.23. Variation en fonction de la pression de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSysSystem dans le SF₆.

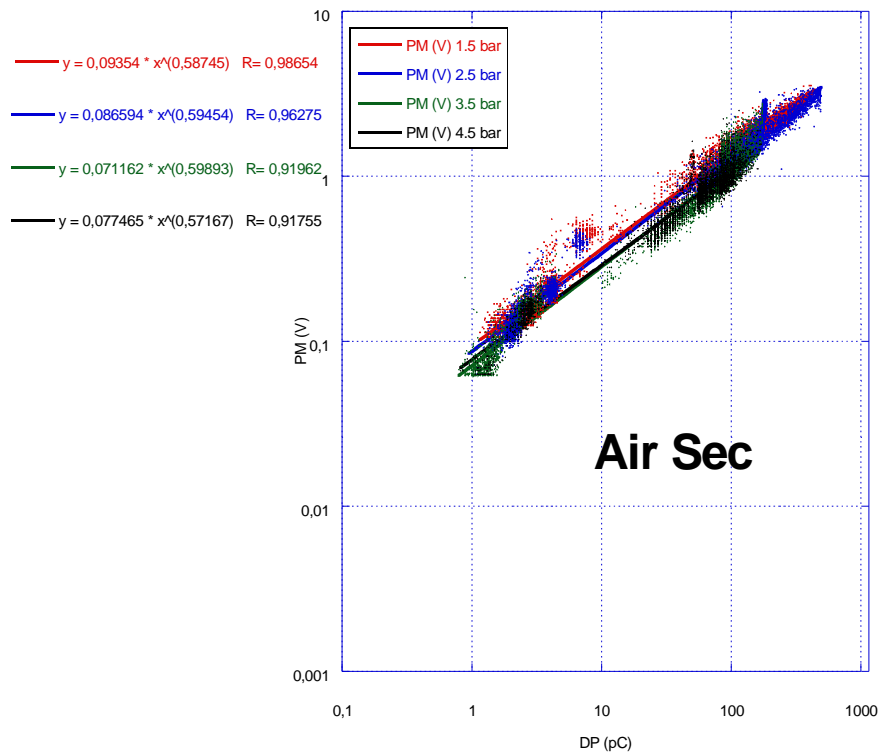


Figure 3.24. Variation en fonction de la pression de la réponse du PM en fonction des mesures de l'ICMSysSystem dans l'air sec.

Influence du vieillissement de l'isolant

Afin de vérifier l'influence du vieillissement de l'isolant sur les courbes d'étalonnage, nous avons comparé les résultats obtenus dans l'air sec à 2,5 bar avec des isolants en résine époxy identiques dont l'un a été utilisé dans les essais pendant trois ans (i.e. qu'il a subi de nombreux claquages et un grand nombre de décharges partielles autour du PT) et, l'autre est un isolant neuf n'ayant jamais servi.

Les nuages de points sont quasiment identiques ainsi que les deux courbes de régression (Figure 3.17). Les pentes des courbes sont très peu différentes. Notons cependant que la zone 1-10 pC présente une dispersion plus élevée avec l'isolant neuf qu'avec l'isolant vieilli.

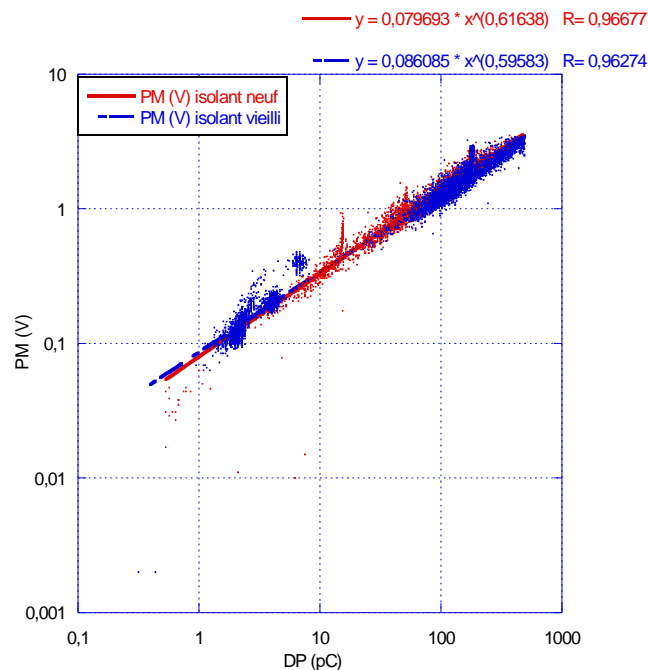


Figure 3.25. Comparaison des calibrations réalisées avec deux isolant en époxy dont un vieilli et l'autre neuf. Gaz : Air sec. Pression : 2,5 bar.

3.1.3. Influence de la nature de l'isolant solide sur les DPs

L'étude réalisée par Tran Duy[45] avec la cellule AREVA a comporté des mesures non seulement avec un isolant en résine époxy mais également un isolant en polytetrafluoroethylene (PTFE ou Téflon[®]). Les résultats montrés dans le Tableau 3-2

montrent que le domaine où se les DP produisent est quasi-inexistant en utilisant le PTFE. L'écart entre U_{DP} et U_b est toujours très faible dans les quatre configurations gaz-pressure utilisées. Ceci est une conséquence de la faible permittivité $\epsilon_r=2$ du PTFE qui induit un renforcement de champ près du PT plus faible que celui produit par l'isolant en résine époxy dont la permittivité est 2 fois plus élevée.

Pour l'isolant en PTFE où la tension d'apparition des DP U_{DP} est plus élevée que pour l'isolant en époxy, la tension de claquage U_b est également plus importante. Dans les études qui vont suivre, nous n'utiliserons plus que des isolants en résine époxy qui seuls permettent de bien caractériser les régimes des DP avant l'apparition du claquage.

TABLEAU 3-2. RESULTAT DES MESURES DES TENSIONS U_{DP} ET U_b (KV), EN UTILISANT DEUX TYPES D'ISOLANT : PTFE ET EPOXY

		Téflon ($\epsilon_r = 2$)		Epoxy ($\epsilon_r = 4$)	
		U_{DP} (kV)	U_b (kV)	U_{DP} (kV)	U_b (kV)
N_2	1,5 bar	50	51	30	45
	2,5 bar	63	63	44	48
SF_6	1,5 bar	103	105	54	71
	2,5 bar	150	150	85	98

3.2. Mesures en tension impulsionnelle

La forme de l'impulsion utilisée est $0,4/1000\mu s$. Dix mesures ont été faites pour chaque palier de tension. On note, pour chaque essai, les valeurs de la réponse du PM pour chaque DP ainsi que le nombre des décharges produites (plusieurs décharges peuvent apparaître en particulier pendant le front descendant de la tension de durée importante).

Nous allons décrire les résultats obtenus avec les deux gaz étudiés SF_6 et Air Sec.

3.2.1. Résultats avec le SF_6

Pour la calibration lumière-charge faite dans le chapitre précédant, nous n'avons utilisé que les décharges négatives à cause de la répartition plus large de leurs amplitudes en fonction de

la tension. Nous n'avons pas observé de différences importantes entre les valeurs de la lumière des décharges de deux signes, et les distributions sous tension alternative sont également pratiquement symétriques. Nous avons donc choisi d'utiliser uniquement des impulsions de polarité négative avec le SF₆.

Sous impulsion de tension, la probabilité d'apparition des décharges a été étudiée en fonction de la tension appliquée, pour différentes pressions du gaz.

Le protocole que nous avons utilisé consiste en :

- appliquer 10 impulsions, avec une pause entre celles-ci d'environ 30s, pour la même valeur de tension.
- Pour chaque impulsion, on note le nombre des DPs et leurs valeurs mesurées par le PM.
- Ensuite, de monter la valeur de tension et de répéter l'application des 10 impulsions.
- Pour chaque pression de gaz utilisée (de 1,5 à 4,5 bar), l'isolant a été laissé se décharger pour au moins 24h.

Un exemple d'enregistrement de l'oscilloscope est montré dans la Figure 3.26.

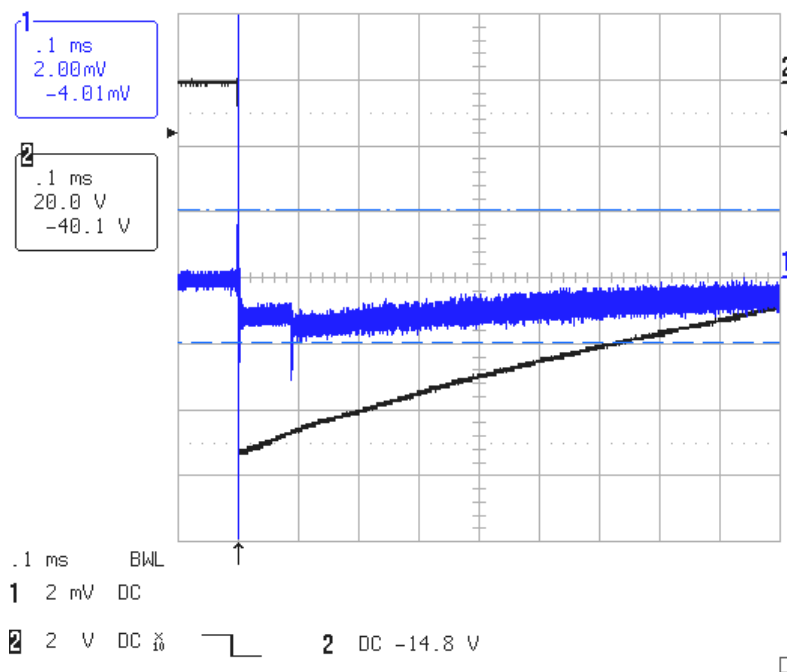


Figure 3.26. Enregistrement de l'oscilloscope avec la réponse du PM (en bleu) suite à l'application d'une tension impulsionnelle (en noir). SF₆, 1,5 bar.

La probabilité d'apparition des décharges partielles pour des pressions de 1,5 à 4,5 bar est montrée sur la Figure 3.27. On observe que pour une probabilité de décharge faible (<0,1-

0,2), des décharges très aléatoires apparaissent sur un domaine en tension d'autant plus grand que la pression du gaz est plus élevée : 10 kV pour 1,5 bar à plus de 70 kV pour 4,5 bar.

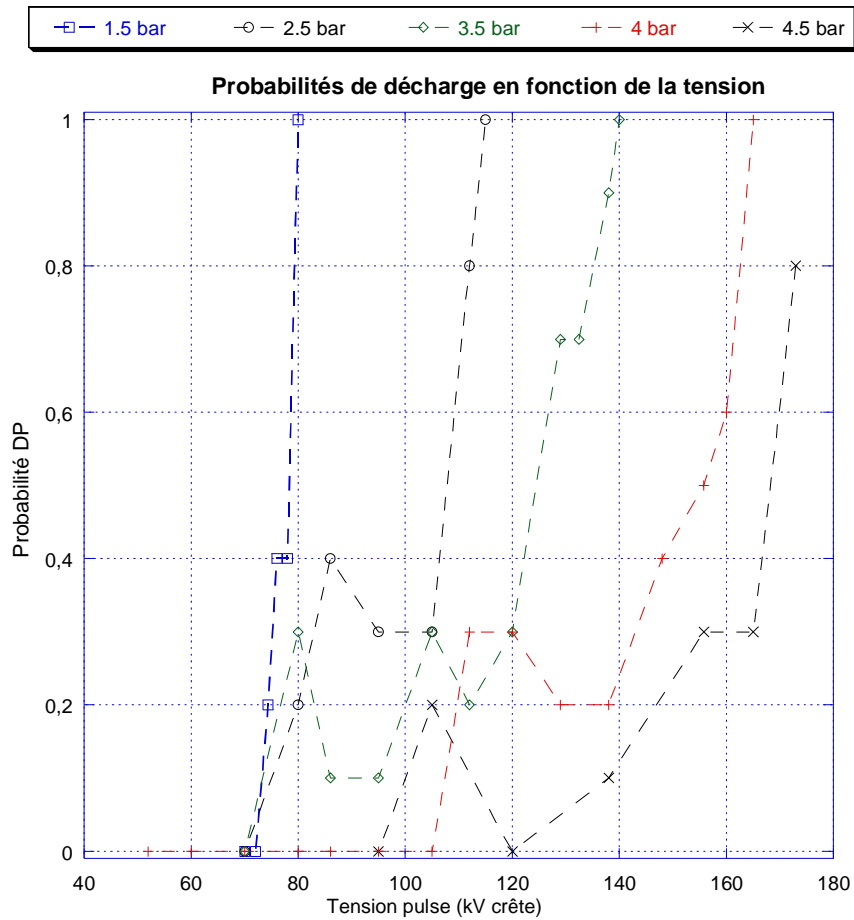


Figure 3.27. Probabilités d'apparition des décharges en fonction de la tension appliquée

Il est intéressant de constater que pour une probabilité de 1, les tensions augmentent régulièrement avec la pression (de 80 à 170kV entre 1,5 et 4,5 bar). Par contre, pour des faibles probabilités, l'influence de la pression est beaucoup plus faible. Par exemple, pour une probabilité de 0,2, les tensions sont pratiquement identiques à 1,5, 2,5 et 3,5 bar (environ 75kV).

Les résultats obtenus sont également présentés sous les formes suivantes :

- amplitude moyenne des décharges (en pC) en fonction de la tension (Figure 3.28) ;
- somme des amplitudes des décharges (en pC) en fonction de leur tension d'apparition (Figure 3.29) ;
- nombre des décharges par impulsion en fonction de la tension (Figure 3.30)
- nombre des décharges par impulsion en fonction de la tension relative (tension/tension à 100% de probabilité (Figure 3.31) .

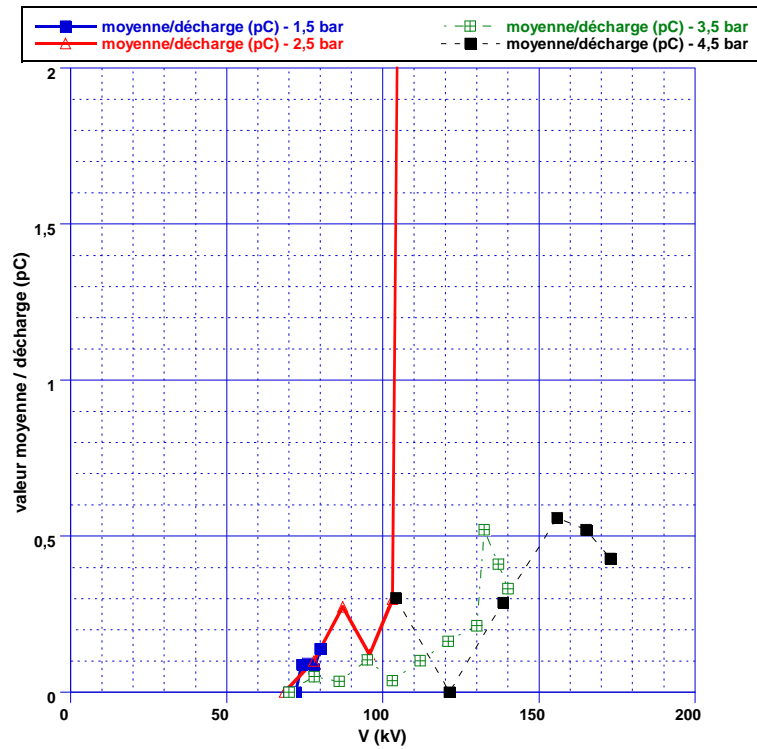


Figure 3.28. Résultats obtenus dans l'étude du point triple sous tension impulsionnelle dans le SF₆.
Valeur moyenne des décharges par impulsion en fonction de la tension ;

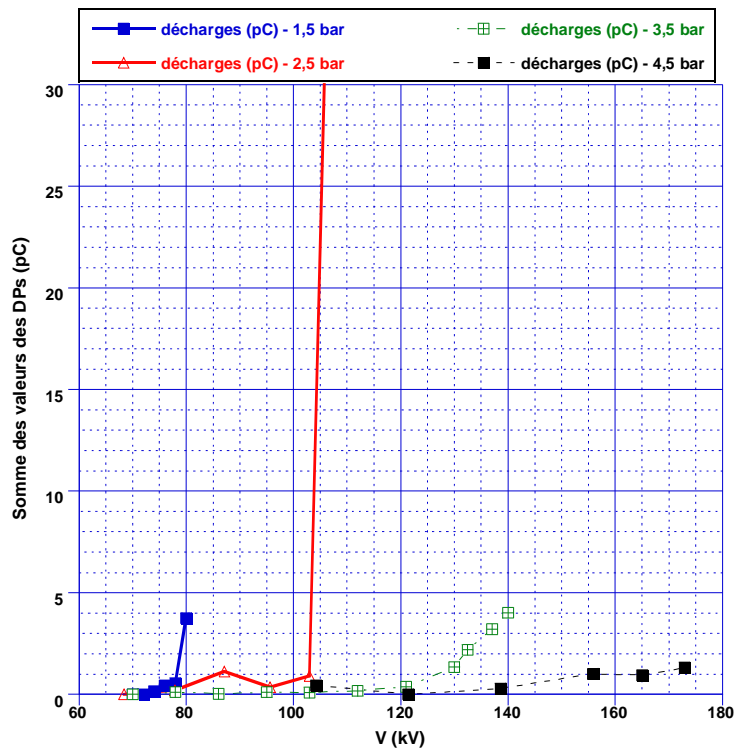


Figure 3.29. Résultats obtenus dans l'étude du point triple sous tension impulsionnelle dans le SF₆.
Somme des valeurs des décharges par impulsion en fonction de leur tension d'apparition.

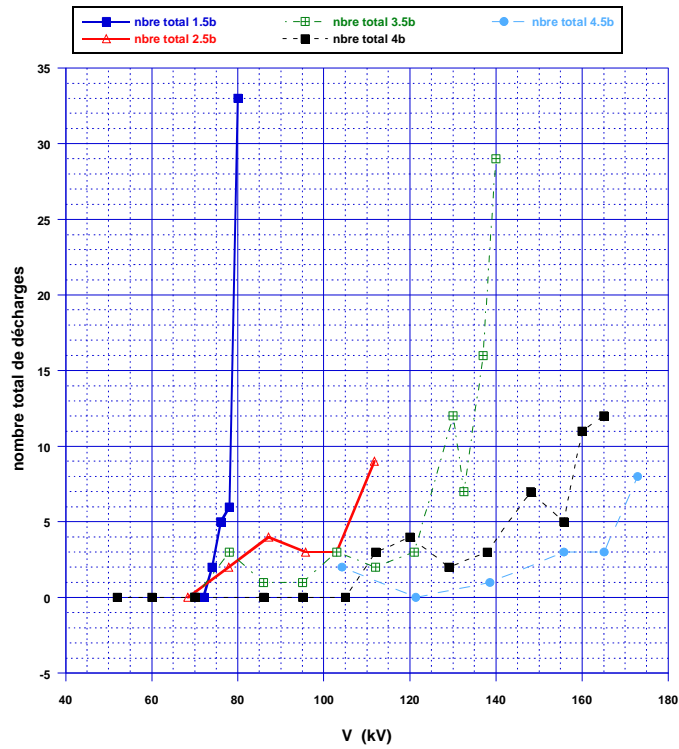


Figure 3.30. Résultats obtenus dans l'étude du point triple sous tension impulsionnelle dans le SF₆.

Nombre des décharges par impulsion en fonction de la tension d'apparition ;

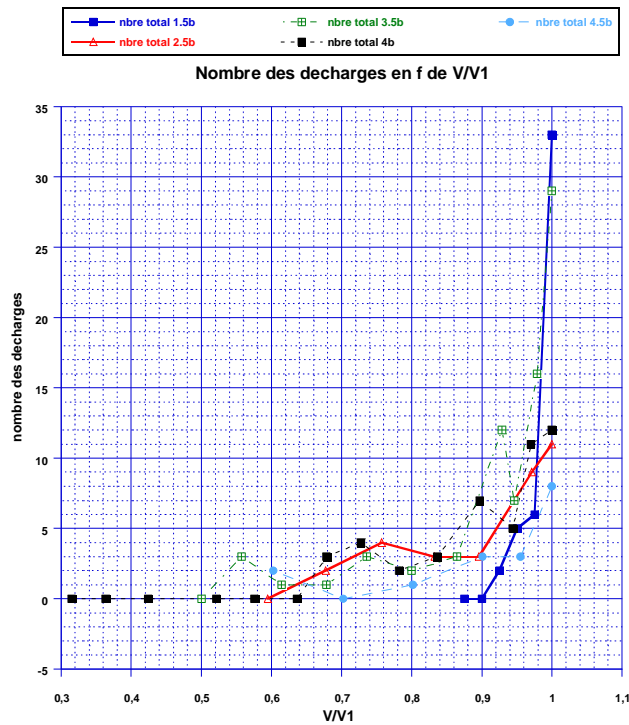


Figure 3.31. Résultats obtenus dans l'étude du point triple sous tension impulsionnelle dans le SF₆.

Nombre des décharges par impulsion en fonction du rapport de la tension à la tension de 100% probabilité ;

Nous avons également tracé la probabilité des décharges en fonction de la tension relative (i.e. normalisée par la tension où la probabilité est de 100% (Figure 3.32a) ainsi que la distribution de Weibull de ces probabilités (Figure 3.32b).

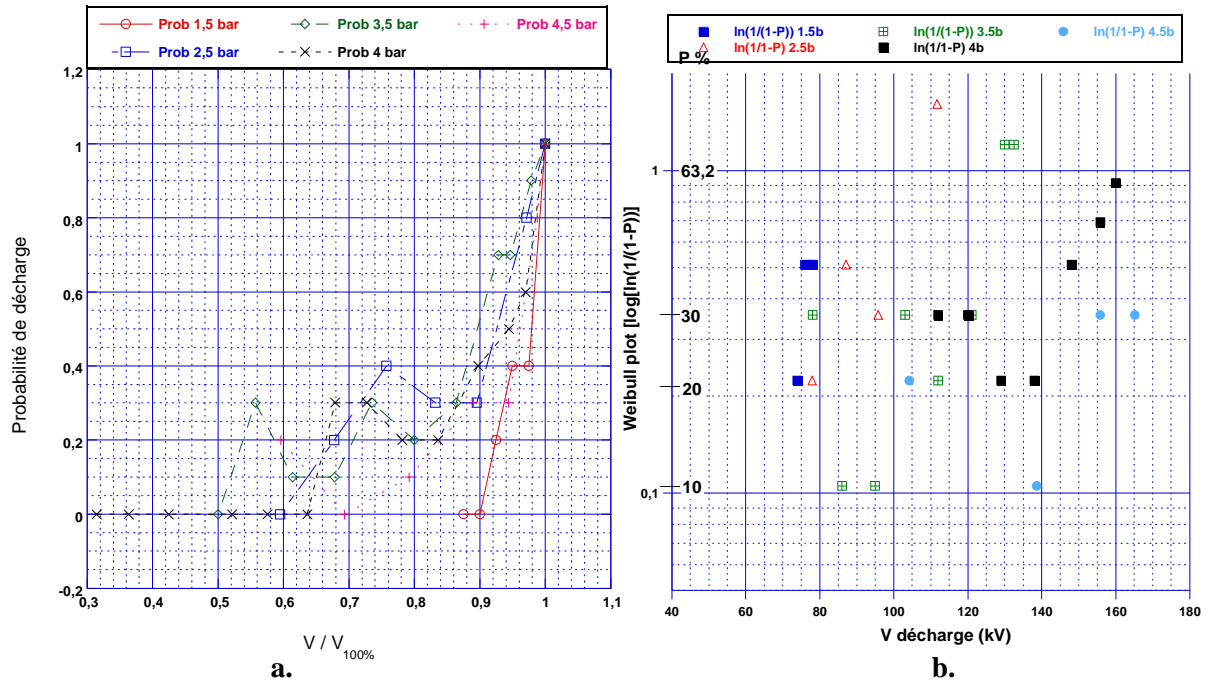


Figure 3.32. Résultats obtenus dans l'étude du point triple sous tension 0,4/1400µs :

a. probabilité en fonction de la tension normalisée par la tension à une probabilité de 100%

b. répartition de Weibull de ces probabilités

Ces mesures réalisées grâce au système de détection optique permettent de tirer les conclusions suivantes :

- L'amplitude des décharges mesurées sous impulsions répétitives est très faible, inférieure à 1 pC (Figure 3.28), ce qui est cohérent avec les mesures réalisés en tension alternative.
- Il n'y a pas d'influence nette de la pression sur l'amplitude des décharges (Figure 3.28)
- Par contre, l'amplitude de la somme des décharges par impulsion (Figure 3.29) diminue très nettement quand on augmente la pression.
- La Figure 3.30 confirme que l'augmentation de la pression joue un rôle important sur l'augmentation du nombre de décharges en fonction de la tension : l'augmentation est beaucoup plus lente à haute pression. Par exemple, la tension qui correspond à 10 décharges augmente fortement avec la pression. Ce résultat est cohérent aussi avec les mesures réalisées en tension alternative.

Les distributions de Weibull ainsi obtenues sont inexploitable. Il faudrait en effet multiplier le nombre d'essais pour obtenir des valeurs dans tout le domaine 0-1 de probabilités afin d'envisager une utilisation possible de cette distribution de Weibull. Ceci s'est avéré pratiquement impossible avec la méthode utilisée dans le temps de travail imparti.

3.2.2. Résultats avec l'air sec

Nous avons tenté de réaliser la même expérience, en utilisant le même protocole, avec l'air sec. Les premiers essais à la pression de 2,5 bar ont rapidement mis en évidence deux problèmes qui nous ont empêché de continuer ces mesures : un phénomène d'hystérésis important des tensions d'apparition des DP (non observé dans le SF₆), et une saturation rapide du PM due à des très grandes décharges produites dans la cellule de mesure.

La Figure 3.33 montre la comparaison entre les probabilités d'apparition des DP pour le SF₆ et pour l'air sec à cette pression. On observe, comme attendu, un décalage des courbes important entre le SF₆ et l'air sec. D'autre part, pour une probabilité de décharge faible, des décharges aléatoires apparaissent sur un domaine en tension plus grand pour le SF₆ que pour l'air sec (47 kV à comparer à 25 kV pour l'air sec).

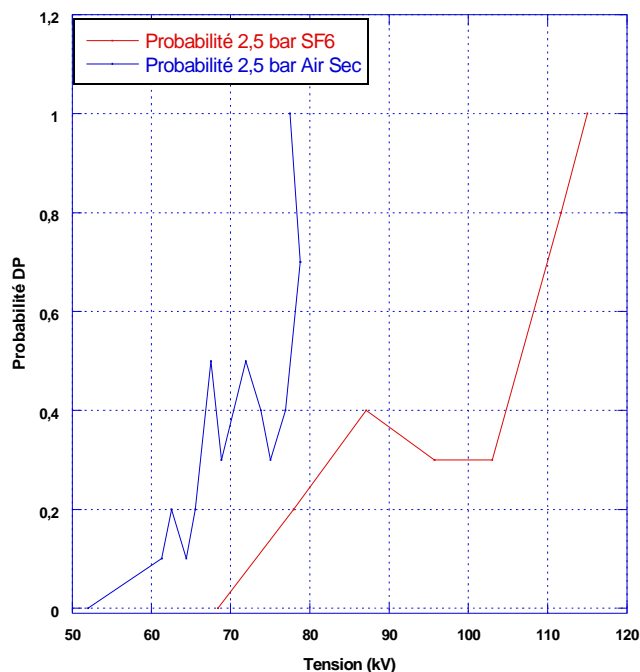


Figure 3.33. Probabilité d'apparition des décharges pour le SF₆ et l'air sec. P=2,5 bar.

Le Tableau 3-3 rassemble toutes les mesures effectuées dans l'air sec à la pression de 2,5 bar, en utilisant pour la transformation mV → pC, la formule décrite dans la Figure 3.20 :

$$y = 0,086575 \cdot x^{0,59462} \Rightarrow x(pC) = \left(\frac{y(V)}{0,086575}\right)^{-0,59462}$$

TABLEAU 3-3. ETUDE DES PROBABILITES DE DECHARGE POUR L' AIR SEC A 2,5 BAR

Numéro d'essai	U kV	Numéro d'impulsion																			
		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10	
		DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N	DP pC	N
1	42.6		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
2	52		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
3	61.3		0	2923	1		0		0		0		0		0		0		0		0
4	62.5		0		0	0,21	1		0	0,38	1		0		0		0		0		0
5	64.4	0,53	1		0		0		0		0		0		0		0		0		0
6	65.6		0		0	0,92	1		0	0,28	1		0		0		0		0		0
7	67.5		0	1,01	1		0		0	0,26	1	0,34	1	0,34	1		0		0	0,56	1
8	68.8		0		0		0		0		0	0,12	1	2010	1	2,88	1		0		0
9	71.9	0,41	1		0	3969	1		0	11	1	0,38	1		0		0		0	0,14	1
10	73.8	17,26	1	0,17	1	14,87	1		0		0		0		0		0		0	2010	1
11	75	95	1		0		0		0		0		0		0	1,74	1	37	1		0
12	76.9	576	1	0,14	1		0		0		0		0	0,17	1		0		0	0,54	1
13	78.8		0		0	5773	1	5773	1	+9356	1	+9356	1	+9356	1	+9356	1	+9356	1	+9356	1
14	77.5	+9356	1	7839	1	7477	1	7839	1	7839	1	8200	1	7913	1	7839	1	8208	1	8813	1
15	72.5	2358	1	2634	1	2458	1	2404	1	2314	1	2458	1	1926	1	2095	1	2010	1	1959	1
16	60.6		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0
17	63.8		0		0		0		0	0,04	1		0		0		0		0		0
18	68.8	561	1	526	1	427	1	478	1	273	1	140 92	2	353	1	431	1	480	1	266	1

L'analyse des résultats rassemblés dans ce tableau nous permet de faire les remarques suivantes :

- Pour la grande majorité des décharges observées jusqu'à une tension de 76,9kV, le signal du PM est toujours inférieur à 100pC, à l'exception de 4 valeurs apparaissant en italique dans le tableau ;
- Pour des tensions supérieures à 76,9kV, le signal du PM saute brutalement à des valeurs très élevées ~9000pC (15-20 V) proches de la valeur à saturation du PM ;
- Dans cette configuration "gaz-pression-géométrie", le phénomène d'hystérésis de la tension d'apparition des DP (Figure 3.34) est pour la première fois observé (valeurs en gras dans le Tableau 3-3, à partir le 14^{ème} essai). En diminuant la valeur des paliers de tension appliquée (à 72,5 kV) nous retrouvons des probabilités d'apparition des DP plus grandes que pour des valeurs de tension plus importantes (78,8 kV).

Dans un premier temps, nous avons attribué ce phénomène d'hystérésis à une modification de l'état de surface de l'isolant et/ou de l'électrode suite aux décharges et claquages précédents. Nous aborderons plus en détail ce phénomène dans le chapitre suivant en étudiant une configuration de PT comportant un défaut.

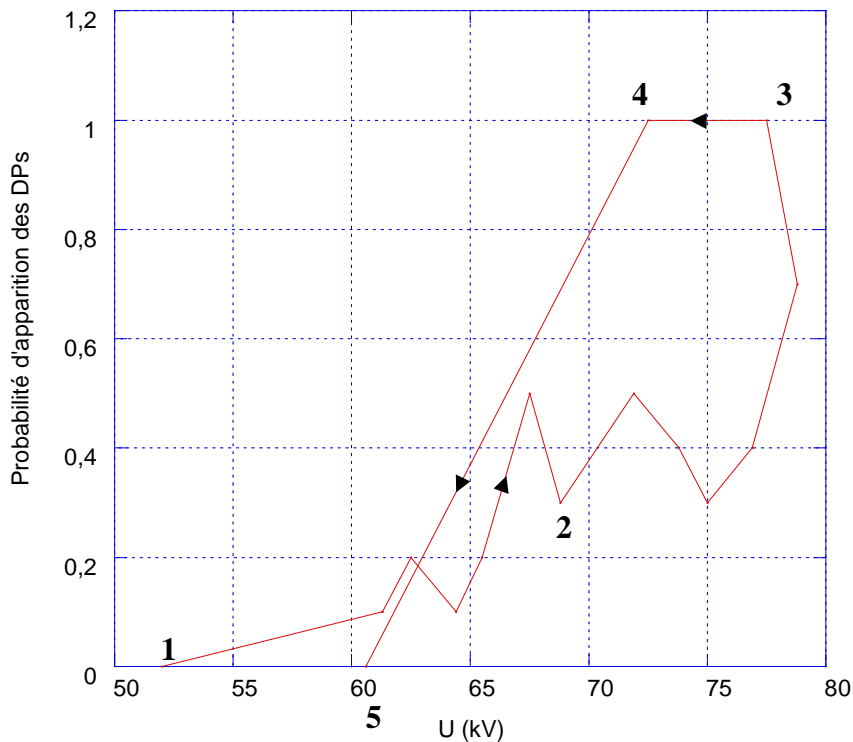


Figure 3.34. Phénomène d'hystérésis de la probabilité d'apparition des DPs dans l'air sec à 2,5 bar.

3.2.3. Caractérisation visuelle des DPs

A l'aide de la caméra CCD et de l'amplificateur d'image, nous avons visualisé les phénomènes lumineux produits par les DPs sous tension impulsionnelle en fonction de la valeur de la tension et de sa polarité. Nous n'avons pu réaliser ces essais que dans l'air sec. Les décharges dans SF₆ sont de plus petite amplitudes, et beaucoup moins lumineuses (sur les courbes de calibration, la réponse en lumière dans le SF₆ pour les mêmes valeurs des DPs est 10 fois moins importante). En augmentant la sensibilité de la caméra CCD, son bruit de fond augmente également, et il n'est plus possible de distinguer les décharges (peu nombreuses et lumineuses dans le SF₆) du bruit du fond de la caméra.

Existence de DPs « parasites » dans l'air en polarité négative

Les premiers essais ont été effectués en appliquant une tension négative sur l'électrode centrale. A une certaine valeur de la tension, des spots lumineux (i.e. des DPs) apparaissent comme attendu dans la zone du point triple mais, dans certains cas, on observe également une tache lumineuse située au centre de l'électrode HT (Figure 3.35) où se trouve un trou taraudé (de diamètre 4mm qui sert à extraire l'ensemble électrode+isolant).

Dans une série de 10 applications successives d'une impulsion de tension de -96,9kV, on observe à chaque fois une tache lumineuse au centre de l'électrode alors que des décharges dans la zone du PT n'apparaissent que dans trois cas sur 10.

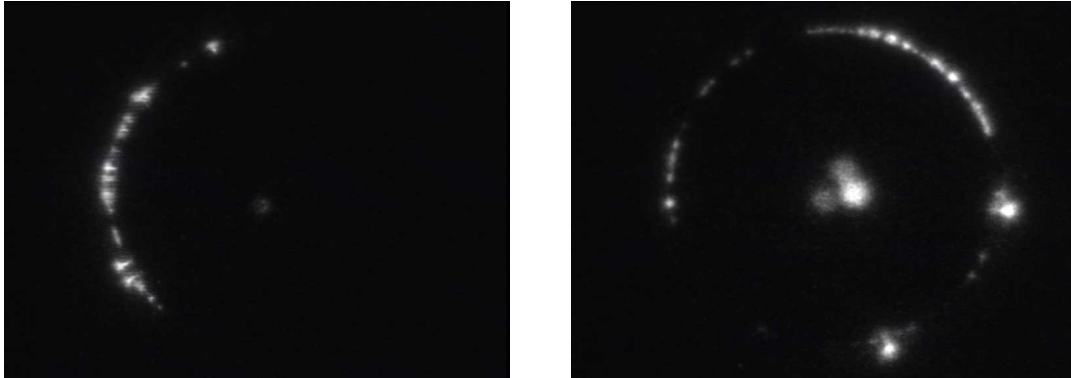


Figure 3.35. Décharges apparaissant au PT et sur l'électrode centrale à -82,8kV et -112.5kV ;
Gaz : Air Sec; Pression 4,5 bar

Par contre, en appliquant une impulsion de tension positive sur l'électrode centrale, on n'observe que des taches lumineuses dans la zone du point triple et ceci jusqu'au claquage final (Figure 3.36).

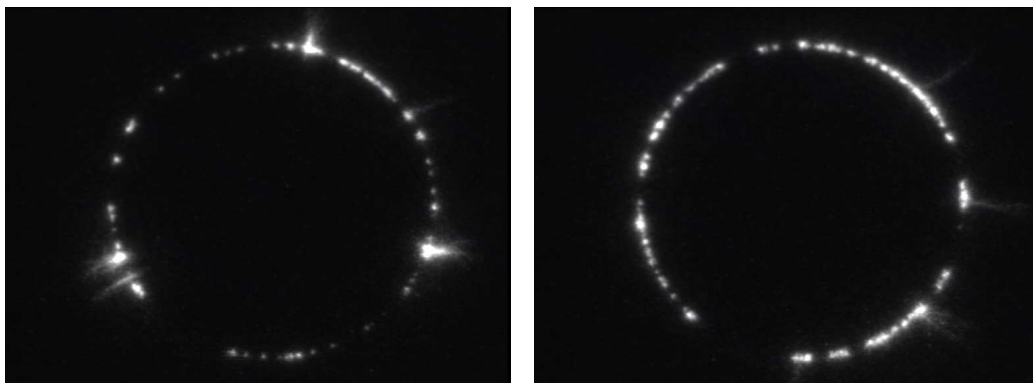


Figure 3.36. Décharges partielles apparaissant seulement au PT en tension impulsionnelle positive
(89.1kV et 93.1kV) ; Gaz : Air Sec; Pression 4,5 bar

Si des décharges négatives apparaissent au centre de l'électrode haute tension ceci indique que le champ local près du trou taraudé est suffisamment élevé pour induire une décharge.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons entrepris une simulation de la distribution du champ électrique (à l'aide du logiciel QuickField) autour de l'électrode centrale en incluant la présence du trou taraudé. Les résultats montrent effectivement un renforcement relativement important du champ au niveau de l'arête du trou taraudé (Figure 3.37). Il atteint une valeur de l'ordre de 100V/m pour 1V appliqué.

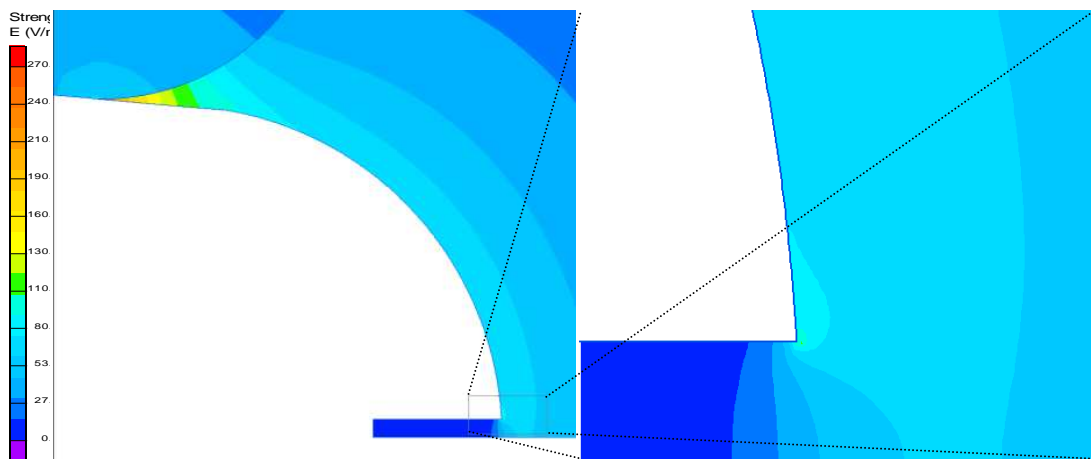


Figure 3.37. Résultats de la simulation du champ électrique dans la région du trou taraudé de l'électrode centrale ;
a. vue d'ensemble ; b. détail de la zone de l'arrête du trou.

Par rapport à la valeur 280 V/m (valeur maximale calculée du champ dans le PT) cela paraît moins important, mais il faut noter que nous ne connaissons pas la géométrie réelle de l'arête. La moindre protubérance peut générer des décharges couronne sous haute tension.

Pour éviter ces décharges parasites, nous avons collé sur le trou taraudé un morceau de ruban adhésif en aluminium. De cette manière, les DP's parasites ne se produisent plus (Figure 3.38).

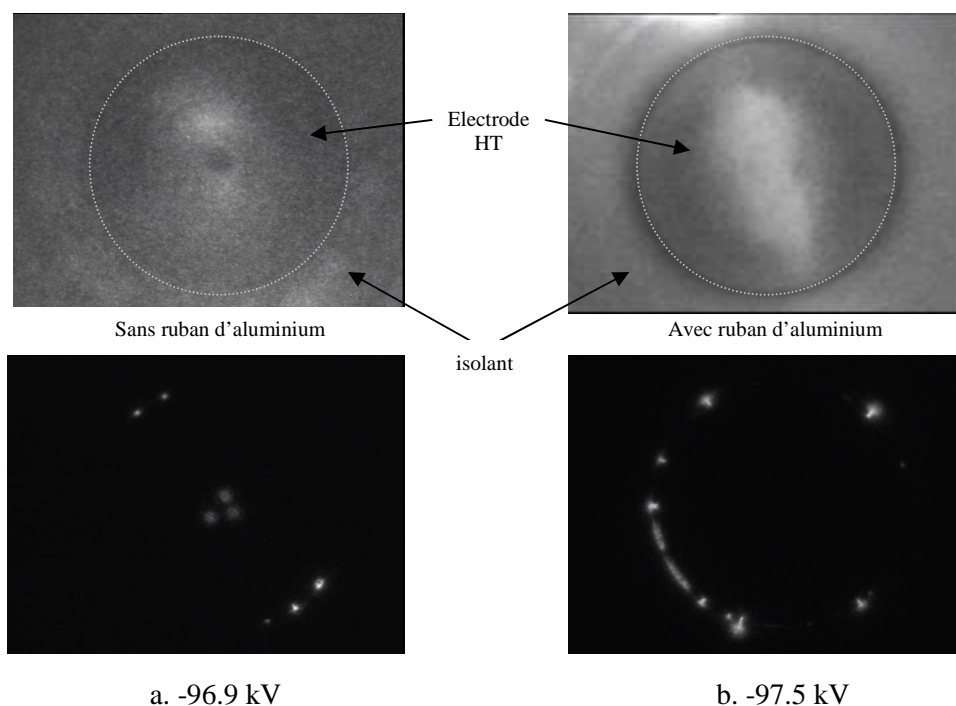


Figure 3.38. Images des décharges pour : a. sans ruban d'aluminium sur le trou central et, b. avec un ruban d'aluminium collé sur le trou central..

Caractérisation visuelle des DP en fonction de la polarité de la tension appliquée sur l'électrode HT

En règle générale, nous avons observé deux types principaux de DP aussi bien pour les décharges négatives que positives : des DP de longueur réduite se produisant entre l'électrode HT et l'isolant solide dans la région du PT et des DP plus longues qui se propagent plus ou moins sur la surface de l'isolant (Figure 3.39). Ces deux types de décharges ont été également observés sous tension alternative.

Les décharges se propageant sur la surface de l'isolant dépendent de la polarité de la tension appliquée sur l'électrode centrale. Les décharges négatives se propagent sur une zone réduite et bien définie de la surface de l'isolant alors que les décharges positives se présentent sous la forme d'une zone diffuse occupant une plus grande surface de l'isolant. Pour mieux observer ces différences, un agrandissement optique de la zone des DP a été réalisé (Figure 3.39).

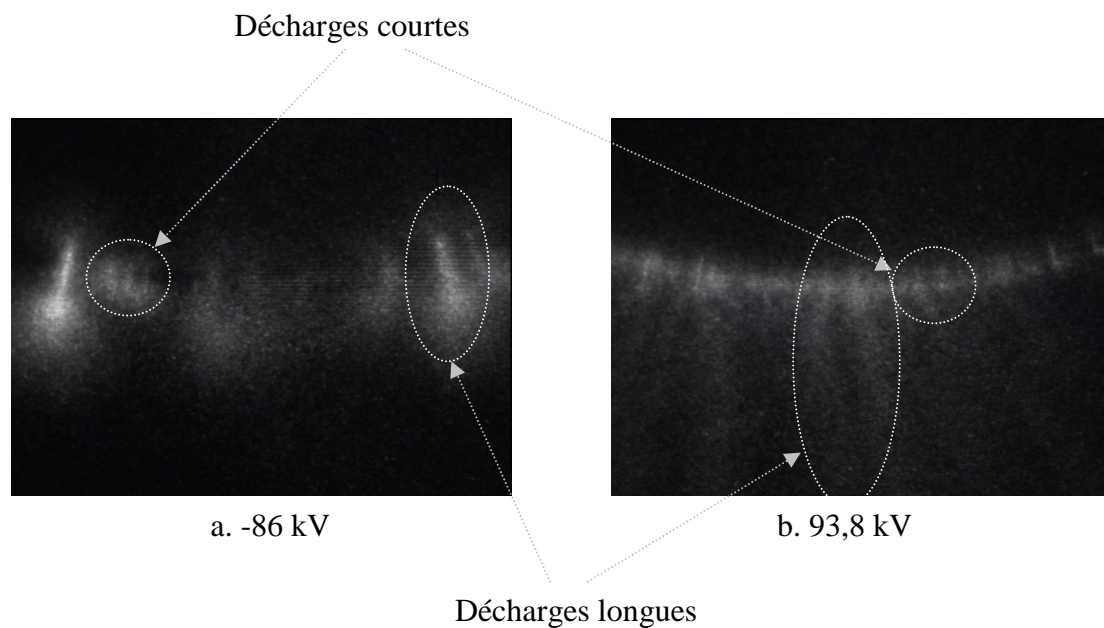


Figure 3.39. Détail de la zone du PT. Gaz : air sec ; pression : 2,5 bar.

a. décharges négatives ; b. décharges positives

Mise en évidence des phénomènes de dépôt de charge sur l'isolant solide

En utilisant des impulsions de tension, nous pouvons mettre en évidence et analyser l'influence du dépôt de charge provoqué par une impulsion donnée sur les impulsions suivantes, soit de même polarité soit de polarité inverse. Nous avons ainsi mesuré (par mesure de la lumière émise, PM ou caméra) les tensions d'apparition des décharges en fonction de la

tension, de sa polarité et du temps de repos entre deux impulsions successives. Notons qu'un temps de repos $t_{rep} \geq 20$ heures est nécessaire pour que la surface de l'isolant en résine époxy soit entièrement déchargée, ce qui a grandement limité les possibilités d'essais. Tous les essais ont été effectués avec de l'air sec à une pression de 2,5 bar.

Des impulsions de tension de valeur croissante ont été appliquées jusqu'à l'apparition de décharges visibles à l'aide de la caméra CCD et/ou du photomultiplicateur. Après l'apparition des premières décharges, la polarité de la tension est inversée et la tension d'apparition des décharges est à nouveau mesurée.

Les tensions d'apparition des premières DP's sont tout d'abord mesurées avec des isolants déchargés ($t_{rep} \geq 20$ heures). Les valeurs obtenues sont les suivantes.

- - en tension négative : -62,5kV (8), -60,7kV (1), -65,6kV (2), -57,5kV (1) ; -47,5kV (1).
- - en tension positive : 67,2kV (8), 71,9kV (6), 68,1kV (3), 58,8kV (1), 76,6kV (2).

Entre parenthèses est indiqué le nombre de paliers de tension successifs appliqués requis pour atteindre la première décharge.

Si l'isolant est initialement déchargé et le premier palier de tension a une valeur suffisante pour produire des DP's, celles-ci vont apparaître sur une grande partie du PT. L'impulsion suivante de même valeur va produire des DP's dans la région du PT non concernée par les DP's précédentes. Lorsque toute la région du PT a subi des DP's, il devient impossible de produire de nouvelles décharges sans augmenter fortement la tension appliquée. Un exemple est montré dans la Figure 3.40. A la tension de -65,7kV dans l'air sec à 2,5 bar on observe des décharges tout autour du PT. Il faut alors augmenter la tension à une valeur de -87,5kV pour faire apparaître de nouvelles DP's.

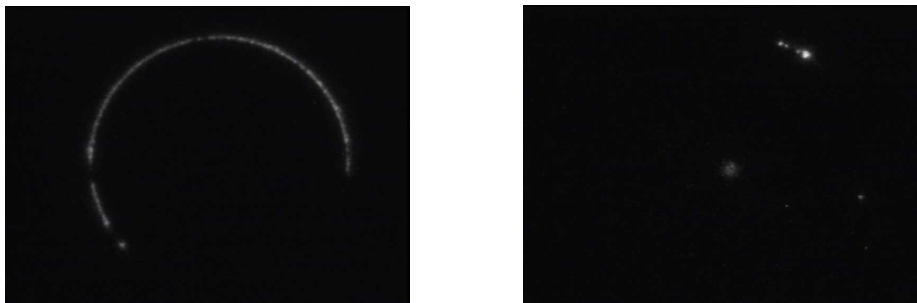


Figure 3.40. DP's sous tension impulsionnelle négative ;

a. Premières DP's apparaissant à -65,7 kV ; b. Les DP's n'apparaissent plus jusqu'à -87,5 kV

Impulsions successives de même signe

En augmentant la tension sans changer son signe avec un temps de 1mn entre deux impulsions successives, les éventuelles décharges qui apparaissent ne sont pas localisées au même endroit. En effet, la surface de l'isolant au niveau des décharges se charge localement (avec le signe de la tension appliquée), et la distribution du champ électrique est modifiée dans cette zone du PT. En effet, le temps de repos d'environ 1mn entre deux impulsions ne permet pas l'élimination des charges accumulées sur la surface de l'isolant.

Le champ électrique local créé par les charges accumulées au niveau de l'impact des décharges sur l'isolant, qui s'oppose au champ appliqué, est suffisant pour empêcher d'autres décharges de se produire au même endroit. Les décharges apparaissent alors dans les régions non soumises aux décharges précédentes. Un exemple est montré dans la Figure 3.41. On observe que les décharges se produisent toujours dans des zones vierges (i.e. non touchées par une décharge précédente) au fur et à mesure de l'augmentation de la tension (Figure 3.41a, Figure 3.41b et Figure 3.41c). La somme des images des Figure 3.41a-c (Figure 3.41d) montre que la quasi-totalité de la zone du PT a subit des décharges.

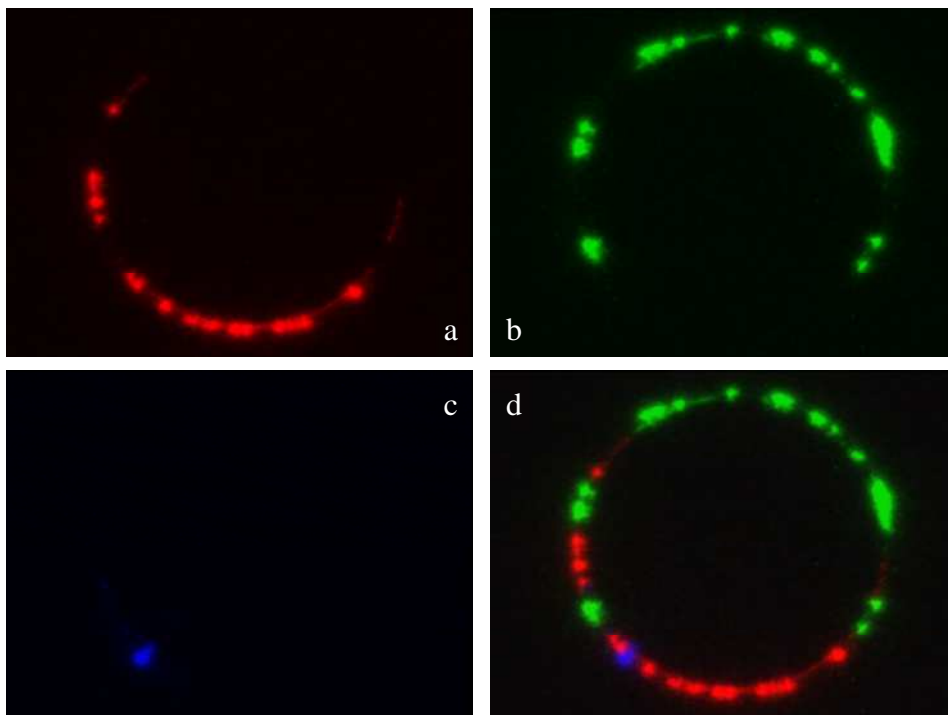


Figure 3.41. Zones du PT soumises aux décharges en fonction de la tension impulsionnelle négative :

a) -47,5kV; b) -58,1kV; c) -68,8kV ; d) somme des images précédentes.

Gaz Air Sec ; pression 2,5 bar

Impulsions de signe opposé

Lorsque des DP ont été générées dans une polarité, les tensions d'apparition des décharges mesurées après avoir inversé la polarité sont fortement réduites par rapport aux valeurs mesurées avec un isolant initialement déchargé. Voici quelques valeurs significatives que nous avons mesurées après inversion de la polarité de la tension soit de positif à négatif et de négatif à positif :

- - positif à négatif : -45,3kV (1) ; -26,6kV (1) ; -14,06kV (1) ; -12,8kV (1).
- - négatif à positif : +75 kV (1) ; 35,9kV(1) ; 17,8 (1) ; 22,5 (6) ; 16,6 (2).

Le phénomène apparaît d'une façon plus nette lorsque l'inversion de tension va du positif au négatif. A -12,8kV (la tension minimale que délivre le générateur de Marx), des décharges apparaissent dès le premier palier de tension appliquée. Des décharges sont peut-être possibles à des tensions encore plus faibles.

Notons qu'après inversion de la polarité de la tension, on retrouve le même phénomène que celui décrit précédemment. Pour une tension donnée, la première impulsion génère des DPs mais rarement la deuxième pour des tensions plus faibles que $U_{100\%}$.

Un exemple est montré dans la Figure 3.42. Après plusieurs DPs produites sous impulsions négatives, la polarité de la tension a été changée. La première impulsion appliquée a été de +75 kV. Pour avoir une deuxième décharge il a fallu monter à +84,4 kV.

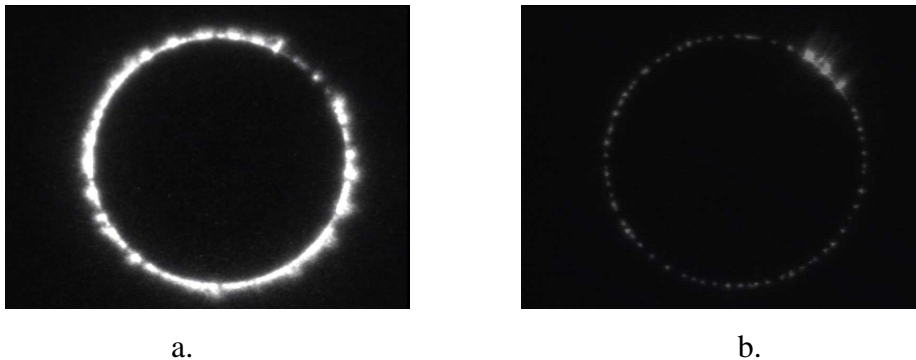


Figure 3.42. DPs sous tension impulsionnelle positive ;

a. Les premières DPs apparaissent à +75 kV ; b. Les DPs n'apparaissent plus jusqu'à +84,4 kV.

SF₆ à 2,5 bar

Simulation QuickField

L'influence de la charge déposée par les DPs sur la surface de l'isolant sur la répartition du champ électrique dans la région du PT est difficile à estimer quantitativement. Nous avons réalisé une série de simulations de la distribution du champ électrique en fonction de

différentes charges présentent sur l'isolant solide. Du fait des simplifications introduites (en particulier densité de charge uniforme) et des limitations du logiciel utilisé (géométrie de révolution), les résultats obtenus sont essentiellement qualitatifs.

Si l'isolant n'est pas chargé, le champ maximal au point triple est d'environ 280 V/m pour 1 V appliqué sur l'électrode (Figure 3.43a).

Le renforcement du champ au point triple s'annule lorsque la valeur de la charge atteint 1nC/m^2 pour 1V appliqué. Les renforcements de champ sont alors déportés vers d'autres régions mais sans atteindre les valeurs initialement présentes au PT (Figure 3.43b).

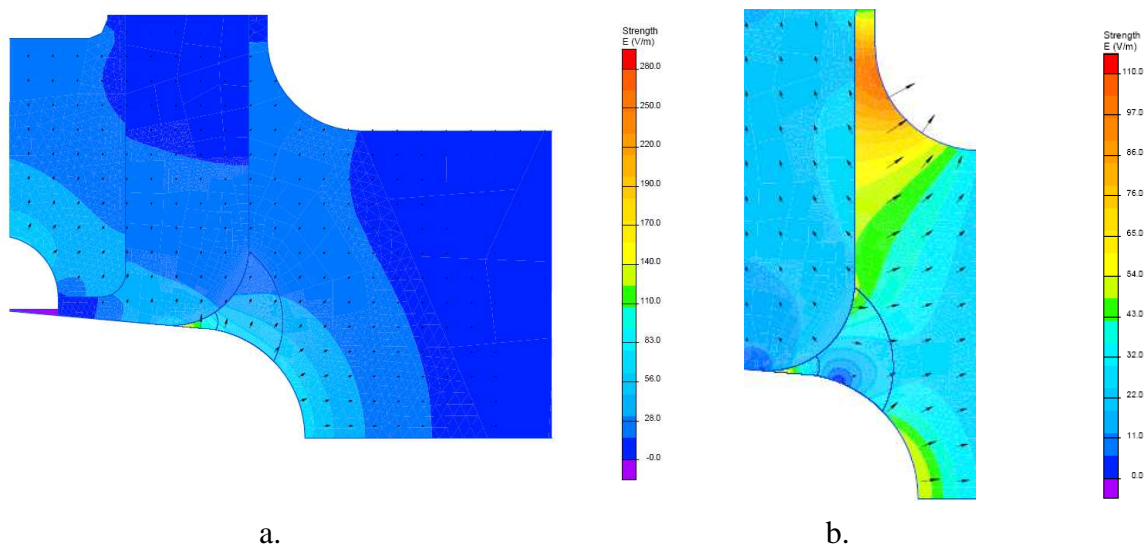


Figure 3.43. L'effet de la charge de surface sur le champ, autour du PT pour 1V. Simulation.
a. sans charge ; b. charge de surface déposée : 1 nC/m^2

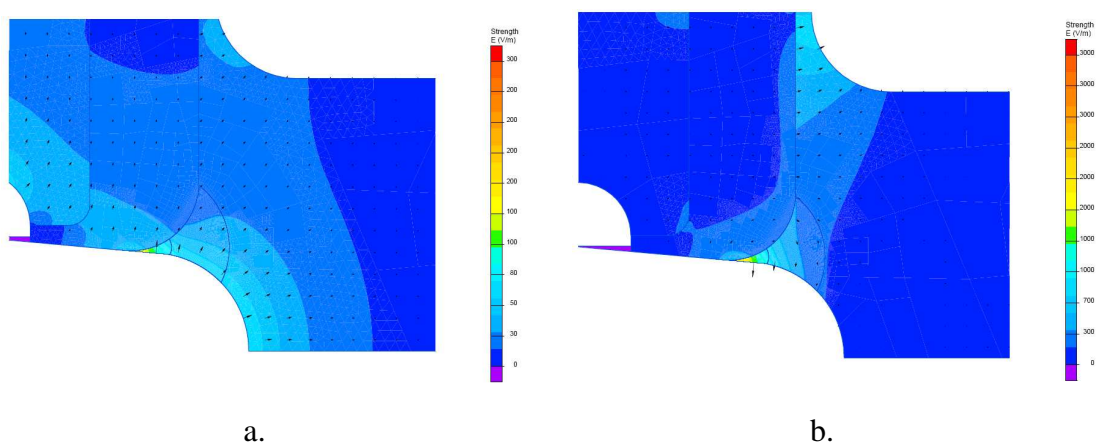


Figure 3.44. L'effet de la charge de surface sur le champ, autour du PT pour 1V. Simulation.
a. $0,1\text{ nC/m}^2$; b. 10 nC/m^2

Avec une charge d'un ordre de grandeur inférieur ($0,1 \text{ nC/m}^2$), le champ reste quasi-identique à celui calculé sans charge (Figure 3.44a). En augmentant la charge à 10 nC/m^2 , les lignes de champ s'inversent elles sont alors dirigées vers l'électrode (Figure 3.44b).

Logiquement, si la surface de l'isolant est chargée avec une charge de signe opposé à celui de la tension appliquée, le renforcement du champ au point triple augmente (Figure 3.45).

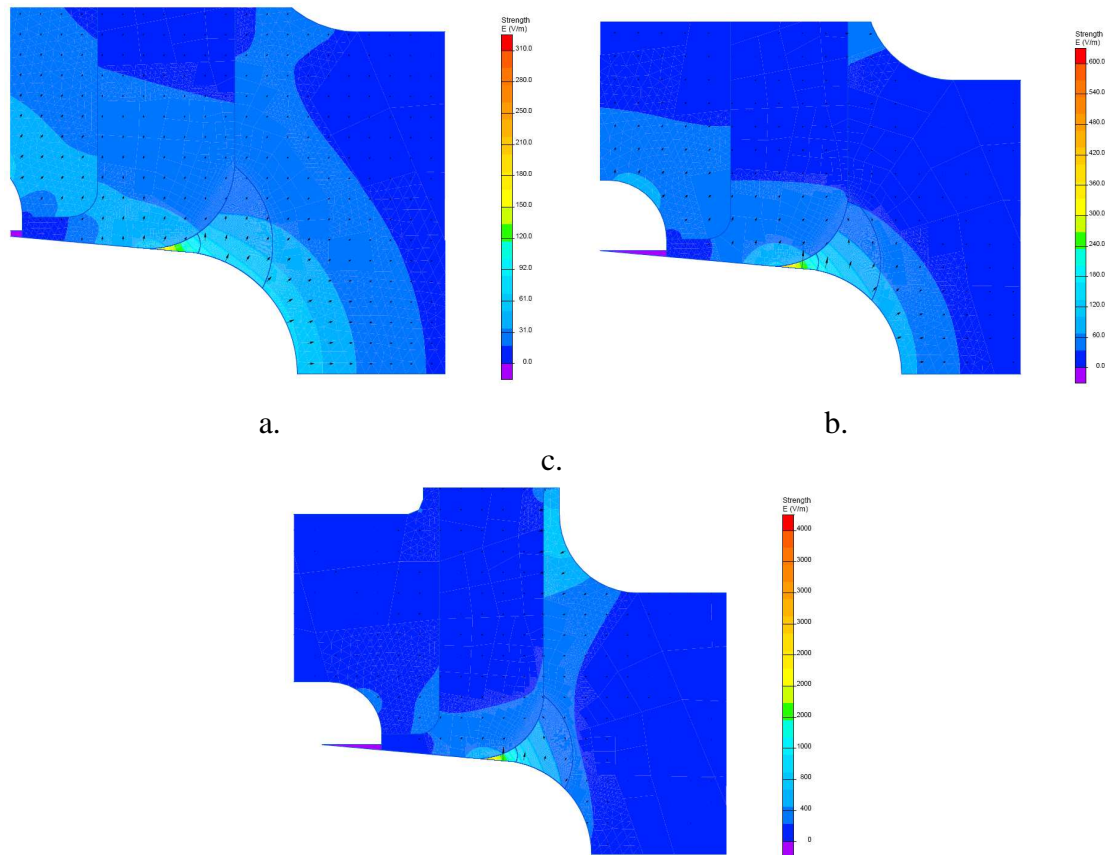


Figure 3.45. L'effet de la charge de surface sur le champ, autour du PT pour 1V. Simulation.

a. $-0,1 \text{ nC/m}^2$; b. -1 nC/m^2 ; c. -10 nC/m^2

Une simulation automatisée, réalisée avec le logiciel FEMM montre la valeur du champ électrique à des distances fixes à partir du PT pour différentes valeurs de la charge déposée sur l'isolant (Figure 3.46). Le champ est considéré comme positif lorsqu'il a la même direction que dans le cas sans charge déposée.

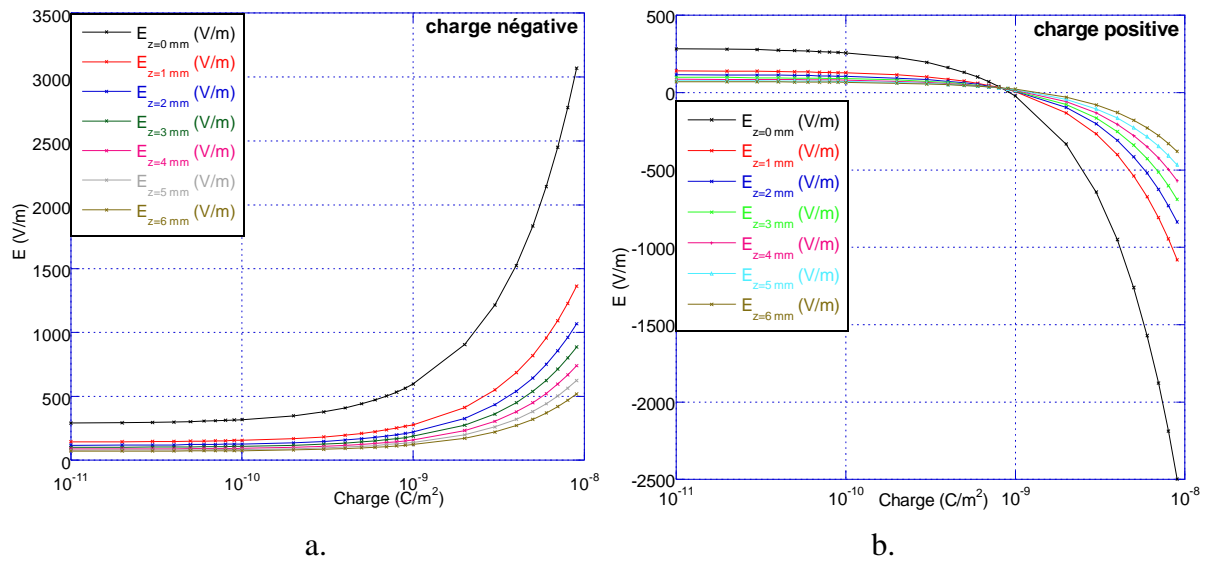


Figure 3.46. Le champ électrique en fonction de la charge déposée sur l'isolant pour différents points à partir du PT, en appliquant 1 V sur l'électrode centrale.
 a. Charge déposée négative ; b. Charge déposée positive.

On observe encore que pour environ $+1\text{nC/m}^2$ de charge de surface déposée, le champ pour une tension positive de 1V s'annule à tous les points à partir du PT. Si on représente la valeur du champ en fonction de la distance au PT (Figure 3.47a), on observe mieux le fait que vers la valeur de 1nC/m^2 de charge positive déposée sur l'isolant l'effet de renforcement du champ au PT s'annule.

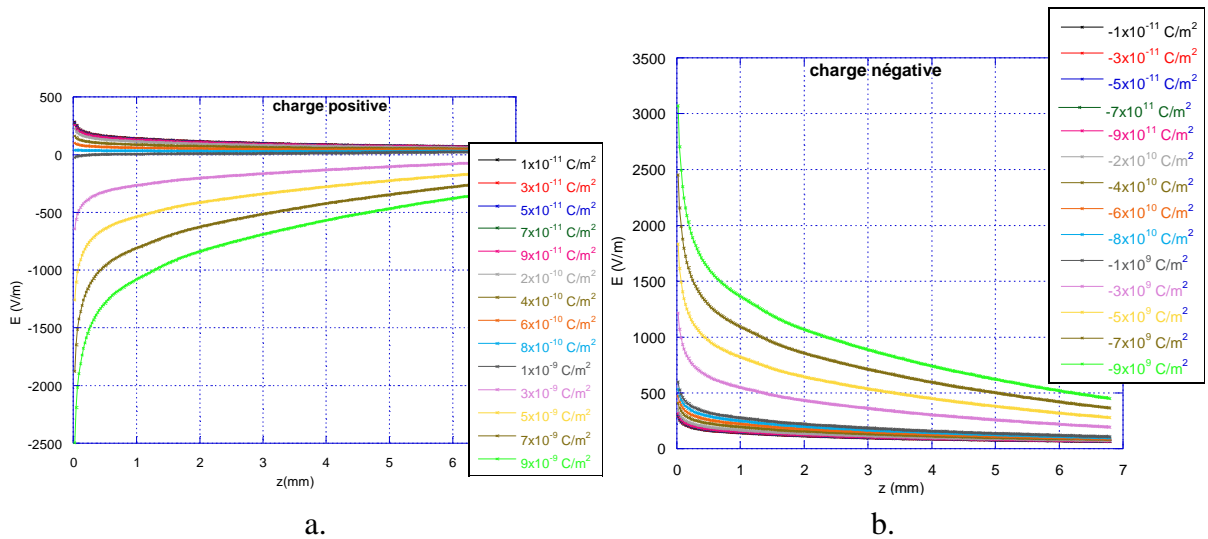


Figure 3.47. Le champ électrique en fonction de la distance du PT pour différentes valeurs de charges déposées sur la surface de l'isolant, en appliquant 1 V sur l'électrode centrale.
 a. Charge déposée négative ; b. Charge déposée positive.

Lorsque la charge déposée est de signe inverse à celui de la tension appliquée, le renforcement du champ augmente tout au long du PT (Figure 3.47b).

Toutes ces simulations sont réalisées pour 1V appliqué alors que les décharges se produisent pour des tensions de quelques dizaines de kV. On peut en conclure que les charges déposées par les DPs doivent atteindre des valeurs de quelques dizaines de $\mu\text{C}/\text{m}^2$ pour pouvoir modifier de façon importante la distribution des lignes de champ. Expérimentalement, ce sont effectivement l'ordre de grandeur des valeurs mesurées par les auteurs qui ont étudié les charges déposées sur les isolants par des décharges partielles [42]. Ces valeurs sont très difficiles à prédire à partir des simples mesures de DP, étant donné que :

- ce sont des valeurs de charge apparente qui sont mesurées (différentes de la quantité de charges physiquement mise en jeu dans la DP) ;
- on ne connaît pas précisément la surface d'impact réelle de la DP sur l'isolant.

Ces résultats montrent de nouveau la difficulté de prédire les phénomènes dans cette géométrie. Les décharges partielles apparaissant à cause du renforcement du champ au PT, déposent des charges sur la surface de l'isolant qui ne s'écoulent pas vers la masse pendant un temps long (plusieurs heures).

En appliquant une tension de signe opposé à ces charges, la valeur de la tension d'apparition des DPs décroît fortement. En appliquant une tension de même signe, la valeur de la tension d'apparition peut ne pas se modifier ou augmenter, mais les décharges partielles suivantes se produisent dans des autres zones du PT. Le renforcement du champ dans des zones du PT touchées par les DPs peut, donc, ou être agrandi, par la présence des charges de signe opposé à la tension sur l'électrode centrale, ou être diminué par la présence des charges de même signe que la tension.

3.3. Evaluation de la tension d'amorçage U_{DP} des décharges partielles

Nous avons développé une méthode basée sur la théorie classique des décharges dans les gaz pour prédire la tension d'amorçage des DPs dans la région du point triple. Tout d'abord, la distribution des lignes de champ dans la région du PT est déterminée à l'aide du logiciel Quickfield (Figure 3.48). Ensuite, nous calculons la valeur de la chute de tension $\Delta V_{1V}(d,z)$

calculée pour une tension appliquée de 1V, le long de chaque ligne de champ comprise entre l'électrode centrale (point B) et l'isolant solide (point A), à la distance z du PT et de longueur $d(z)$. La condition de décharge entre ces deux points A et B exige que la chute de tension $\Delta V(d,z)$ soit égale à la tension de Paschen $U_{paschen}(p,d)$, où p est la pression du gaz et d la distance entre les points A et B. Dans ces conditions $\Delta V(d,z)$ est égale à la tension d'amorçage $U_{DP}(z)$ des DP au point z . La valeur de la tension appliquée sur l'électrode HT, nécessaire pour avoir une décharge au point z pour un gaz et une pression donnés est alors déduite de la relation suivante :

$$U_{DP}(z) = \frac{U_{paschen}(p \cdot d)}{\Delta V_{1V}(d, z)},$$

Où : $U_{DP}(z)$ est la tension d'amorçage des DP au point z ;

$U_{paschen}(p \cdot d)$ est obtenue à partir de la courbe de Paschen du gaz considéré.

Le calcul de $U_{DP}(z)$ en fonction de la distance z au point triple montre que cette tension $U_{DP}(z)$ dépend fortement de z . En effet, pour se produire une décharge nécessite un champ suffisamment élevé sur une distance suffisamment grande (condition d'avalanches).

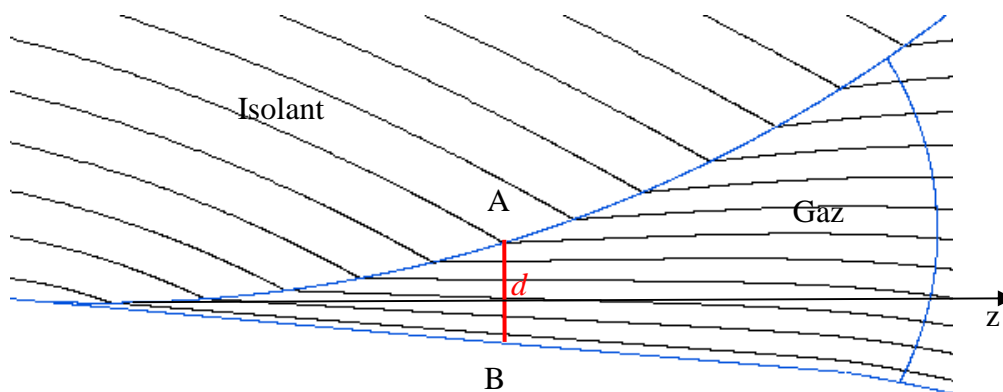


Figure 3.48. Détail du schéma de la zone du PT modélisée à l'aide du logiciel QuickField. Les lignes représentent les équipotentielles dans la région du PT

Près du point triple ($z \geq 0$), le champ est très élevé mais la distance $d(z)$ est très petite, et la décharge se produira pour une tension élevée. Pour des valeurs de z de plus en plus grandes, le champ décroît mais la distance $d(z)$ augmente. La tension de décharge calculée passe par une valeur minimale pour un z donné comme nous l'observons sur la Figure 3.49. Cette valeur minimale de la tension $U_{app}(z)$ doit logiquement correspondre à la tension d'amorçage U_{DP} des décharges partielles mesurée expérimentalement.

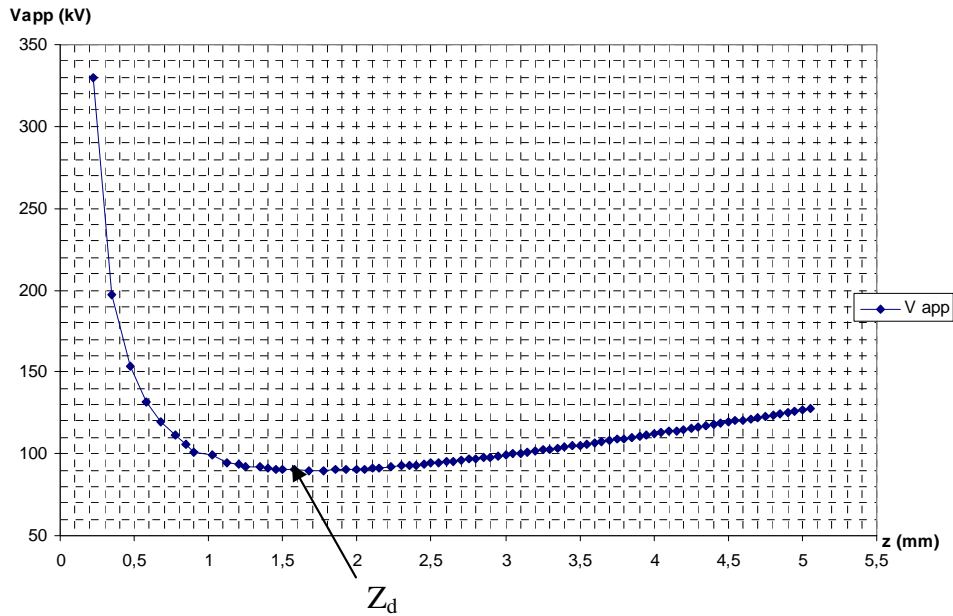


Figure 3.49. Tension U_{DP} en fonction de la distance z au point triple. SF_6 .

Le point z_d où la courbe $U_{app}(z)$ passe par un minimum détermine l'emplacement le plus probable des décharges partielles dans la région du PT. En réalité, le minimum étant très plat, on peut plutôt définir une zone de « risque » de formation de décharges partielles autour de ce point z_d . D'autre part à la position du point z_d correspond une longueur de décharge $d(z_d)$. Nous allons à présent comparer les valeurs des tensions d'amorçage des décharges calculées par la méthode ci-dessus avec les tensions U_{DP} mesurées avec le SF_6 et l'air sec.

SF_6

Pour le SF_6 , nous avons rassemblé sur la Figure 3.50 les valeurs de tension seuil de décharge au PT calculées par la méthode décrite précédemment et les valeurs expérimentales obtenues sous tension alternative et sous tension impulsionnelle. On remarque que les valeurs théoriques sont toujours plus élevées que les valeurs expérimentales dans tout le domaine de pression étudié et que les valeurs expérimentales, sous tension impulsionnelle, sont plus proches des valeurs théoriques que celles mesurées sous tension alternative.

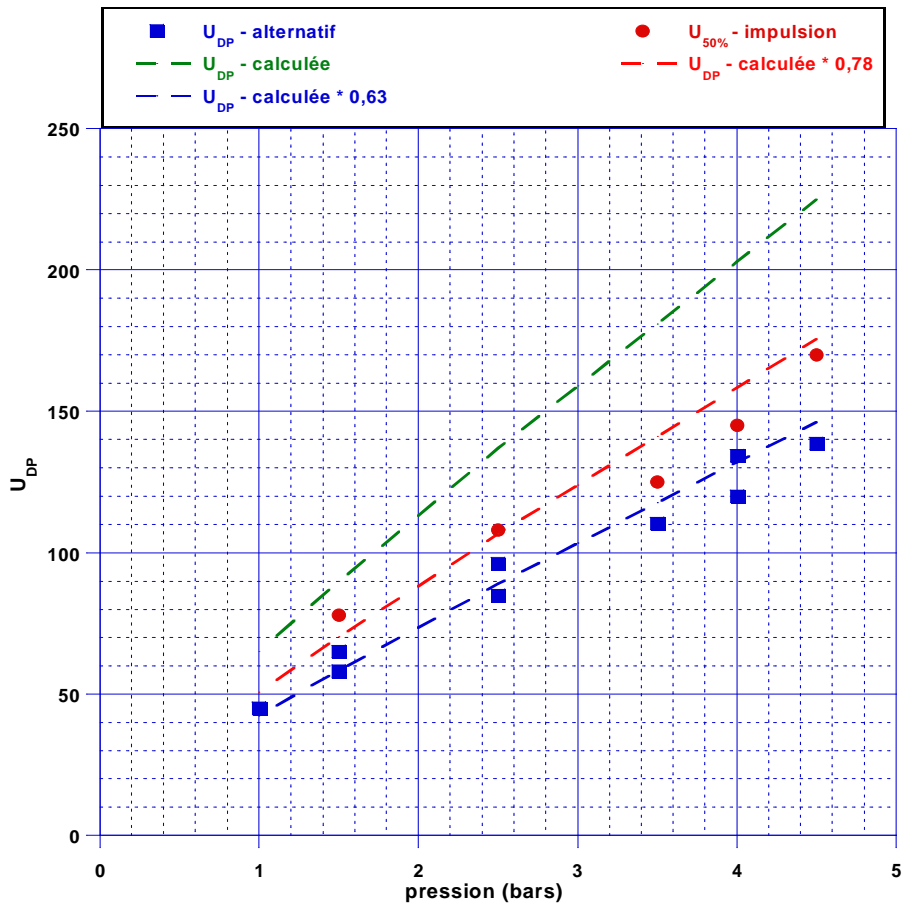


Figure 3.50. Tensions d'amorçage des DP dans le SF6. Valeurs mesurées et calculées.

D'autre part, le rapport $\frac{U_{DP-mesurée}}{U_{DP-calculée}}$ est sensiblement indépendant de la pression et vaut en moyenne 0,63 pour les essais sous tension alternative et 0,78 pour ceux sous impulsion. Un résultat identique a été obtenu en remplaçant le SF₆ par de l'azote pur [45]. Ainsi l'écart entre valeurs théoriques et expérimentales semble pratiquement indépendant de la nature du gaz et de sa pression.

Les écarts observés entre les valeurs théoriques et expérimentales sous tension alternative mettent en cause très certainement l'influence de la charge accumulée sur la surface de l'isolant, cette charge modifiant la répartition du champ électrique dans le voisinage du PT et donc les conditions de décharge. Les charges générées dans une alternance renforcent le champ dans l'alternance suivante, et ceci peut aisément expliquer que des décharges apparaissent alors que la tension instantanée est inférieure à la tension de Paschen.

TABLEAU 3-4. COMPARAISON ENTRE LA TENSION D'AMORÇAGE DES DPS MESUREE EN ALTERNATIF ET EN IMPULSION ET CELLE CALCULEE POUR LE SF6

Pression	U_{DP}^{ac} mesurée en alternatif	U_{DP}^{imp} Impulsion	U_{DP}^{th} calculée	U_{DP}^{ac}/U_{DP}^{th}	U_{DP}^{imp}/U_{DP}^{th}
1	45	-	65	0,69	
1,5	58	78	90	0,65	0,87
2	-	-	113	-	
2,5	85	108	137	0,62	0,79
3	-	-	159	-	
3,5	110	125	181	0,60	0,69
4	120	145	203	0,59	0,71
4,5	138	170	225	0,61	0,76
5	-	-	246	-	

Par contre, sous séries d'impulsions de tension de même polarité, on pourrait s'attendre à une accumulation progressive de charges qui pourrait conduire à des tensions d'apparition plus élevées, ce qui n'est pas le cas dans nos mesures. Dans ces mesures sous impulsion de tension, le seuil d'amorçage des décharges a été déterminé pour des décharges peu nombreuses de valeurs très petites (inférieure à 1 pC), et on peut supposer que la surface de l'isolant ne s'est pas chargée suffisamment pour influencer les DP's qui suivent.

Air Sec

Les résultats obtenus en utilisant l'air sec dépendent plus fortement du mode opératoire choisi que pour le SF₆. Lorsque la tension seuil d'amorçage U_{DP} des DP's est déterminée avec un isolant solide nettoyé et déchargé, les valeurs de U_{DP} ainsi obtenus sont plus élevées, surtout aux pressions $\geq 2,5$ bar, que celles mesurées avec un isolant ayant déjà subi des décharges et/ou des claquages (Tableau 3-5).

TABLEAU 3-5. COMPARAISON ENTRE LA TENSION D'AMORÇAGE DES DPS MESUREE EN ALTERNATIF ET CELLE CALCULEE POUR L'AIR SEC

Pression	U_{DP}^* mesurée isolant « claqué »	U_{DP}^{ac} mesurée isolant nettoyé	U_{DP}^{th} calculée	U_{DP}^{ac}/U_{DP}^{th}
1	22,4	22,4	41	0,55
1,5	30		55,5	
2			70	
2,5	37,2	54	82,1	0,66
3			95	
3,5	44,9		106	
4			118	
4,5	48,8	81	130	0,62
5			141	

Pour l'air sec, avec un isolant nettoyé, nous retrouvons sensiblement les mêmes valeurs (moyenne=0,61) du rapport U_{DP}^{ac}/U_{DP}^{th} que dans le cas du SF₆ ou de l'azote. L'influence des charges déposées sur l'isolant sur la valeur de U_{DP} est, dans le cas de l'air sec, plus nette que pour le SF₆. De ces différentes mesures, il semble également apparaître une influence de l'état de surface de l'isolant solide après des décharges et des claquages. Ce dernier point sera clarifié dans le chapitre suivant avec l'investigation des phénomènes de décharges se produisant dans la région du PT lorsqu'on y introduit un défaut modèle (particule métallique). Les valeurs expérimentales et théoriques des tensions seuils U_{DP} sont tracées en fonction de la pression de l'air sec sur la Figure 3.51. On remarque la forte dégradation des tensions seuils pour l'isolant "dégradé" lorsque la pression de l'air augmente. Les écarts à la courbe $U_{DP}^{th}(p)$ dépendent donc fortement de "l'histoire de l'isolant".

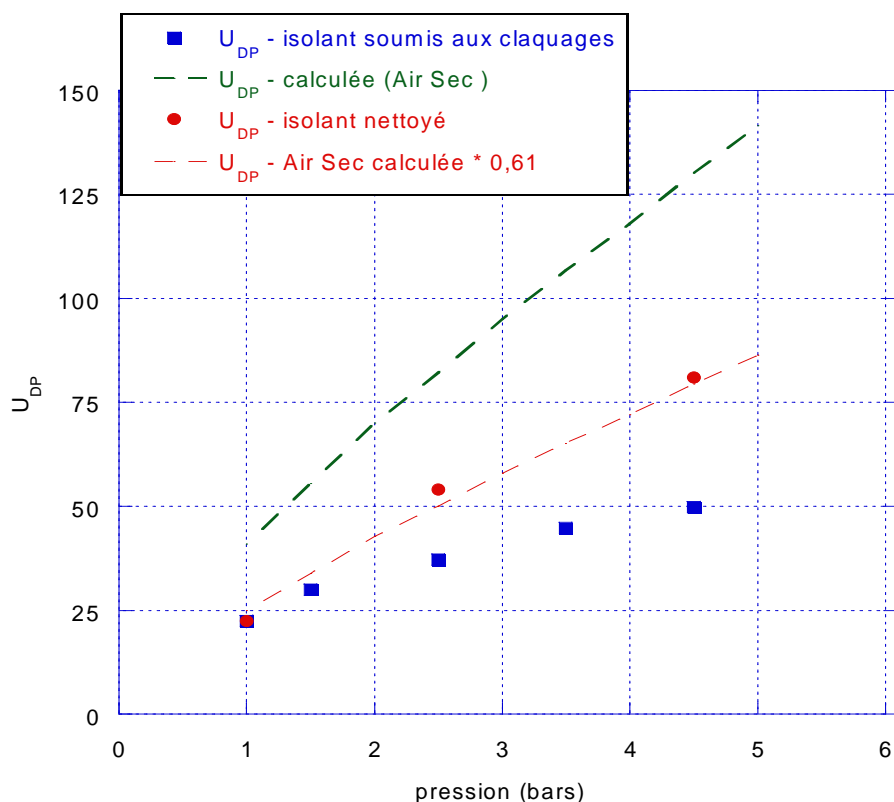


Figure 3.51. Tensions d'amorçage des DP dans l'air sec en tension alternative. Valeurs mesurées et calculées.

3.4. Détermination des tensions de claquage

Les tensions de claquage U_b ont été mesurées **sous tension alternative** dans la cellule AREVA en fonction de la nature du gaz (SF_6 , azote, air sec) et de sa pression. Comme attendu, pour un isolant solide donné, U_b est fonction de la nature du gaz. Dans le cas de l'air, les tensions de claquage augmentent cependant très faiblement avec la pression du gaz et nous retrouvons certainement les phénomènes que nous avons décrits lors de la mesure des tensions seuils de décharge U_{DP} , c'est-à-dire l'influence importante des charges déposées par les décharges partielles précédentes. En effet, lors de la mesure des tensions de claquage, nous augmentons par palier la tension jusqu'à atteindre le claquage. Dans ces conditions, de nombreuses décharges partielles de grande amplitude apparaissent avant le claquage final. Pour le SF_6 , ces décharges partielles ne semblent pas influencer de façon sensible la valeur de la tension de claquage mesurée alors que dans l'air sec l'effet semble important.

Pour un gaz donné, les valeurs de U_b dépendent également fortement de la nature de l'isolant solide (résine époxy ou téflon), i.e. de sa permittivité.

Si on élimine les supports isolants, la tension de claquage devient alors celle du gaz dans la géométrie de cylindres coaxiaux. Pour calculer cette tension de claquage de référence, nous avons utilisé les relations expérimentalement établies pour les différents gaz utilisés (air sec et SF₆) dans la géométrie cylindres coaxiaux. Soit la relation de Zalesskii et al. [6] - p. 600] pour le SF₆ et la relation de Ryan [6] - p. 597] pour l'air. Ces relations permettent de calculer la valeur du champ sur le cylindre intérieur pour lequel il y a claquage du gaz. Ces relations s'écrivent :

Pour le SF₆
$$E_s = 53(1 + 0,0186n)[1 + (0,895 - 17,9/n)r^{-1/2}] \text{ ()}$$

Pour l'air sec
$$E_s = 0,86n + 4,8\sqrt{\frac{n}{r}}$$

Où n est la densité de molécules du gaz (en 10^{18}cm^{-3}), r est le rayon du cylindre intérieur (cm) et E_s le champ sur ce cylindre (kV/cm). L'erreur typique de ce calcul est évaluée à $\pm 6\%$ pour le SF₆ et $\pm 3\%$ pour l'air sec.

D'autre part, dans la géométrie de la cellule AREVA, la simulation de la répartition du champ en l'absence de support isolant conduit à la relation suivante entre le champ maximum sur l'électrode haute tension et la tension appliquée : $V_s = E_s / 0,74$; V_s étant la tension de claquage (kV) du gaz. Rappelons les différentes relations obtenues entre le champ maximum E_{\max} (V/m) et la tension appliquée U :

- géométrie cylindres coaxiaux (sans support isolant), $E_{\max}=74U$
- géométrie PT en utilisant le PTFE ($\epsilon_{\text{isolant}}=2$), $E_{\max}=110U$
- géométrie PT en utilisant l'époxy ($\epsilon_{\text{isolant}}=4$), $E_{\max}=280U$

L'isolant de plus faible permittivité conduit au renforcement de E_{\max} le plus faible, et donc, à une meilleure performance diélectrique. La Figure 3.52 pour le SF₆ montre que les tensions de claquage obtenues avec l'isolant en téflon sont nettement plus élevées que celles observées avec l'isolant en résine époxy et que ces tensions de claquage se rapprochent de celles calculées dans le cas de l'absence du support isolant. Ainsi, dans le SF₆, les rapports $U_b^{\text{PTFE}}/U_b^{\text{calc}}$ et $U_b^{\text{époxy}}/U_b^{\text{calc}}$ sont pratiquement indépendants de la pression et ils valent respectivement 0,71 et 0,54 (Tableau 3-6).

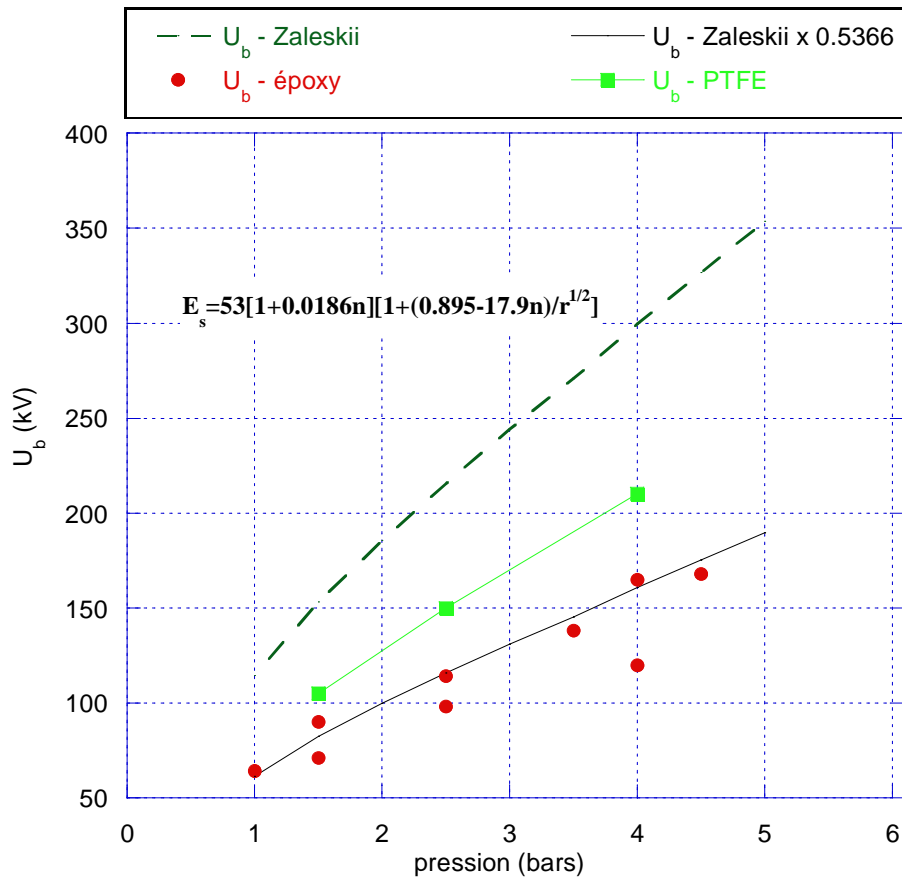


Figure 3.52. Tensions de claquage mesurées dans le SF₆ pour un isolant en téflon et un isolant en résine époxy et, courbe calculée pour la même géométrie coaxiale sans support isolant.

TABLEAU 3-6. COMPARAISON ENTRE LA TENSION DE CLAQUAGE CALCULEE ET CELLES MESUREES POUR LE SF₆

Pression	$U_b^{\text{époxy}}$	U_b^{PTFE}	$U_b^{\text{calc.}}$ (calculée)	$U_b^{\text{époxy}}/U_b^{\text{calc.}}$	$U_b^{\text{PTFE}}/U_b^{\text{calc.}}$
1	71		114	0,56	
1,5	90	105	153	0,58	0,69
2			185		
2,5	114	150	215	0,52	0,70
3			244		
3,5	138		270	0,50	
4	165	215	299	0,55	0,72
4,5	170		326	0,51	

Les matériaux à faible permittivité comme le PTFE ne peuvent pas être utilisés dans la plupart des applications en raison de leurs caractéristiques mécaniques insuffisantes. Par exemple, le module d'Young du PTFE est de 393MPa alors que celui de la résine époxy atteint une valeur de 3415 MPa.

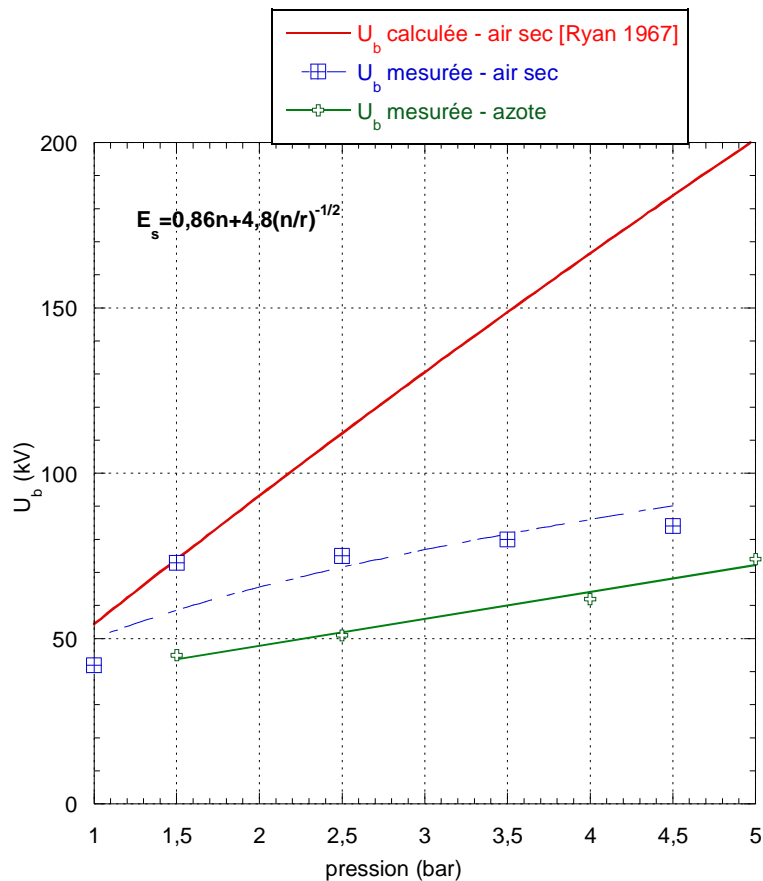


Figure 3.53. Tensions de claquage mesurées dans l'air. Courbe calculée pour la même géométrie coaxiale sans support isolant.

Dans le cas de l'air, comme observé dans le SF₆, les tensions de claquage calculées, pour une géométrie coaxiale (i.e. sans support isolant) avec la relation de Ryan (Figure 3.53), sont nettement plus élevées que les valeurs expérimentales mais on observe que, contrairement au SF₆, le rapport $U_b^{\text{air}}/U_b^{\text{calc}}$ dépend fortement de la pression du gaz. Ainsi ce rapport varie d'environ 0,8 à 0,45 lorsque la pression varie de 1,5 à 4 bar. Ceci traduit le fait que dans l'air, l'augmentation de la pression ne produit qu'une augmentation très faible de la tension de claquage en présence d'un isolant.

Ce résultat est difficile à expliquer, nous pouvons envisager l'influence des décharges partielles (de grande amplitude dans l'air, contrairement au SF₆), qui se produisent avant l'apparition du claquage comme nous l'avons décrit lors de la mesure des tensions seuils de

décharge U_{DP} . En effet, les valeurs de U_{DP} décroissent fortement lorsque l'isolant solide a précédemment subi des DP ou des claquages par rapport au cas de l'isolant nettoyé et déchargé. Par exemple, $U_{DP}=80\text{kV}$ pour un isolant nettoyé à $p=4,5\text{bar}$ d'air alors que pour un isolant "dégradé" U_{DP} est seulement d'environ 50kV à la même pression. Comme les tensions de claquage, du fait du mode opératoire, ne sont mesurées qu'avec un isolant "dégradé", le même effet de décroissance de U_b avec la pression doit intervenir.

La Figure 3.54 montre l'évolution des tensions seuils de décharge U_{DP} et de claquage U_b dans le SF_6 et l'air sec en fonction de la pression du gaz. L'analyse des écarts observés entre ces tensions seuils montre que ces écarts dépendent de la nature de gaz et de sa pression.

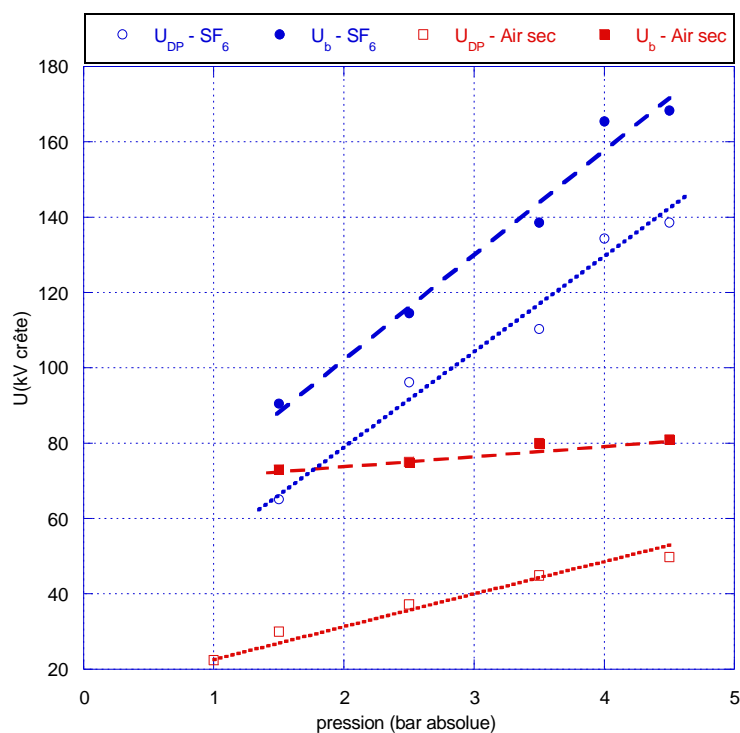


Figure 3.54. Tensions d'amorçage et de claquage pour le SF_6 et l'air sec sous tension alternative avec un isolant époxy ayant déjà subi des DP et/ou des claquages.

Dans le SF_6 , cette différence est sensiblement indépendante de la pression appliquée p du fait que les variations $U_{DP}(p)$ et $U_b(p)$ sont comparables. Le domaine dans lequel des DP se produisent est très étroit : lorsque des DP sont présentes au PT, elles vont rapidement conduire au claquage. Ceci signifie que les valeurs de tension nécessaires à la propagation des décharges jusqu'au claquage sont à peine supérieures (environ 20%) aux tensions d'apparition des décharges.

Dans l'air sec, la situation est largement différente. Les tensions d'apparition sont largement inférieures à la tension de claquage (50% à 2.5 bar). La tension d'amorçage se rapproche de la

tension de claquage avec l'augmentation de pression car les courbes $U_{DP}(p)$ et $U_b(p)$ sont des fonctions différentes de la pression. Ceci signifie que dans l'air, les tensions nécessaires à la propagation des décharges jusqu'au claquage sont bien supérieures aux tensions d'apparition, et que par conséquent, les tensions de claquage mesurées caractérisent la propagation des décharges et non pas leur apparition. Les résultats montrent que la pression a beaucoup moins d'influence sur la propagation des décharges que sur leur apparition.

L'effet des claquages est visible sur la surface de l'isolant (Figure 3.55), mais, due à la difficulté de l'accès dans la cellule, l'influence sur les valeurs des tensions spécifique reste une inconnue.



Figure 3.55. Isolant époxy ayant subi des DP et des claquages.

3.5. Conclusions

En premier lieu, ces essais ont montré la difficulté d'obtenir des mesures dans des conditions parfaitement contrôlées et répétitives en présence d'un isolant solide, en comparaison de mesures de claquage dans un gaz entre électrodes métalliques seules.

En effet, dès que les premières décharges partielles touchent la surface de l'isolant, celui-ci se charge, vieillit, et donc influence le comportement du système de mesure. Pour décharger la surface nous avons deux méthodes : soit attendre 24 heures entre chaque application de la tension (le temps considéré suffisant pour l'écoulement des charges vers la masse), soit démonter complètement la cellule, nettoyer l'isolant, opération longue (environ 1 journée), coûteuse (le gaz présent dans la cellule doit être renouvelé-SF₆), et qui présente également le risque de modifier d'autres paramètres (introduction de particules, etc) entre chaque essai. Par

ailleurs le nombre d'isolants neufs, construits spécifiquement par AREVA pour cette étude, était de quelques unités. Dans ces conditions, le nombre d'expériences réalisables a nécessairement été limité, et une certaine incertitude subsiste dans les mesures, comme par exemple l'effet de la charge progressive de l'isolant lors d'essais répétitifs, même si un temps d'attente de plusieurs heures est observé entre chaque essai, comme le montreront les mesures de déclin de potentiel.

Toutefois, des tendances très nettes sont apparues lors de ces mesures. Les avantages de l'utilisation du SF₆ sont particulièrement évidents dans les essais réalisés. Dans le SF₆, par rapport à l'air nous observons un nombre très inférieur de DP pendant les mesures en tension alternative, et leur amplitude est également beaucoup plus faible. L'augmentation de la pression provoque également un effet bénéfique sur toutes les caractéristiques mesurées : tensions d'apparition de DP, amplitude et nombre des DP, tensions de claquage en présence de l'isolant. La présence des DP d'amplitudes réduites montre qu'il existe une possibilité de charge de l'isolant moins élevée que dans l'air sec.

Même si les propriétés sont inférieures à celles du SF₆ seul, la tenue diélectrique du système conserve l'effet bénéfique du SF₆ (la tension de claquage double entre 1,5 et 4,5 bar). Dans l'air sec l'effet de la pression disparaît pratiquement en présence du solide (la variation entre 1,5 et 4,5 bar est de 15%).

Dans l'air sec l'effet de la propreté de l'isolant est évident, en comparant les valeurs des tensions d'apparition des DP. Cet effet n'a pas été observé dans le SF₆.

La mise au point d'une méthode optique a permis pour la première fois de détecter et évaluer les DP de faibles amplitudes sous impulsion de tension. Dans l'air sec, les mesures optiques mettent clairement en évidence l'effet de la charge de l'isolant sous impulsions successives. Le renversement de tension peut conduire à des valeurs de tension d'apparition fortement dégradées.

Dans le SF₆, un effet marquant obtenu montre que les seuils d'apparition de DP sont comparables en tension impulsionnelle et alternative. Si nous prenons en compte la faible différence entre U_{DP} et U_b observée en alternatif dans le SF₆, nous pouvons prévoir que sous forte surtension impulsionnelle (par exemple lors d'un test d'appareillage sous onde de foudre) l'apparition de DP au point triple conduira directement au claquage. Ceci met en évidence l'importance d'optimiser la géométrie des points triples pour éviter l'apparition de DP, qui conditionne la tension de claquage en tension impulsionnelle.

La prédiction de la tension d'amorçage des décharges partielles à partir de la théorie classique de Paschen donne des résultats qui peuvent être utilisables sous certaines conditions. Nous avons montré que les valeurs théoriques sont supérieures aux valeurs mesurées, avec un certain coefficient (environ 0.6 pour notre dispositif), qui dépend peu de la pression et de la nature du gaz. Ce coefficient est dû à l'influence de facteurs très difficilement prévisibles, comme la charge de surface de l'isolant, et également au fait que cette théorie ne conduit pas à une détermination très précise de la distance à laquelle les décharges peuvent se produire. En effet, la théorie de Paschen conduit plutôt à déterminer une gamme de distances assez large (figure 3.49).

Du point de vue pratique, il est très probable que le coefficient « d'erreur » dépendra de la géométrie du point triple, qui sera nécessairement différente de notre cellule pour un système industriel. Si ce coefficient peut être déterminé expérimentalement dans certaines conditions de gaz et de pression (par exemple en utilisant un gaz comme l'azote à faible pression, dans lequel les tensions d'apparition seront moins élevées, avec un risque de claquage direct plus faible que dans le SF₆), alors il devrait être possible d'extrapoler raisonnablement pour déterminer les tensions d'apparition de décharges dans d'autres conditions de gaz et de pression, compte tenu du fait que ce coefficient varie peu en fonction de ces paramètres.

4. Modèle du point triple avec particule métallique fixée.

Dans ce chapitre nous allons aborder un aspect important du point de vue pratique, et qui vient rendre encore plus complexe le problème: la présence d'un défaut près du PT, simulée en collant un fil en tungstène dans le voisinage du PT. Le fil de 5mm de longueur et 500 μ m de diamètre est collé avec de l'Araldite® (résine époxy). Le dispositif optique du système de capture des images est alors modifié pour obtenir un agrandissement de la zone du défaut (Figure 4.1). L'étude envisagée reste globalement la même qu'au chapitre précédent, avec dans un premier temps une étude en tension alternative, puis, une étude des probabilités d'apparitions des phénomènes, en tension impulsionnelle.

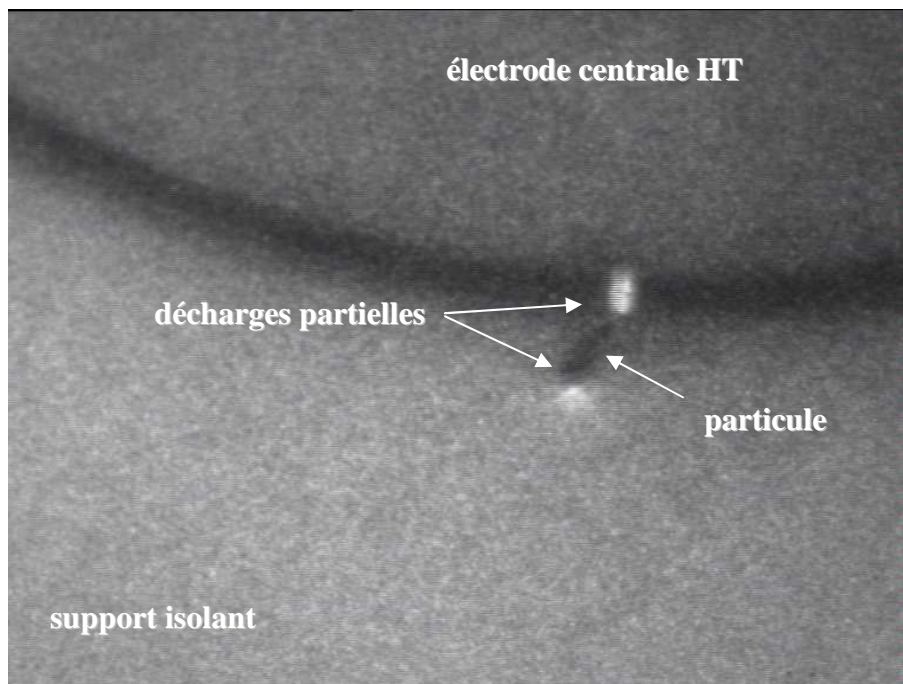


Figure 4.1. Photographie de la caméra haute-sensibilité avec le défaut près du PT.

Fil en tungstène 0,5/5 mm. U=34kV, air sec

4.1. Caractérisation sous tension alternative

4.1.1. Tension d'apparition des DP (U_a) et tension d'amorçage des DP (U_{DP})

Les essais ont été réalisés en gardant l'isolant modifié dans la cellule, sans l'enlever pour nettoyage, pour garder la configuration géométrique pour toute la durée des essais. Les tensions d'apparition des DP (U_a) mesurées sont quasi-identiques avec celles d'amorçage des DP (U_{DP}) pour les configurations gaz/pression utilisées, par conséquent, nous avons pris en considération seulement U_{DP} .

Dans les deux gaz, le premier point lumineux visible apparaît entre l'électrode centrale et l'extrémité du fil en regard de l'électrode HT (Figure 4.2a). Puis, en augmentant la tension, des décharges, se propageant sur la surface de l'isolant, apparaissent à l'autre extrémité du fil (Figure 4.2a et Figure 4.2b).

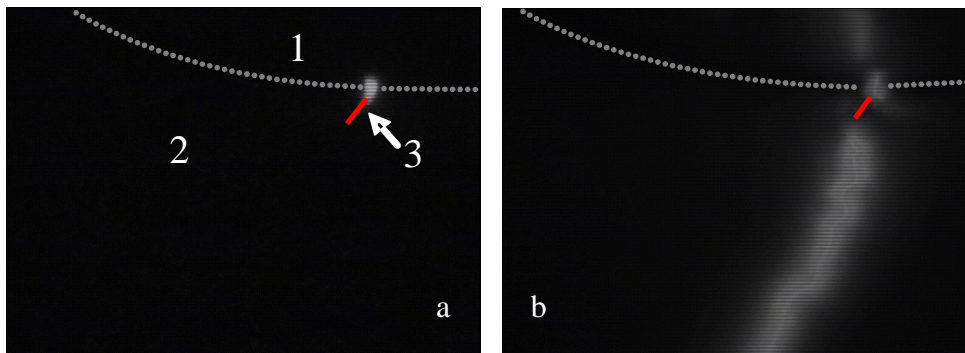


Figure 4.2. Images prises à l'aide de la caméra haute-sensibilité dans la géométrie avec défaut près du PT: 1. électrode centrale ; 2. support isolant ; 3. fil conducteur.

(a) DP apparaissant entre l'électrode centrale et le fil; (b) Claquage entre le fil et la masse.

4.1.2. Tension de claquage (U_b)

Le point de départ du claquage dans la géométrie avec défaut est le plus souvent le fil conducteur (Figure 4.2b). Mais pour certaines configurations (SF_6 à 1,5 bar et air sec de 1,5 à 4,5 bar), il peut se produire des arcs entre l'électrode centrale et la masse en plus de celui partant du défaut.

4.1.3. Caractérisation des DP

L'enregistrement des DP synchronisées avec la phase de la HT montre deux types de décharges dans l'air sec et le SF₆ : les décharges se produisant autour du PT, dont l'amplitude est peu sensible à la phase (elles sont également observées dans la géométrie sans défaut), et un autre régime, fortement dépendant de la phase, dû au défaut (Figure 4.3).

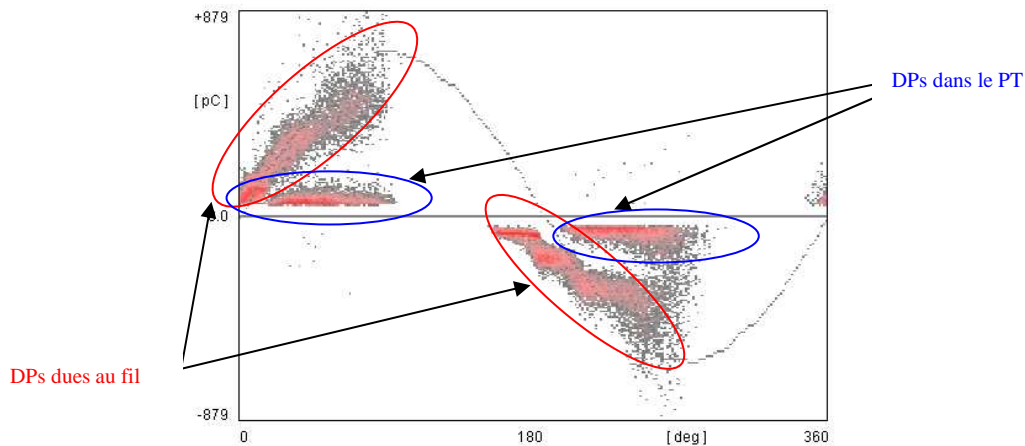


Figure 4.3. Enregistrement typique des DP synchronisées avec la phase de la HT. Air sec, P=1,5 bar et $U_{app}=37,5kV$.

Visuellement, les DP partant du défaut sont spécifiques à chaque alternance de la tension. Les décharges répandues en « toile » sur la surface de l'isolant (Figure 4.4b) sont généralement présentes sur l'alternance positive. L'autre type de décharge plus filamentaire (Figure 4.4a) apparaît dans l'alternance négative.

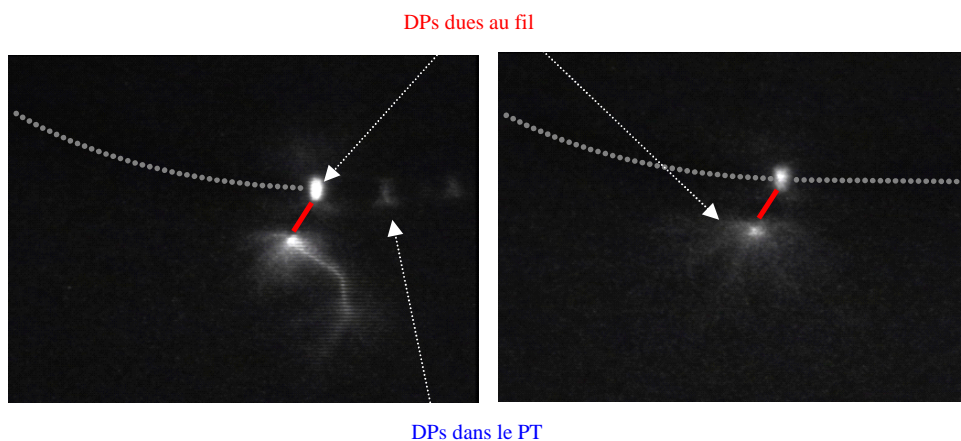


Figure 4.4. Allure des DP partant du défaut (Air sec, 1,5 bar).

(a) DP apparaissant dans l'alternance négative ; (b) DP apparaissant dans l'alternance positive.

Les deux phénomènes présentés précédemment : la séparation des réponses électriques des DP et l'apparence des décharges par rapport au signe de la tension appliquée, s'atténuent avec l'augmentation de la pression du gaz et sont, dans tous les cas, beaucoup moins visibles dans le SF₆.

4.1.4. Mesures en tension alternative

Le défaut près du PT génère une baisse importante des valeurs des tensions de claquage et d'amorçage. De plus, la variation de la tension de claquage et la tension d'amorçage en fonction de la pression devient presque constante (Figure 4.5) pour le SF₆, l'effet bénéfique du gaz sur la tenue diélectrique de la cellule disparaît. Cette indépendance de la tension de claquage avec la pression est comparable à celle observée dans la géométrie pointe-plan [52].

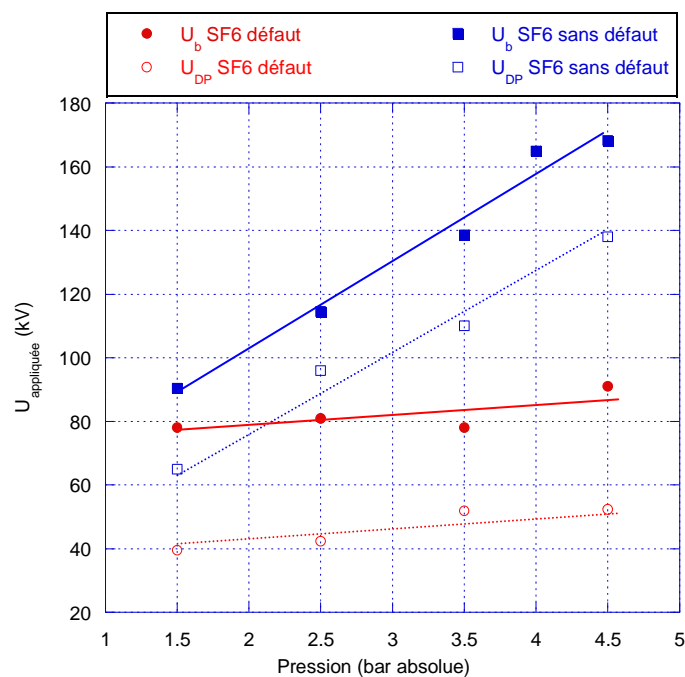


Figure 4.5. Tensions d'amorçage et de claquage pour le SF₆ dans la géométrie sans défaut et dans la géométrie avec défaut

Pour des pressions supérieures à 2 bars, la tension d'amorçage des DP dans la géométrie PT est supérieure à celle de claquage dans la géométrie avec défaut. Ce que l'on peut observer à l'aide de la caméra haute-sensibilité : les DP localisées autour de l'électrode centrale, au voisinage du PT, ne sont plus visibles avant le claquage.

En présence de la particule, dans le SF6 les tensions d'apparition de DP et de claquage deviennent pratiquement identiques à celles mesurées dans l'air sans défaut (figure 3.54). Il apparaît une différence importante entre U_{DP} et U_b , ce qui montre que le claquage n'est plus déterminé par l'apparition des décharges, mais plutôt par la tension nécessaire à leur propagation, comme dans l'air sans défaut.

Pour l'air sec (Figure 4.6), la dégradation introduite par la particule métallique est beaucoup moins importante que dans le SF6. L'allure de la tension de claquage en fonction de la pression montre une baisse importante uniquement pour une pression de 4,5 bar. Ceci est cohérent avec le fait que sans particule, le claquage était déjà conditionné par les conditions de propagation, qui sont peu affectées par la présence de la particule. Il est remarquable de constater qu'en présence de la particule, les tensions de claquage deviennent pratiquement identiques dans le SF6 et dans l'air, et dépendent peu de la pression.

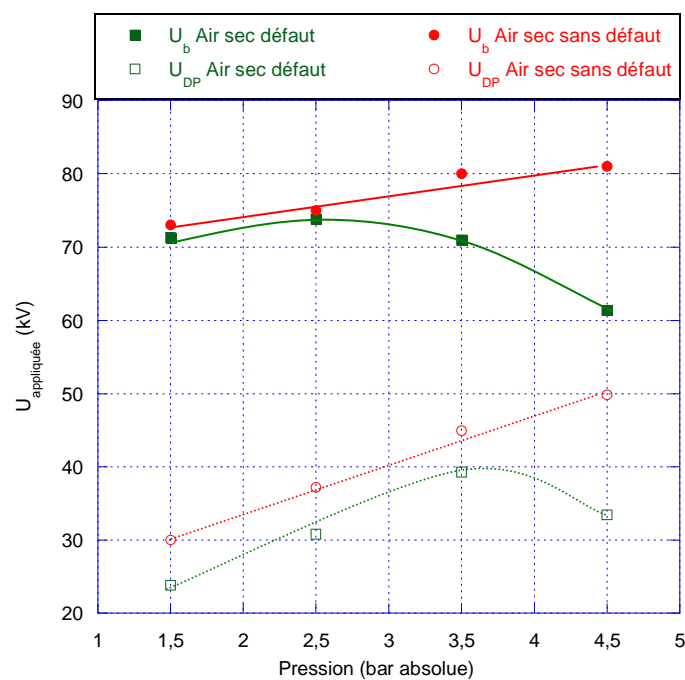


Figure 4.6. Tensions d'amorçage et de claquage pour l'air sec dans la géométrie sans défaut et dans la géométrie avec défaut

Notons que pour la totalité des pressions utilisées dans l'air sec et pour 1,5 bar dans le SF6, la valeur d' U_{DP} dans la géométrie PT est inférieure à U_b avec défaut. Cela explique les deux phénomènes observés pour les configurations mentionnées (Air Sec et SF6 à 1,5 bar) :

- des DP sont visibles aussi bien aux bouts du fil en tungstène que dans le voisinage du PT ;

- des claquages démarrant en parallèle aussi bien sur l'électrode centrale que sur le défaut.

4.1.5. Dispersion de U_b

Dans le SF₆, à 4,5 bars, on constate une dispersion importante des valeurs de la tension de claquage sur des essais consécutifs. La tension de claquage est au début de 54 kV (RMS), 76kV (crête), mais après plusieurs claquages, elle peut monter jusqu'à 92 kV (RMS), 130kV (crête). Les expériences ont été reprises avec l'isolant déchargé (période de repos supérieure à 12h) et la valeur de la tension de claquage de départ a été retrouvée et de nouveau, cette valeur a augmenté.

Un dispositif pour déterminer l'alternance où le claquage se produit a été conçu. Une boucle de deux spires est montée sur le fil qui relie la cellule à la masse. Dans le cas d'un claquage, la boucle donne un courant qui déclenche l'oscilloscope et la coupure de la tension (Figure 4.7) et on observe sur l'écran de l'oscilloscope l'évolution de la tension alternative (comme montré sur la Figure 4.10).

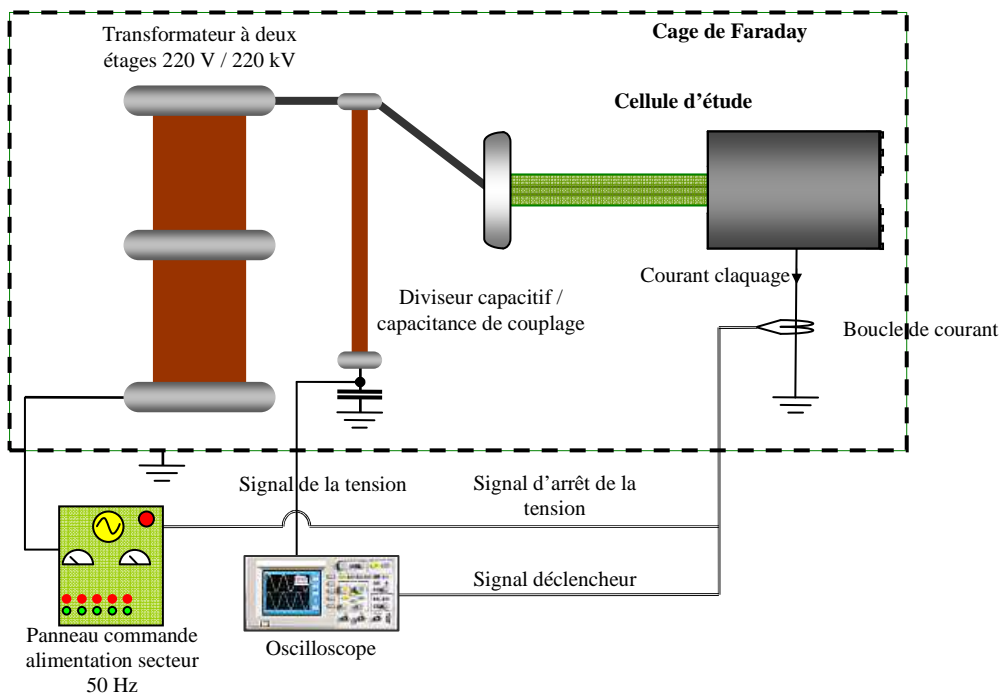


Figure 4.7. Schéma pour la mesure de dernières alternances avant un claquage.

Quatre séries de mesures avec des périodes de repos entre chacune, variant de 20 à 50 heures, ont été réalisées pour une valeur de pression de 4,5 bars et les résultats sont présentés dans la Figure 4.8.

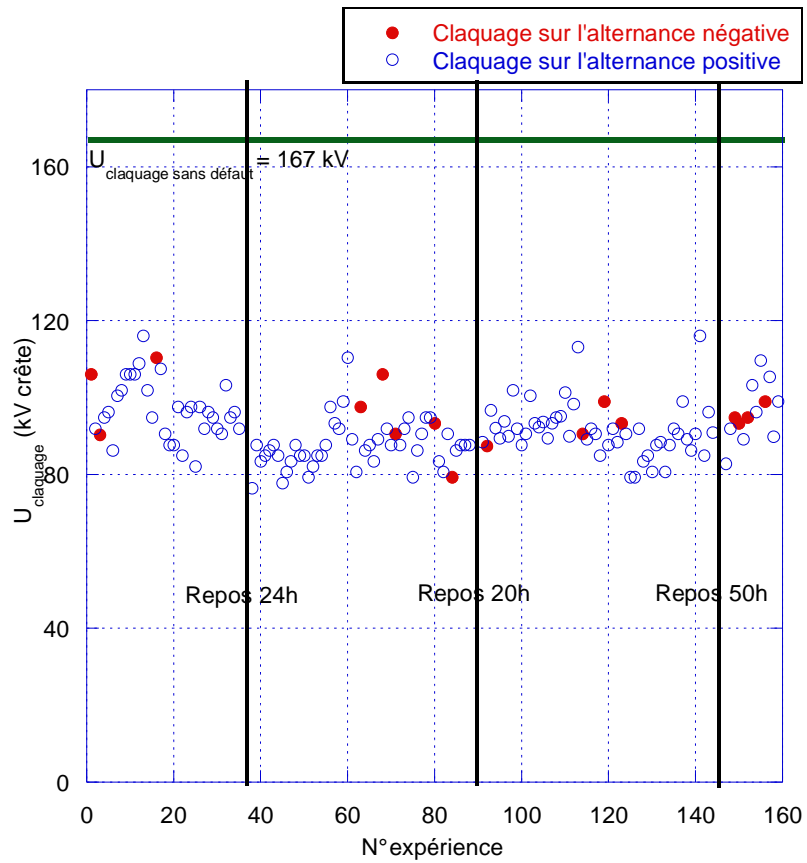


Figure 4.8. Quatre séries de mesure de tensions de claquage. Le temps de repos entre les claquages est de 30-60s. SF₆, 4,5 bar.

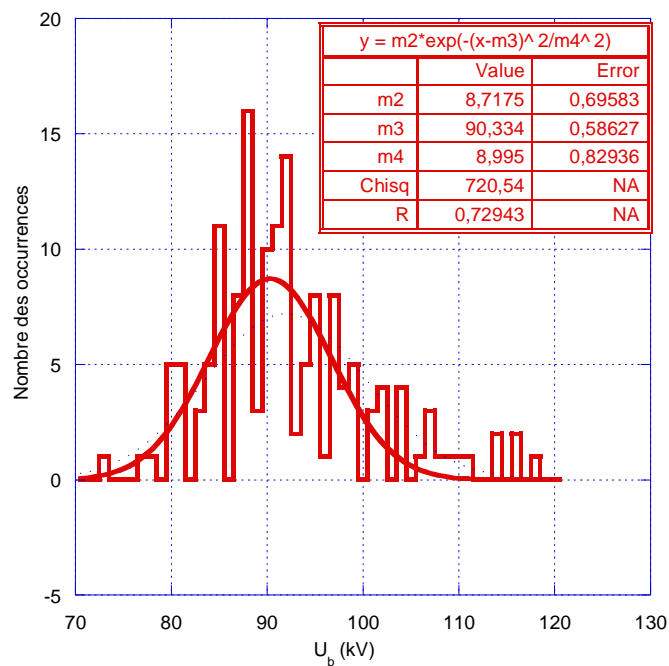


Figure 4.9. Histogramme des valeurs de l' U_b ; ligne – distribution Gaussienne ; gaz SF₆, 4,5 bars

La valeur mesurée de la tension est la valeur crête des six derniers cycles de la tension sinusoïdale appliquée avant le claquage. Ces résultats peuvent montrer l'évolution de la tension de claquage influencée par les claquages précédents dans la cellule. La période de repos a été imposée afin de permettre l'écoulement de la charge de surface déposée sur l'isolant solide vers la masse, donc le premier essai de la série est réalisé avec un isolant déchargé.

On peut observer que la charge de surface de l'isolant n'a pas une influence visible sur les valeurs U_b , la répartition des résultats ne semble pas être influencée par les claquages précédents. Statistiquement, 93% des claquages partent de l'alternance positive de la HT sinusoïdale appliquée. Tous les points de mesure ont ensuite été analysés statistiquement et une distribution gaussienne décrit adéquatement leur répartition (Figure 4.9).

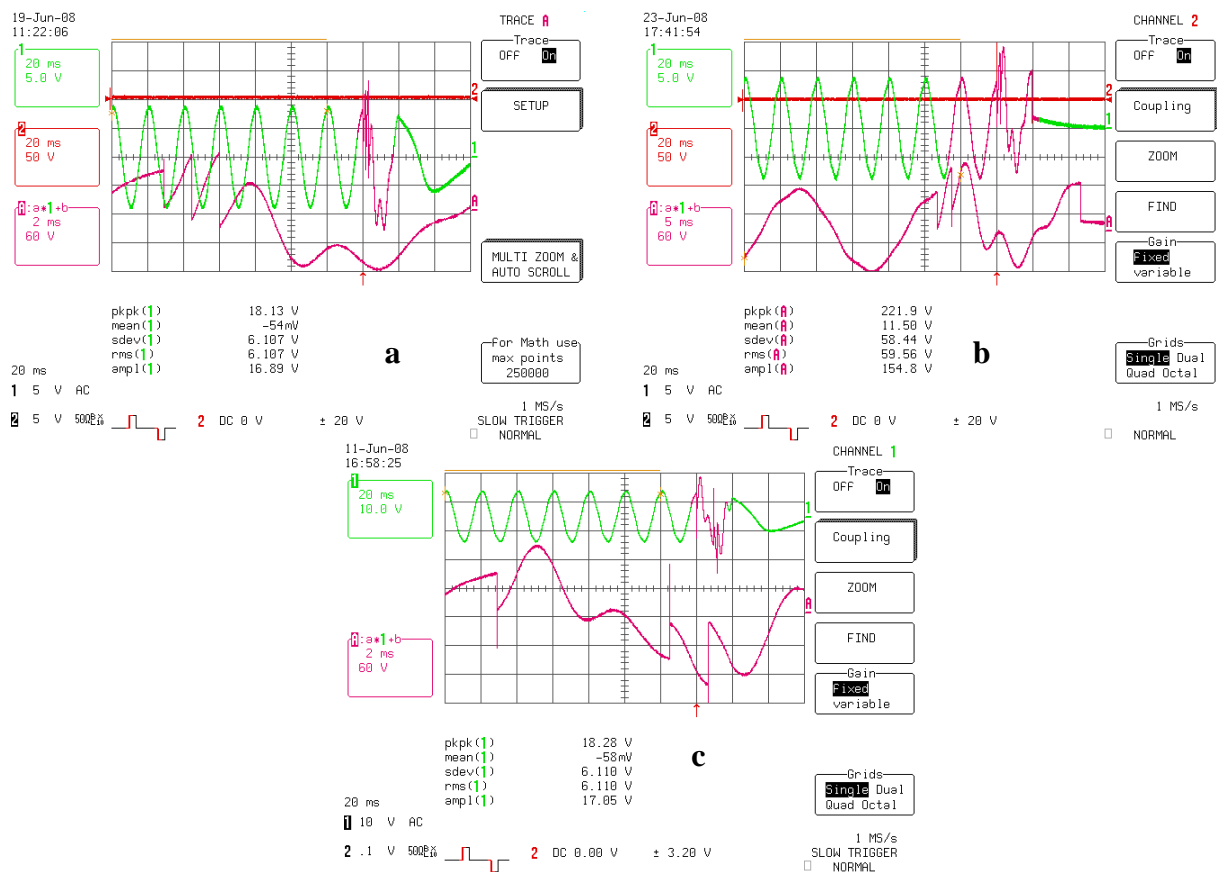


Figure 4.10. Exemples de réamorçages successifs dans le SF6 à différentes pressions.

Vert – tension alternative appliquée ; rose – 1^{er} signal agrandi ; rouge – signal de la boucle de courant

a. 2,5 bars, trois amorçages successifs sur l'alternance positive ; b. 3,5 bars, trois amorçages

successifs, deux sur la première alternance positive, un sur la deuxième ; c. 4,5 bars, trois amorçages,

un sur l'alternance positive, deux sur l'alternance négative.

D'autres essais réalisés à différentes pressions de SF₆ montrent que la variation relative des valeurs de la tension de claquage diminue avec la baisse de la pression (9% pour 4,5 bars; 6% pour 3,5 bars, 5,5% pour 2,5 bars et 2,7% pour 1,5 bars).

Un certain nombre d'observations sont également à mentionner, suite à ces essais, dans le SF₆, à différentes pressions:

- à 1,5 bar (dans l'air sec, comme vu ultérieurement, quelque soit la pression), les claquages ont été observés demarrant aussi bien du défaut que de l'électrode centrale.
- pour toutes les pressions utilisées, plusieurs amorçages successifs peuvent se produire successivement durant un claquage. Pour 1,5 et 2,5 bars, des amorçages successifs se produisent durant la même alternance positive. Pour 3,5 et 4,5 bars, les amorçages peuvent continuer sur les alternances suivantes (que positives pour 3,5 bar). Des exemples sont montrés dans la Figure 4.10;
- des claquages partant de l'alternance négative n'ont été observés que pour la pression de 4,5 bars ;
- les tensions de claquage dépendent aussi de la rampe de tension appliquée (i.e. la vitesse d'augmentation de la tension alternative). On observe que la tension de claquage augmente légèrement lorsque la vitesse de la rampe de tension diminue.

Après les essais dans le SF₆, montrant une dispersion importante des valeurs de tensions de claquage, un protocole plus strict a été mis en place (30 mesures successives de U_{DP} et de U_b) et des nouvelles mesures ont eu lieu dans l'air sec, en notant aussi les alternances du premier claquage ainsi que le nombre des chutes de tension par essai. Le Tableau 4-1 montre les résultats obtenus avec le 1^{er} protocole (une seule mesure des valeurs pour chaque pression) aussi que les valeurs moyennes des tensions mesurées en utilisant le 2^{ème} protocole (avec l'isolant supposé dégradé après ~1000 claquages subis) :

TABLEAU 4-1. COMPARAISON ENTRE LES TENSIONS DE CLAQUAGE DANS L'AIR SEC MESUREES UNE SEULE FOIS ET LA VALEUR MOYENNE DES 30 TENSIONS, SUIVANT LE 2^{EME} PROTOCOLE AVEC L'ISOLANT DEGRADE.

protocole	Pression (bar)							
	1,5		2,5		3,5		4,5	
	1 ^{er}	2 ^{eme}	1 ^{er}	2 ^{eme}	1 ^{er}	2 ^{eme}	1 ^{er}	2 ^{eme}
U _b (kV)	56,1	71,3	67,3	73,8	68,7	70,9	53,3	61,3
U _{DP} (kV)	19,6	23,8	30,6	30,8	33,6	39,3	35,1	33,4

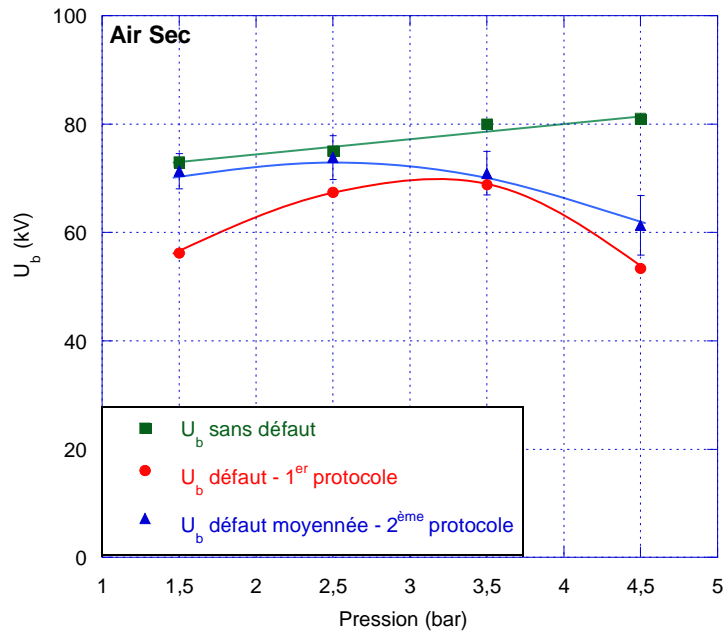


Figure 4.11. Comparaison entre les tensions de claquage mesurées une seule fois et la valeur moyenne des 30 tensions suivant le 2^{ème} protocole avec l'isolant dégradé.

Si pour U_{DP} les différences ne sont pas significatives (sauf, peut-être à 3,5 bars), les valeurs de U_b ont changé, mais l'allure de la courbe $U_b(p)$ reste similaire (Figure 4.11).

Les données statistiques des valeurs des tensions de claquage pour l'air sec et pour le SF_6 sont répertoriées dans le Tableau 4-2. Comme les claquages peuvent démarrer des deux alternances (négative et positive) dans le SF_6 , à 4,5 bars, nous précisons donc le signe de l'alternance dans le tableau.

TABLEAU 4-2. DONNEES STATISTIQUES DES VALEURS DES TENSION DE CLAQUAGE

	pression (bars)	points mesurés	valeur minime	valeur maxime	valeur moyenne	déviaton standard	variation relative	nb. moy des claq
Air sec	1,5	30	45	53	50,46	1,655	3,27	-
	2,5	30	44	55	52,56	2,12	4,033	5,4
	3,5	30	47	56	50,16	2,01	4,007	3,13
	4,5	33	40,3	49,6	44,1	2,44	5,533	1,6
SF₆	1,5	10	74	82	78	2,12	2,7	1,8
	2,5	22	72,1	89,08	81,8	4,49	5,5	2,09
	3,5	21	69,2	86,2	78,90	4,71	6,0	2,48

	4,5 (+)	151	72,1	117,36	91,86	8,37	9,2	1,28
	4,5 (-)	20	79	110	96,61	7,62	7,92	2,25

La variation relative est déterminée avec la formule :

$$(\text{écart type} / \text{valeur moyenne}) * 100.$$

Celle-ci varie avec la pression pour le SF₆ ainsi que pour l'air sec, comme observée dans la Figure 4.12.

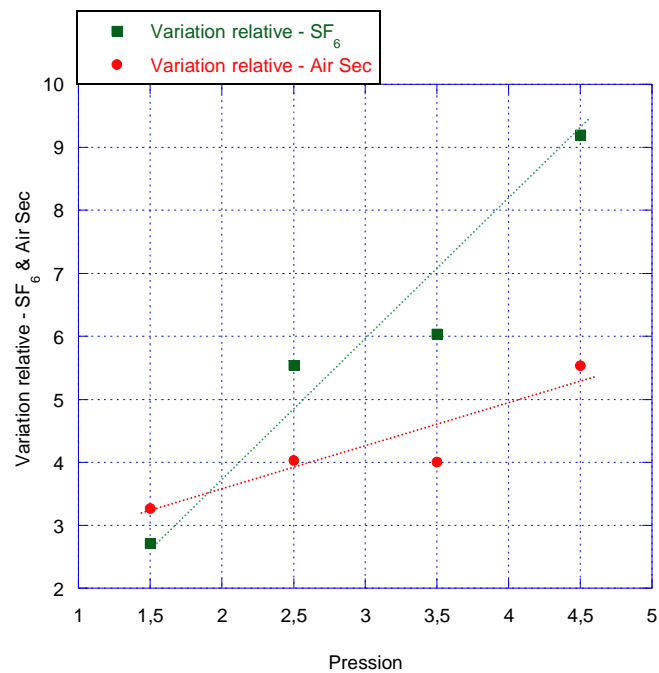


Figure 4.12. Variation relative de l'U_b pour l'air et le SF₆.

Pour l'air sec, le nombre moyen de ré-amorçages successifs est beaucoup plus élevé que dans le SF₆, et augmente quand la pression diminue : à 1,5 bar les claquages successifs très nombreux ne peuvent plus être comptés (par exemple dans la Figure 4.13). Pour le SF₆ le nombre moyen de ré-amorçages se situe autour de 2 amorçages avant que le relais de protection ne coupe la tension (comme observé sans la dernière colonne du Tableau 4-2).

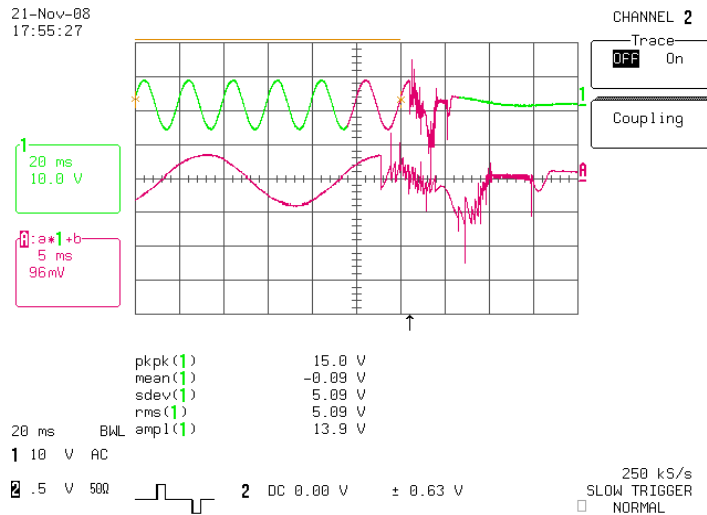


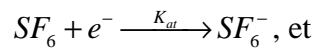
Figure 4.13. Claquage dans l'air sec à 1,5 bar. Les amorçages successifs sont très nombreux.

Nous proposons l'explication suivante des phénomènes:

Pour avoir des ré-allumages aussi rapides, dans le canal de la décharge (claquage) il reste des électrons libres qui vont permettre un nouveau claquage lorsque la tension se rétablit à une valeur suffisante. En post-décharge, ne connaissant pas le champ résiduel, on suppose un champ nul, donc, nous pouvons calculer le temps le plus rapide de capture des électrons par les molécules, soit SF₆, soit O₂ de l'air.

Rappelons que ce temps peut augmenter très fortement si le champ local n'est pas nul. Ce qui est certainement le cas.

Pour le SF₆, la capture s'effectue selon la réaction



$$K_{at}(E=0) = K_{at}^{th} = 2,27 \pm 0,07 (10^{-13} \text{ m}^3/\text{s}) [53] \text{ d'où,}$$

$$n_e = n_e^0 \exp(-K_{at} [SF_6] t), \text{ et ensuite :}$$

$$\tau_{th} = \frac{1}{K_{at} [SF_6]} = \frac{1}{2,27 \cdot 10^{-13} \cdot 2,5 \cdot 10^{25}} \cong 1,8 \cdot 10^{-13} \text{ s, pour } p = 1 \text{ bar,} \quad (4 - i)$$

Où τ_{th} est le temps de capture des électrons le plus rapide et $[SF_6]$ est la densité en m^{-3} . Cette valeur montre que dans le SF₆ les électrons du canal de décharge seront si rapidement capturés que la probabilité d'une deuxième décharge à cause de leur présence est très faible.

Pour l'air sec, le raisonnement est le même, mais nous devons prendre en compte la réaction à trois corps. En sachant que, pour $E=0$, $K_{at} = 1,4 (10^{-31} \text{ cm}^6/\text{s}) [54]$, en considérant la transformation $O_2 + N_2 + e^- \xrightarrow{K_{at}} O_2^- + N_2$, nous pouvons déduire que :

$$\tau_{th} = \frac{1}{K_{at} \cdot [O_2][N_2]} = \frac{1}{1,4 \cdot 10^{-31} \cdot 0,2 \cdot 2,5 \cdot 10^{19} \cdot 0,8 \cdot 2,5 \cdot 10^{19}} \cong 0,7 \cdot 10^{-7} s \quad (4 - ii)$$

Ce temps est 10^6 plus grand que celui calculé pour le SF₆. Les ré-allumages successifs très nombreux dans l'air peuvent s'expliquer pour cette valeur de τ_{th} calculée.

Dans l'air sec, le gaz reste chargé dans le voisinage du premier claquage et les allumages qui suivent vont avoir des conditions favorables pour se produire. Avec l'augmentation de la pression, N , la densité des particules neutres augmente, donc, la vitesse d'attachement augmente aussi, en résultant un nombre plus faible d'allumages.

Dans le SF₆, le nombre d'allumages successifs ne varie pas, du fait d'un temps d'attachement très rapide des électrons précédemment créés, ces allumages se produisent toujours sur un gaz non-chargé. Ces résultats illustrent la grande faculté de récupération des propriétés isolantes du SF₆ après un claquage, bien connu dans le domaine de la coupure.

4.2. Tension impulsionnelle

4.2.1. Dans le SF₆

Les essais en tension impulsionnelle ont été réalisés dans le SF₆, à 1,5 bar, 4,5 bar et dans l'air sec à 4,5 bars. Pour chaque palier de tension, dix impulsions ont été appliqués et une probabilité d'apparition des décharges partielles et des claquages a été déduite. Les premiers essais ont consisté à augmenter la tension (par paliers) jusqu'au moment du premier claquage. Nous avons remarqué un phénomène évident d'hystérésis des tensions d'apparition des DP et des tensions de claquage. Nous avons, ensuite, détaillé la dépendance des courbes d'hystérésis en fonction du gaz utilisé (SF₆ ou air sec) et en fonction de la valeur de la pression utilisée (1,5 et 4,5 bar).

Polarité négative

La Figure 4.14. montre le résultat d'expériences réalisées dans le SF₆, à 1,5 bar, en polarité négative, au cours de la même journée (donc, sans décharger complètement la surface de l'isolant).

En rouge, on applique 6 paliers successifs sans avoir des DP et pour -109kV la première DP apparait. De -121kV à -139kV, la probabilité d'apparition des DP est de 100% et à -144kV la première impulsion produit le claquage (Figure 4.15).

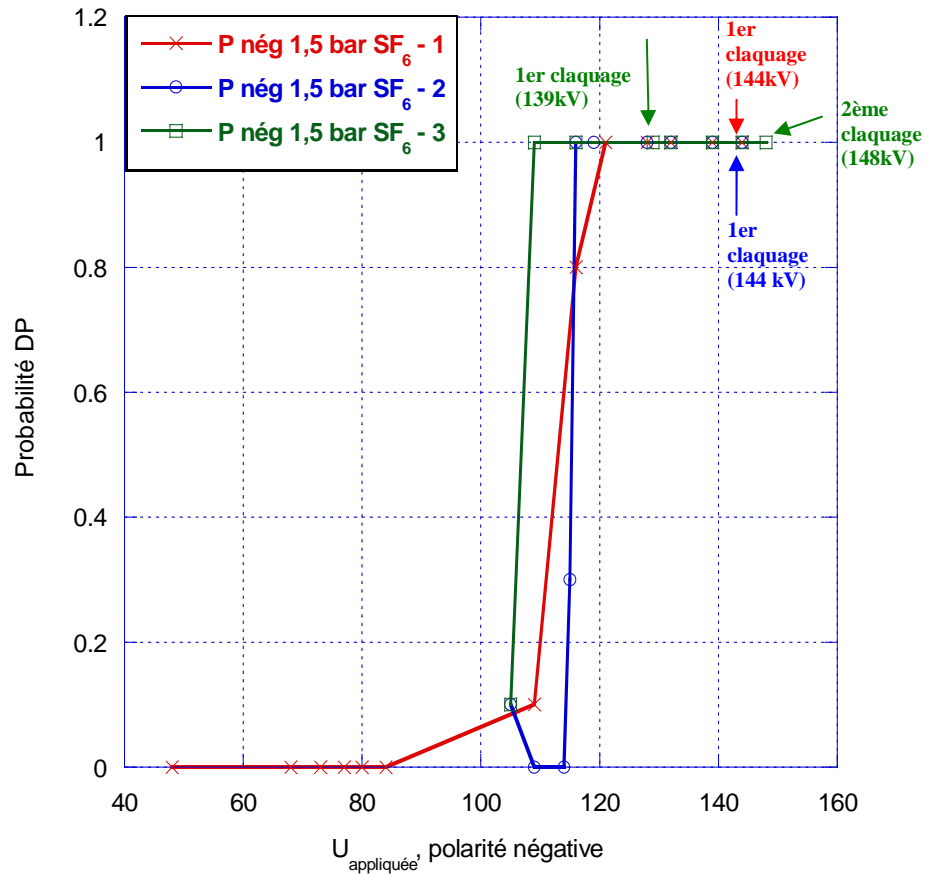


Figure 4.14. Probabilité d'apparition des DP en fonction de la tension impulsionnelle appliquée, pour la géométrie avec défaut, SF₆, à 1,5 bar

Date:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
03/10/2008	SF6		négative		Après 24h							
	1,5 bar				P% DP	P% Claq						
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
48											0	0
68											0	0
73											0	0
77											0	0
80											0	0
84											0	0
109	DP										0,1	0
116	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP			0,8	0
121	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
128	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
132	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
139	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
144	Cl										0	1

Figure 4.15. Première expérience en tension impulsionnelle, pour la géométrie avec défaut, SF₆, à 1,5 bar, polarité négative.

Après 3 heures de repos (sans, donc, laisser l'isolant se décharger complètement), on a répété les essais précédents, en démarrant à la tension de 105kV correspondant à une probabilité de DP <10%. Une probabilité de 100% d'apparition des DPs a été atteinte de -116kV à -139kV. Le claquage est apparu au premier coup du palier à -144kV (Figure 4.16).

Data:		Gaz:		Polarité:		Commentaires:						
03/10/2008		SF6		négative		Après 3h						
		1,5 bar										
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
105						DP					0,1	0
109											0	0
114											0	0
115						DP	DP			DP	0,3	0
116	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
119	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
128	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
132	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
139	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
144	Cl										0	1

Figure 4.16. Deuxième expérience en tension impulsionnelle, pour la géométrie avec défaut, SF₆, à 1,5 bar, polarité négative.

Le 3^{ème} essai a été réalisé après 30 minutes de repos à partir de -105kV. La tension pour avoir 100% de probabilité d'apparition des DPs est -109kV (Figure 4.17). Le premier claquage a été observé à -139kV (2^{ème} coup).

Data:		Gaz:		Polarité:		Commentaires:						
03/10/2008		SF6		négative		Après 30'						
		1,5 bar										
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
105	DP										0,1	0
109	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
116	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
119	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
132	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
139	DP	Cl	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
144	DP	Cl	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,9	1
148	Cl	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1

Figure 4.17. Troisième expérience en tension impulsionnelle, pour la géométrie avec défaut, SF₆, à 1,5 bar, polarité négative.

Ensuite, la tension a été abaissée par paliers pour observer la suite des phénomènes. Une hystérésis des valeurs de la tension de claquage apparait. La dernière tension de claquage, en descendant est de 119kV (un claquage et 9 DPs), la dernière tension avec 100% probabilité d'apparition des DPs est de 89kV (Figure 4.18).

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
03/10/2008	SF6		négative		Après 30'							
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
105	DP										0,1	0
109	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
116	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
119	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
132	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
139	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
144	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
148	CI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	1
144	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	0	1
139	DP	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	0,1	0,9
132	CI	DP	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	0,1	0,9
128	DP	CI	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	CI	0,8	0,2
119	CI	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,9	0,1
109	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
105	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
93	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
89	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
82			DP	DP							0,3	0
77											0	0

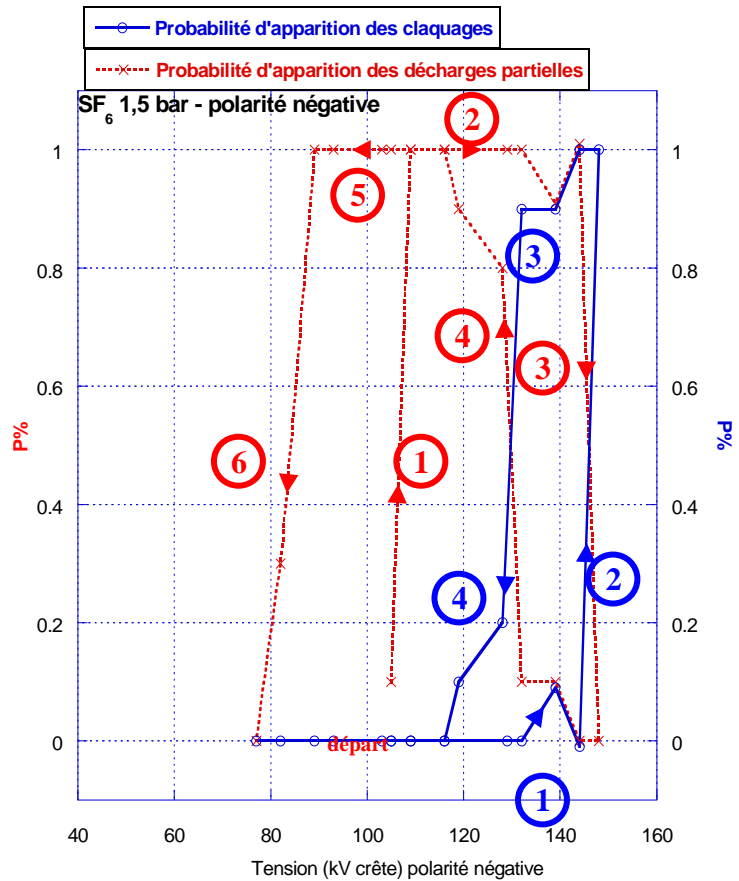


Figure 4.18. Phénomène d’hystérésis des tensions de claquage et d’apparition des DP dans le SF₆ à 1,5 bars, polarité négative.

Trois essais à la suite ont été réalisés pour déterminer si le phénomène d’hystérésis apparaît en l’absence de claquage. La tension a été augmentée (toujours en appliquant 10 impulsions) jusqu’à obtenir 100% de probabilité d’apparition des DP et nous n’avons pas pu observer d’hystérésis significative (Figure 4.19).

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
04/10/2008	SF6		négative		hystérésis DP							
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
98											0	0
100		DP	DP	DP	DP	DP	DP			DP	0,7	0
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP		0,9	0
98								DP	DP		0,2	0
100	DP							DP		DP	0,3	0
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
100		DP									0,1	0

Figure 4.19. Essais consécutifs en tension impulsionnelle jusqu’à 100% probabilité d’apparition des

DPs

Polarité positive

Avec l'isolant déchargé, nous avons appliqué une tension impulsionnelle positive. La Figure 4.20 montre les probabilités d'apparition des phénomènes pour le premier essai, avec l'isolant déchargé.

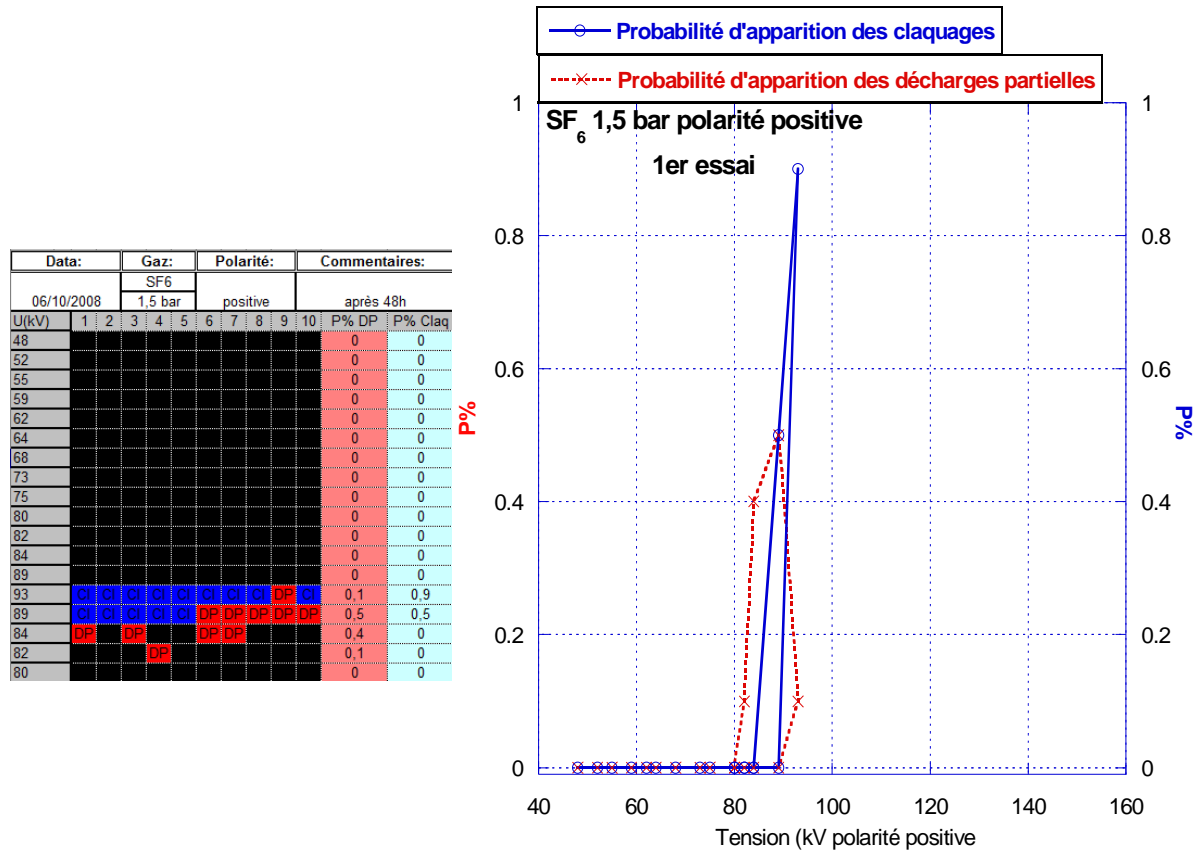


Figure 4.20. Phénomène d'hystérésis des tensions de claquage et d'apparition des DP dans le SF₆ à 1,5 bar, polarité positive. 1^{er} essai.

Un deuxième essai a ensuite été fait sans temps de repos, pour observer la répétitivité des phénomènes (Figure 4.21). Les valeurs des tensions sont quasiment les mêmes, mais l'hystérésis s'est élargie, et les DP sont beaucoup plus présentes avant et après les claquages.

Data:		Gaz:		Polarité:		Commentaires:						
06/10/2008		SF6		positive		tout suite						
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
80											0	0
82											0,1	0
84	DP					DP					0,3	0
89	DP	DP	DP			DP	DP	DP	DP	DP	0,8	0
93	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
96	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	DP	0,2	0,8
97	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
96	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
93	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
89	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	DP	0,2	0,8
84	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
82	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
80	DP	DP				DP	DP	DP	DP	DP	0,6	0
75		DP	DP							DP	0,4	0
73											0	0

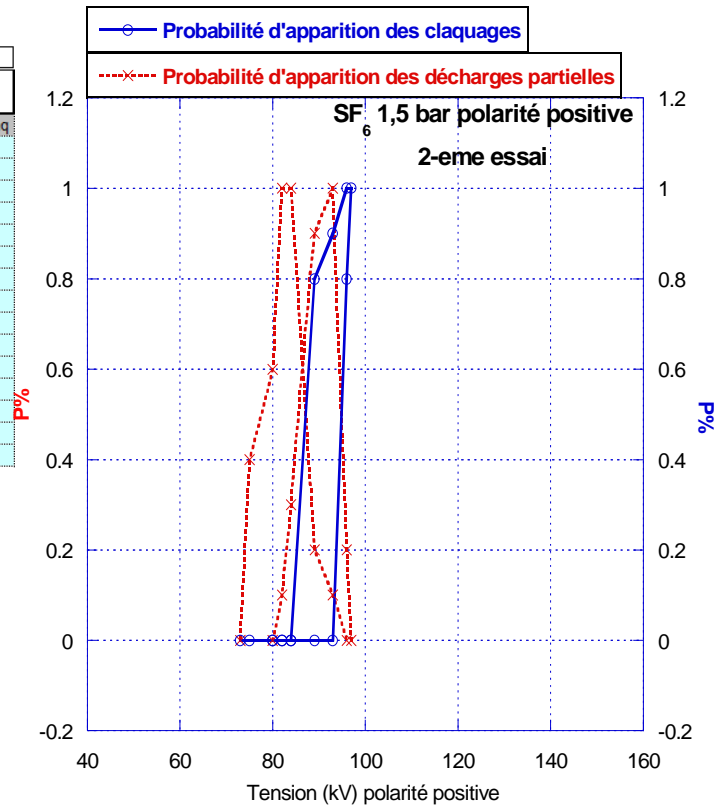


Figure 4.21. Hystérésis des tensions de claquage et d'apparition des DP dans le SF₆ à 1,5 bars, polarité positive. 2^{ème} essai.

Un autre essai a été réalisé avec l'isolant déchargé, en minimisant le nombre de claquages, pour observer s'il y a une influence des claquages sur le nombre des DP sur la pente descendante de l'hystérésis. La Figure 4.22 montre que les valeurs des tensions sont presque identiques, mais les claquages se produisent sur un écart plus grand de tension (de 98 à 89 kV).

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
07/10/2008	SF6		positive		après 20h							
	1,5 bar											
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
73	DP										0,1	0
75											0	0
82											0	0
89											0	0
93	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,9	0
96	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
98	Cl										0	1
96	Cl										0	1
93	Cl										0	1
89	Cl										0	1
84	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,8	0
82											0	0

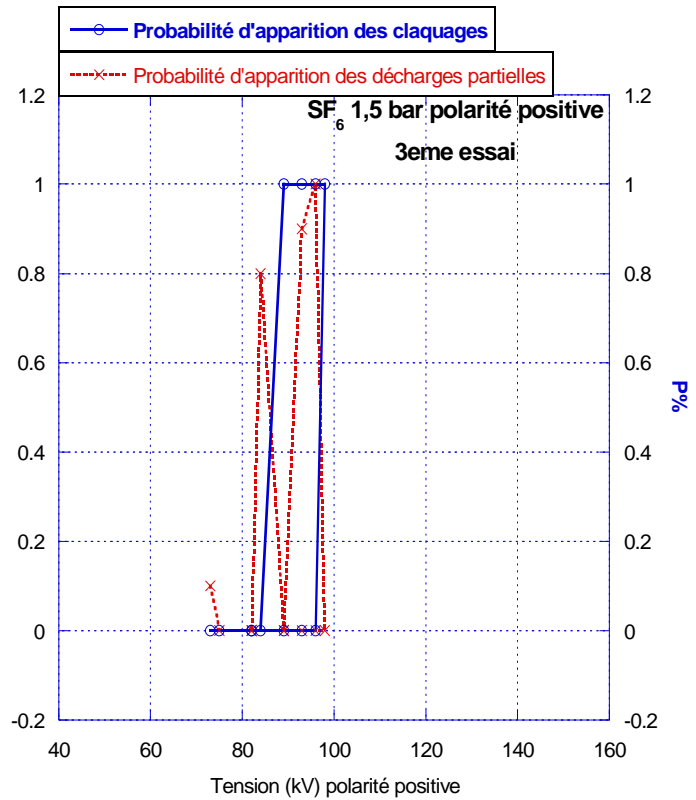


Figure 4.22. Hystérésis des tensions de claquage et d'apparition des DP dans le SF₆ à 1,5 bars, polarité positive. 3^{ème} essai

La cellule a été remplie avec du SF₆ à 4,5 bar, avec l'isolant déchargé. Le premier et le deuxième essai ont été réalisés en tension impulsionnelle de polarité positive, sans temps de repos. Les deux courbes (Figure 4.23) montrent une quasi-absence des DP en polarité positive. Les trois DP dans le deuxième essai sont observées en tension descendante.

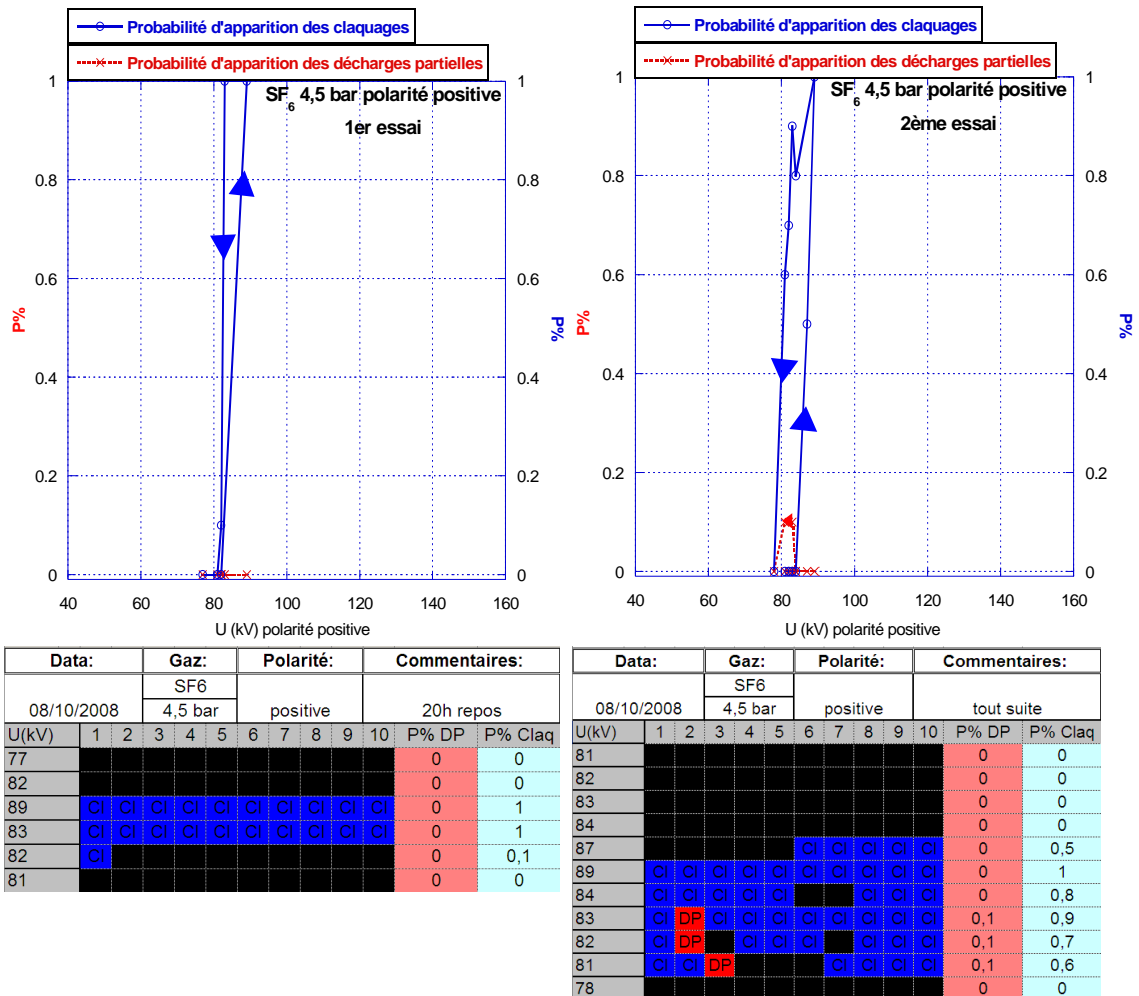


Figure 4.23. Phénomène d'hystérésis dans SF6 à 4,5 bar, en tension impulsionnelle positive.

Changement de polarité

Avec l'isolant déchargé, la polarité de la tension impulsionnelle a été changée, en négative (Figure 4.24). Sur la pente montante, on observe toujours une diminution du nombre des DPs par rapport à la pression de 1,5 bar.

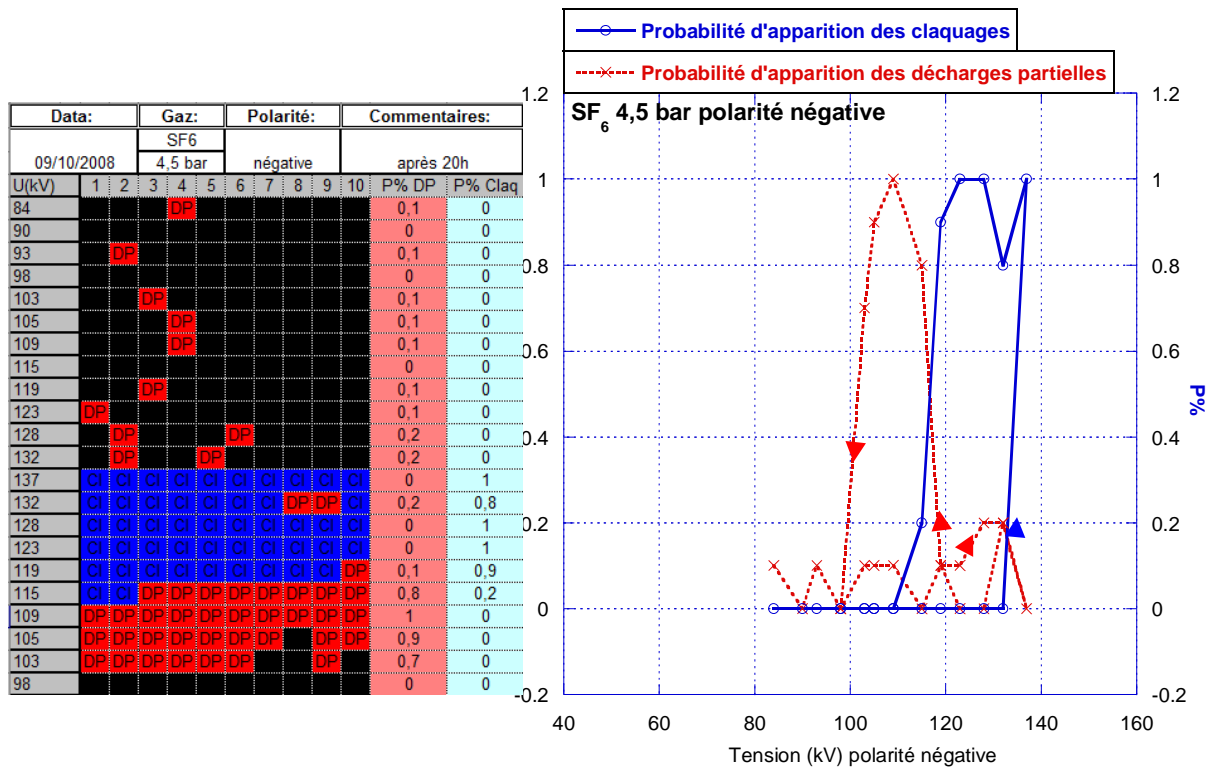


Figure 4.24. Phénomène d'hystérésis dans SF6 à 4,5 bar, en tension impulsionnelle négative.

Puis, sans repos, on a changé de nouveau la polarité en positif, pour voir l'influence des claquages produits en polarité négative sur les DPs et éventuellement les claquages en polarité positive (Figure 4.25).

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
09/10/2008	SF6		positive		tout de suite							
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
82	Cl										0	1
81	Cl										0	1
79	Cl										0	1
77	Cl		Cl	Cl	Cl		Cl	Cl		Cl	0	0,7
75	Cl										0	0,1
73											0	0

Figure 4.25. Diminution des tensions de claquage après l'inversion de polarité de la tension impulsionnelle.

Au premier palier à 82kV (tension de départ des essais), un claquage est observé. Ensuite, la tension est immédiatement descendue (sans faire les 10 impulsions successifs) à 81kV où un impulsion donne un claquage, puis à 79kV où une impulsion donne un claquage, puis à 77kV où sur 10 impulsions on obtient 7 claquages et zéro DPs et, enfin, à 73kV où aucun phénomène n'est observé. Par rapport aux essais précédents, on observe qu'en tension

descendante, le claquage se produit pour des valeurs plus faibles de la tension (75kV après inversion de la polarité au lieu de 81kV pour les essais sans changer la polarité).

De nouveau, avec l'isolant déchargé, plusieurs essais ont été réalisés, en changeant la polarité de la tension appliquée (Figure 4.26 et Tableau 4-1).

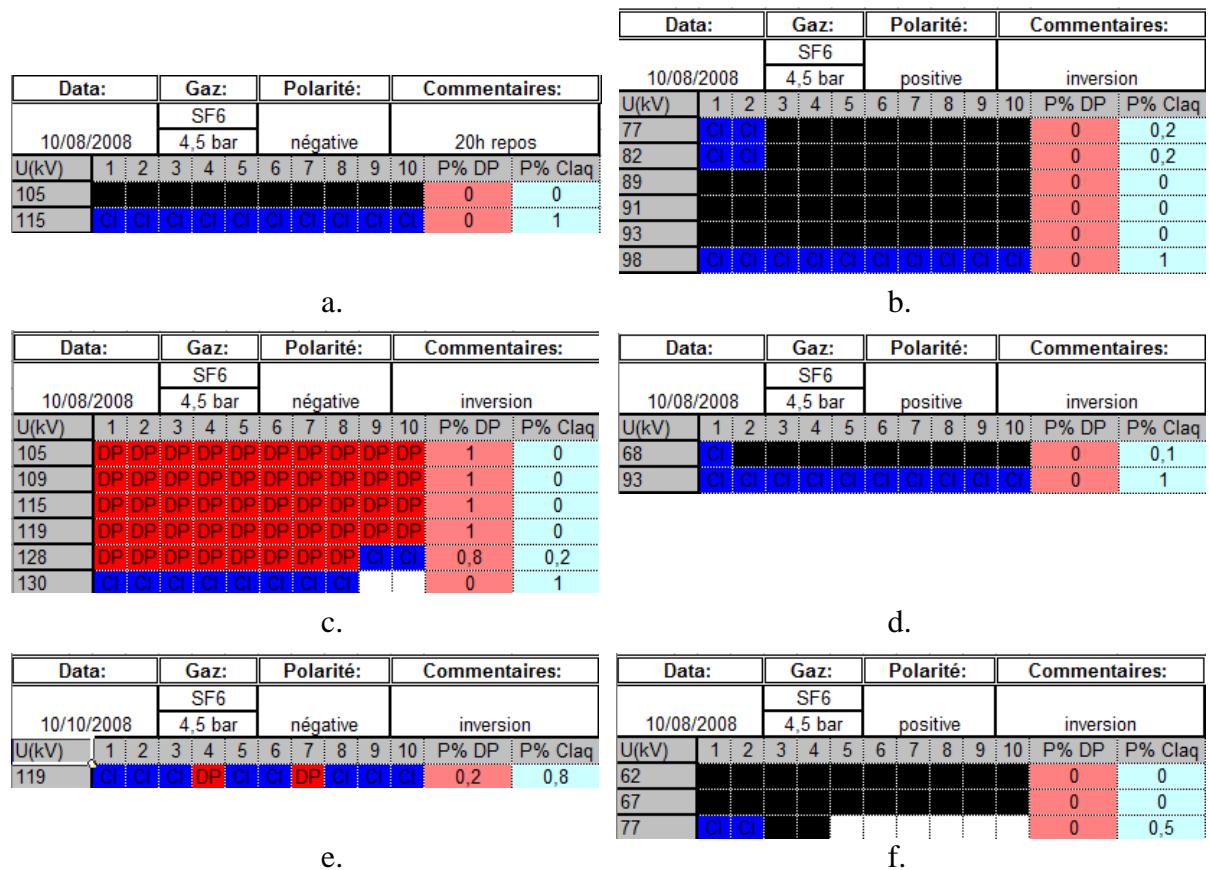


Figure 4.26. Essais en changeant la polarité de la tension appliquée dans le SF₆, à 4,5 bars.

Après 100% de probabilité de claquage en tension négative atteinte au deuxième palier appliqué à 115kV (après un palier à 105kV sans aucun phénomène) - Figure 4.26a, la polarité a été changée en positive et à 77kV les deux premiers coups de la série de dix sont des claquages et, ensuite, nous n'observons plus aucun phénomène - Figure 4.26b. En montant à 82kV, les deux premiers coups ont été des claquages et ensuite plus aucun phénomène. On a plusieurs paliers (89 ; 91 et 93kV) sans apparition de DPs ou de claquage. Il a fallu atteindre 98kV (à comparer à 89 pour les premiers essais) pour avoir 100% de probabilité de claquage. Après encore un changement de polarité en négative, on a vu 100% probabilité de DP de -105kV à -128kV, où, à partir du 8^{ème} coup, on a claquage. A -130kV, la probabilité de claquage est de 100% - Figure 4.26c.

TABLEAU 4-3. ESSAIS EN CHANGEANT LA POLARITE DE LA TENSION APPLIQUEE DANS LE SF₆, A 4,5 BAR.

	Tension négative (kV)	Tension positive (kV)
100% probabilité de claquage	115	
1 ^{er} claquage		77
100% probabilité de claquage		98
1 ^{er} claquage	128	
100% probabilité de claquage	130	
1 ^{er} claquage		68
100% probabilité de claquage		93
1 ^{er} claquage	119	
100% probabilité de claquage	119	
1 ^{er} claquage		77

En changeant de nouveau la polarité de la tension - Figure 4.26d, à 68 kV, au premier essai, un claquage apparaît, puis plus rien, pendant les 9 coups suivants. A 93kV on a 100% de probabilité de claquage.

En négatif, en commençant à 119kV, on a 80% de probabilité de claquage - Figure 4.26e. En retournant en polarité positive - Figure 4.26f, à 62kV puis à 68kV rien, et à 77kV les deux premiers coups on été des claquages.

Commentaires

Cette série d'essais a démontré la complexité des phénomènes mesurés sous tension impulsionnelle, dont les résultats dépendent fortement des essais précédents, et pour lesquelles il est très difficile de stabiliser des conditions reproductibles. En positif, dans ces conditions (SF₆ à 4,5 bar et à 1,5 bar) les DP's apparaissent très rarement avant le claquage, par contre en négatif, les DP's sont présentes même à des tensions inférieures de 25kV au claquage. Les tensions de claquage sont nettement plus faibles en positif (à partir de 81kV pour 1,5 bar et de 68kV pour 4,5 bar) qu'en négatif (à partir de 119kV pour 1,5 bar et 103kV pour 4,5 bar). Pour ces deux pressions, les résultats étant trop dispersés, il n'est pas possible d'évaluer l'influence de la pression.

4.2.2. Dans l'Air Sec

La Figure 4.27 montre l'hystérésis observée dans la polarité négative. Par rapport au SF₆, les hystérésis, sur le domaine de claquage et surtout sur celui des DP sont plus importants. Comme attendu, les tensions de claquage et d'apparition des DP sont plus faibles dans l'air sec que dans le SF₆.

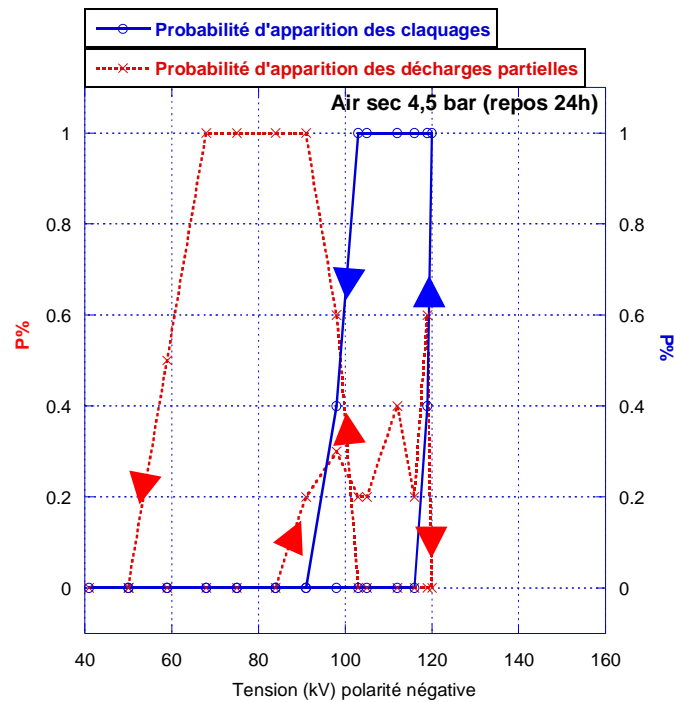


Figure 4.27. Phénomène d'hystérésis dans Air Sec à 4,5 bar, en tension impulsionnelle négative.

Sans décharger complètement l'isolant (3 heures de repos), la polarité a été inversée en positive, la première DP est apparue à 34kV et la tension de 100% de probabilité d'apparition des DP est de 71kV. Le premier claquage apparaît à 89kV et la tension à 100% de probabilité de claquage est de 91kV (Figure 4.28). A cause des charges déposées sur la surface, le phénomène d'hystérésis disparaît pour les DP.

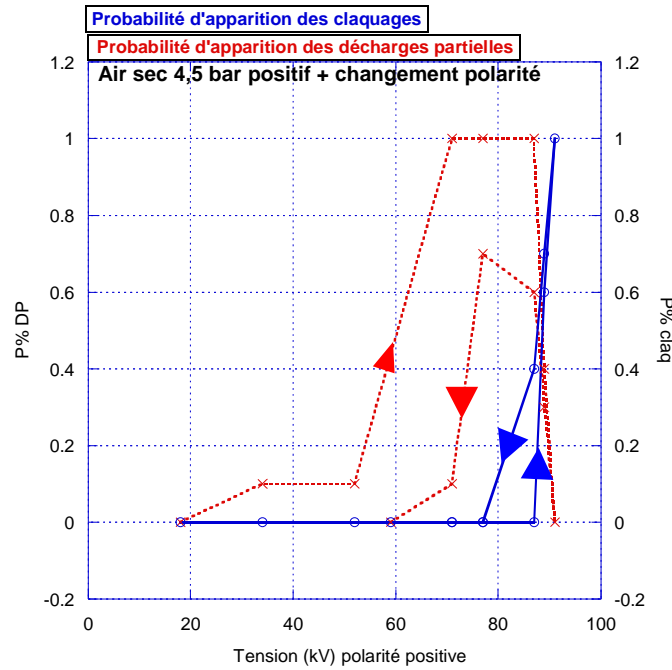


Figure 4.28. Phénomène d'hystérésis dans Air Sec à 4,5 bar, en tension impulsionnelle positive.

La polarité a été inversée de nouveau (en négatif) et la première DP a été observée à 50kV (91kV lors du premier essai), 100% de probabilité des DP à 84kV (119kV lors du premier essai), le premier claquage à 98kV (119kV), 100% de claquages à 121 (120 pour le premier essai) - Figure 4.29.

Data:		Gaz:		Polarité:						Commentaires:		
21/10/2008		Air Sec		négative						changement polarité		
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
50	DP								DP		0,2	0
68	DP			DP							0,2	0
84	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
91	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
98	CI	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,9	0,1
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
105	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
112	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
116	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
119	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
121	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	CI	0	1

Figure 4.29. Essais après un changement de polarité de la tension dans l'air sec à 4,5 bars.

Après un autre changement de polarité, en positif, la première DP est apparue à 52kV et 100% DP à 77kV. Les valeurs sont donc comparables aux celles précédentes (Figure 4.30).

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
21/10/2008	Air Sec		positive		changement polarité							
	4,5 bar											
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
10											0	0
20											0	0
30	DP										0,1	0
40	DP	DP	DP	DP					DP		0,5	0
45	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0

Figure 4.30. Essais après un changement de polarité de la tension dans l'air sec à 4,5 bars.

Pour la polarité positive, avec l'isolant reposé les probabilités des tensions d'apparition des DP et de celle de claquage son montrées sur la Figure 4.31. On remarque que dans ce cas il n'existe pas d'hystérésis sur les DP.

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
27/10/2008	Air Sec		positive									
	4,5 bar											
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
34											0	0
52	DP										0,1	0
71	DP	DP	DP	DP	DP						0,5	0
79	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
87	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
91	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
100	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
105	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
112	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
119	DP	DP	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0,2	0,8
120	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
119	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
112	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
100	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
91	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
87	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
79	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,9	0
71									DP		0,1	0
67											0	0

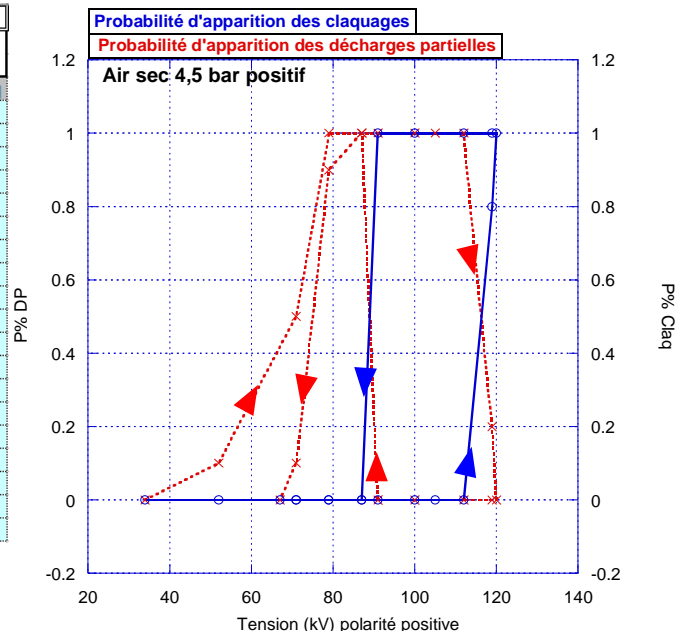


Figure 4.31. Phénomène d'hystérésis dans Air Sec à 4,5 bars, en tension impulsionnelle positive.

Deux séries de mesures ont été réalisées pour déterminer les courbes d'hystérésis en fonction du temps de repos. La Figure 4.32a correspond à des mesures après 48 heures de repos et la Figure 4.32b à des mesures effectuées 1 heure après la fin de la première série. Rappelons que l'isolant ne peut pas se décharger sur une durée d'une heure. Avec l'isolant déchargé, on n'observe aucune hystérésis sur le phénomène de DP et une hystérésis très faible sur les tensions de claquage. Ensuite, après 1h de repos, on remarque uniquement une légère augmentation de l'hystérésis sur la tension de claquage montante et descendante. On peut aussi noter que les tensions de claquage en tension montante ou descendante son pratiquement identiques pour les deux polarités, sauf le premier essai dans l'air sec.

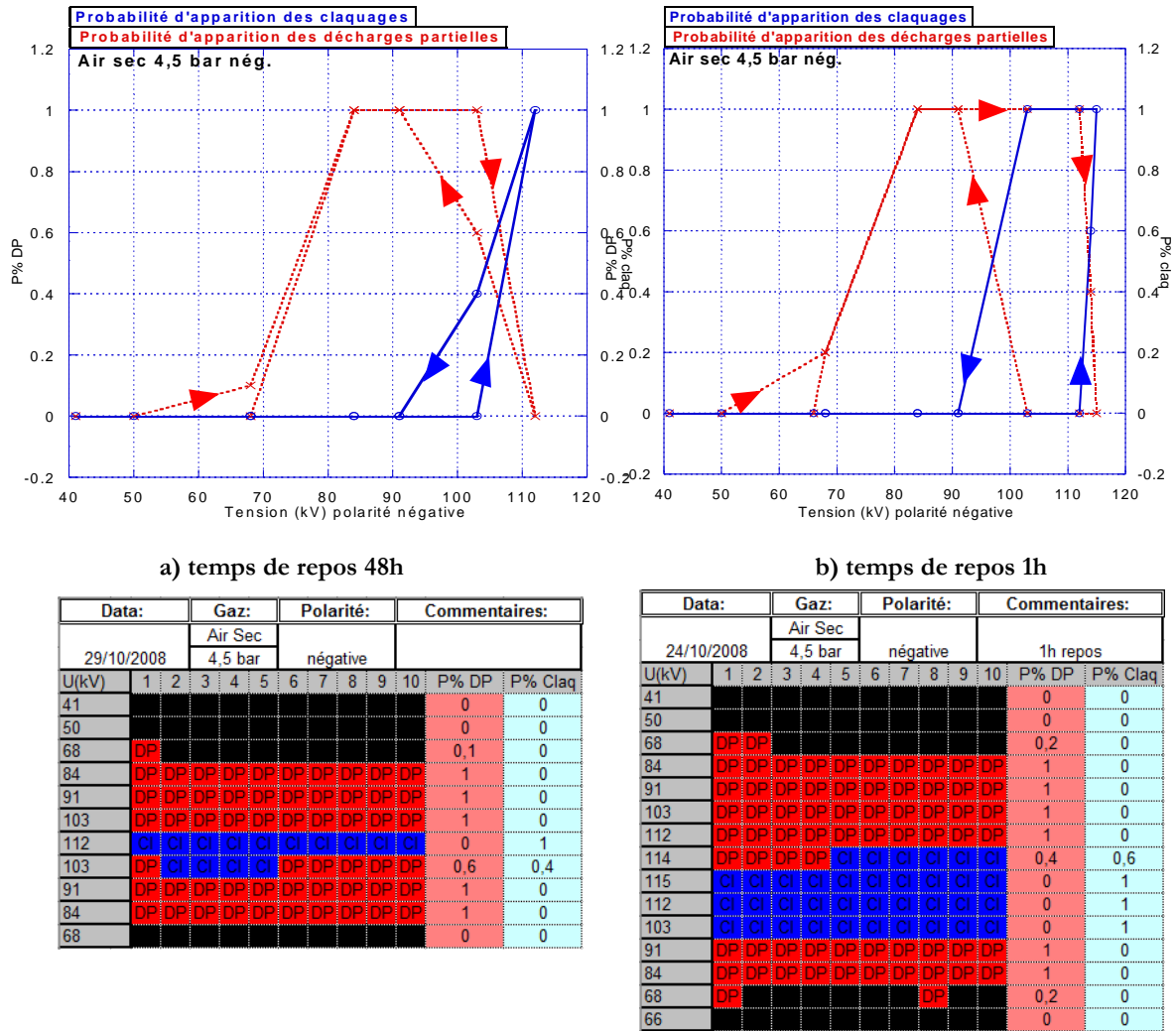
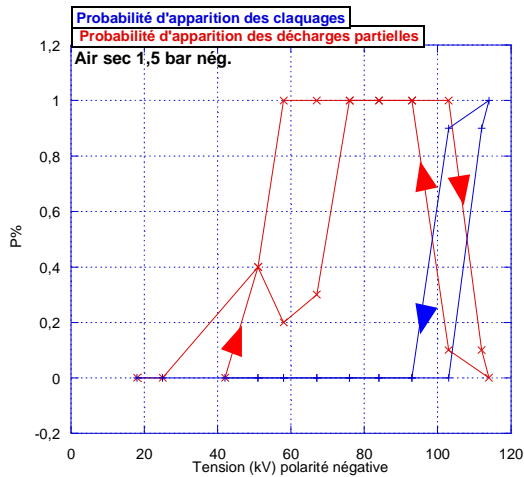


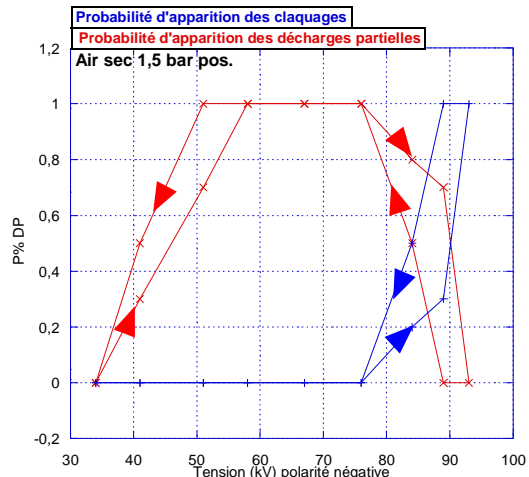
Figure 4.32. Phénomène d'hystérésis dans Air Sec à 4,5 bars, en tension impulsionnelle négative.

Un autre essai a été réalisé pour déterminer l'influence de la charge déposée sur l'isolant. La tension a été augmentée par paliers de dix coups jusqu'à atteindre 100% probabilité de DP (sans avoir de claquage). Immédiatement, la polarité est inversée. Les résultats montrent qu'après cette inversion de polarité, la première DP est obtenue avec la plus faible tension que nous pouvons appliquer avec notre générateur de Marx (soit 18kV). Après cette première DP, les neuf coups suivants ne produisent aucun phénomène. Ensuite, en augmentant la tension par paliers de 17kV chaque premier coup induit un DP et les 9 suivants rien. Il faut atteindre 71kV pour la polarité positive et 82kV pour la négative pour avoir 100% de probabilité de DPs. Ces résultats sont comparables à ceux obtenus avec l'isolant déchargé pendant 48h (Figure 4.32a).

Dans l'air sec à 1,5 bar, les essais ont commencé avec l'isolant déchargé, avec l'alternance négative (Figure 4.33a) et, ensuite, avec celle positive (Figure 4.33b). Les résultats montrent une très faible hystérésis pour les DPs.



a) polarité négative



b) polarité positive

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
27/11/2008	Air Sec 1,5 bar		négative		24h repos							
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
18											0	0
25											0	0
51	DP	DP	DP	DP							0,4	0
58						DP			DP		0,2	0
67	DP	DP				DP					0,3	0
76	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
84	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
93	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
103	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
112	DP	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0,1	0,9
114	Cl										0	1
103	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0,1	0,9
93	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
84	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
76	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
67	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
58	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
51					DP	DP		DP	DP		0,4	0
42											0	0

Data:	Gaz:		Polarité:		Commentaires:							
03/12/2008	Air Sec 1,5 bar		positive		24h repos							
U(kV)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	P% DP	P% Claq
34											0	0
41		DP	DP	DP							0,3	0
51	DP			DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,7	0
58	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
67	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
76	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
84	Cl	Cl	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	0,8	0,2
89	DP	DP	Cl	DP	DP	DP	Cl	Cl	DP	DP	0,7	0,3
93	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
89	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	0	1
84	Cl	Cl	Cl	Cl	Cl	DP	DP	DP	DP	DP	0,5	0,5
76	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
67	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
58	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
51	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	DP	1	0
41	DP	DP	DP			DP				DP	0,5	0
34											0	0

Figure 4.33. Etude des tensions de claquage et d'apparition des DP dans l'air sec à 1,5 bar.

4.2.3. Commentaires sur l'effet d'une particule fixée

Pour conclure sur ces essais, dans le SF₆ le domaine des DP est beaucoup moins important que dans l'air sec. Les résultats dépendent de l'historique subi par l'isolant pour les DP dans les deux gaz et dans une moindre mesure pour les claquages.

Le Tableau 4-4 montre les valeurs de la tension de claquage à 100% probabilité, pour un isolant initialement déchargé, dans les deux gaz étudiés. On observe une différence importante, surtout pour le SF₆, entre les valeurs mesurées dans les deux polarités. Les

résultats sont en concordance avec d'autres études réalisées sans solide isolant, dans des distributions du champ électrique fortement divergent [52].

Le tableau 4-4 indique en effet des valeurs sous impulsion peu différentes dans l'air et le SF₆ à quelques exceptions près. Il existe donc une forte dégradation dans le cas du SF₆ à forte pression. L'effet de la particule métallique est de rendre beaucoup plus facile la génération de décharges, et dans les deux gaz, le claquage est déterminé par les conditions de propagation, de manière tout à fait comparable à ce qui a été observé en tension alternative avec particule.

Dans le SF₆, on passe d'une situation où le claquage sans particule est déterminé essentiellement par les conditions d'apparition de DP (qui dépendent de la pression), à celle où ce sont les conditions de propagation (peu dépendantes de la pression) qui deviennent prépondérantes. La comparaison entre les valeurs mesurées en alternatif et impulsions avec particule dans le SF₆ ne montrent pas de très grandes différences. Dans l'air, les valeurs mesurées en alternatif avec ou sans particule sont sensiblement inférieures à celles mesurées sous impulsions de tension. On peut supposer que ceci est lié au dépôt de charge important sous tension alternative dû aux DP de fortes amplitudes existant dans l'air.

TABLEAU 4-4. COMPARAISON ENTRE LES TENSIONS DE CLAQUAGE (100%) DANS LE SF₆ ET L'AIR SEC SOUS IMPULSIONS DE TENSION DANS LA GEOMETRIE AVEC DEFECT EN UTILISANT UN ISOLANT DECHARGE, ET COMPARAISON AVEC LES MESURES EN ALTERNATIF

Pression (bar)	SF ₆				Air Sec			
	Négatif	Positif	Alternatif avec part.	Alternatif sans part.	Négatif	Positif	Alternatif avec part.	Alternatif sans part.
1,5	144	93	78	92	112	93	72	73
4,5	115- 137	89	91	169	120	120	50	81

4.3. Décharges apparaissant après l'impulsion de tension

Le système de détection optique mis en place sous tension impulsionnelle a permis de mettre en évidence dans l'air l'existence de DP pouvant apparaître à tension nulle, pendant un temps long (plusieurs minutes) suivant l'application d'une impulsion de tension. En mettant en parallèle avec la sortie de la caméra haute sensibilité un écran vidéo, des DP ont été observées après la fin de l'application de l'impulsion de tension. Ces DP peuvent varier en

intensité, nombre et répartition dans le temps, ceci après la mise à la terre de tout le système. Pour mieux caractériser l'apparition de ces DP, le système de mesure a été modifié. Un relais haute-tension a été mis entre la cellule et la masse pour basculer entre la masse et le système ICM de mesure de DP.

Les mesures réalisées à l'aide de ce montage ont confirmé par mesure électrique l'apparition des DP (antérieurement détectées optiquement) dans le système après la fin de l'application de l'impulsion de tension. Par exemple, une acquisition de l'ICM pendant 140s est montrée dans la Figure 4.34. Les premières décharges sur la figure sont dues au bruit produit par l'onde de tension et ensuite, une seconde après, au déclenchement du relais HT.

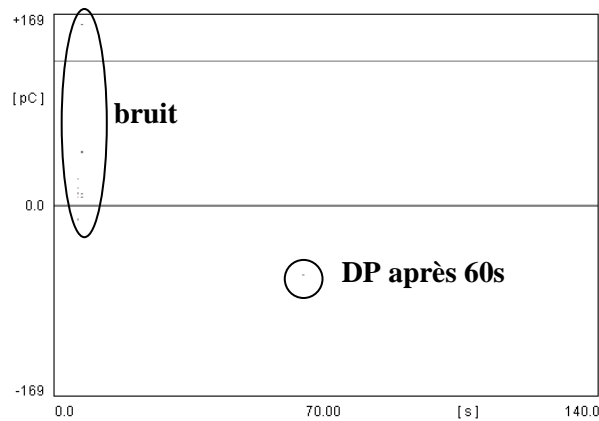


Figure 4.34. Acquisition de l'ICM pendant 140s après l'application d'une impulsion HT +72kV dans l'air sec à 4,5 bars

Plusieurs expériences ont été réalisées dans l'air sec à 4,5 bars en appliquant une impulsion positive. Le temps d'acquisition a été de 2 minutes.

- $U_{app}=+72kV$; $Q_{DP}=62$ pC ; $T_{DP}=58s$;
- $U_{app}=+72kV$; $Q_{DP}=62$ pC ; $T_{DP}=30,2s$;
- $U_{app}=+72kV$; $Q_{DP}=16,9$ pC ; 19,2 pC ; 13,9 pC ; 11 pC ; $T_{DP}=8,3$ s ; 85,7 s ; 88,4 s ; 89,5 s ;
- $U_{app}=+78kV$; 0 DP
- $U_{app}=+78kV$; $Q_{DP}=90$ pC ; $T_{DP}=6,8$ s – cette DP n'a pas été visualisée (n.v.)
- $U_{app}=+80kV$; $Q_{DP}= 58,9$ pC ; 7,2 pC (n.v.) ; 57,6 pC ; 61,5 pC ;
 - $T_{DP}= 10,5$ s ; 22,5 s ; 39 s ; 98,3 s ; enregistrée Figure 4.35a.
- $U_{app}=+83kV$; 0 DP
- $U_{app}=+83kV$; $Q_{DP}=58,94$ pC ; $T_{DP}=16s$

- $U_{app}=+83kV$; $Q_{DP}=68,21 pC$; 58,9 pC ; 60,2 pC ; 64,2 pC ; 60,2 pC ; 61,5 pC ;
 - $T_{DP}=4,4 s$; 10,4 s ; 18,1 s ; 30,7 s ; 51 s ; 99 s ; enregistrée Figure 4.35b.

La figure 4 montre les deux acquisitions réalisées à 80 kV et 83 kV, avec plusieurs DPs qui se produisent dans la cellule.

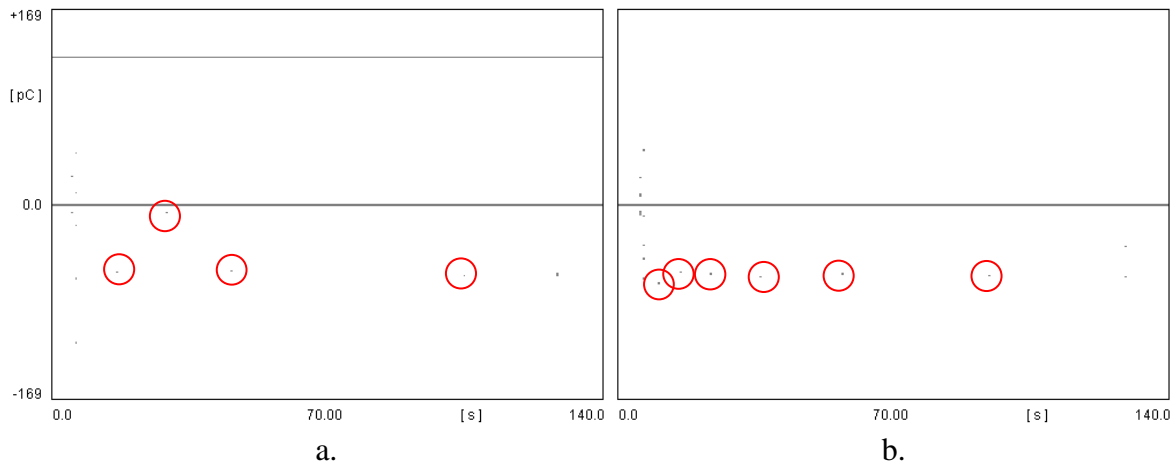


Figure 4.35. Acquisition de l'ICMSysystem pendant 120s après l'application d'une impulsion HT de a. +80kV et b. +83kV dans l'air sec à 4,5 bars.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces mesures :

- Toutes les décharges qui apparaissent après la mise à la terre du système sont, sans exception, de signe négatif, quand le signe de l'impulsion de tension est positif; la surface de l'isolant étant chargée positivement par les DPs produites pendant l'application de l'onde de tension positive.
- La majorité des décharges est visible entre le défaut et l'électrode centrale, mais des DPs qui ne sont pas détectées optiquement (à cause de leur emplacement dans le système ou leur intensité lumineuse) peuvent également apparaître.
- Les DPs peuvent apparaître après plusieurs minutes après la fin de l'application de la tension impulsionnelle.
- Il y a des valeurs de DPs qui se répètent dans plusieurs essais (58,9 pC, 60,2 pC) ce qui peut être expliqué par la distance fixe entre le défaut et l'électrode centrale.
- Les expériences avec une impulsion de tension négative n'ont pas montré des DPs pendant le temps d'acquisition de 120 secondes après l'application de la tension.
- Dans le SF6, les observations optiques n'ont pas été possibles, en raison de la faible lumière émise et du bruit de fond du PM et de la caméra.

4.4. Effet des claquages sur l'isolant

Après tous les essais dans cette géométrie avec défaut, la cellule a été démontée et la surface près du défaut a été photographiée. On observe la dégradation importante subie par l'isolant à cause des multiples claquages produits à partir du défaut (Figure 4.36 et Figure 4.37).

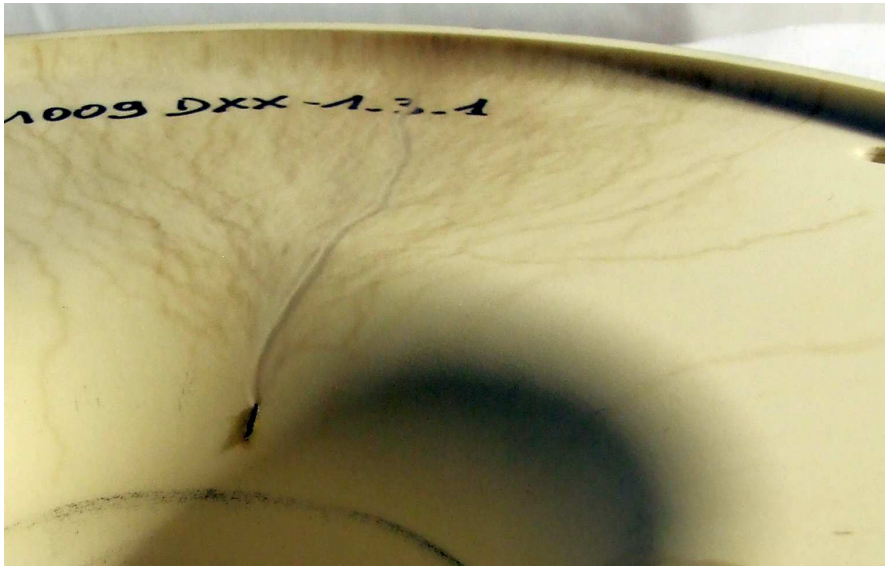


Figure 4.36. La rayure présente sur la surface de l'isolant dans le voisinage du défaut dans le PT, après plusieurs claquages



Figure 4.37. Détail de la rayure présente sur la surface de l'isolant dans le voisinage du défaut dans le PT, après plusieurs claquages

4.5. Conclusions

Un défaut de fabrication ou d'assemblage d'un système électrique a été simulé, en collant sur l'isolant porteur en résine époxy une particule métallique en tungstène (0,5 mm de diamètre et 5 mm en longueur) à une distance de 2 mm de l'électrode centrale. Les signatures des mesures électriques de DP sont modifiées, des nouvelles espèces des DP, dues à l'emplacement de la particule, sont apparues. La valeur de ces DP est fortement dépendante de la phase de la tension alternative appliquée.

Les valeurs de tensions d'apparition des DP et de tensions de claquage sont diminuées sensiblement, et l'influence de la pression disparaît dans le cas du SF₆. Dans l'air sec on observe même une baisse de la tenue électrique de la cellule, avec l'augmentation de la pression. L'influence de la particule est de faciliter l'apparition de décharges, et les caractéristiques mesurées se rapprochent de celles observées avec un système pointe-plan.

Sous tension impulsionnelle, l'effet des charges déposées sur la surface de l'isolant est de nouveau visible, avec des DP qui apparaissent à des tensions très basses en changeant la polarité. Le phénomène d'hystérésis des tensions d'apparition des DP et de claquage a été longuement analysé, en fonction de la pression (1,5 et 4,5 bar) des deux gaz utilisés dans les essais (SF₆ et air sec). Ce phénomène dépend fortement de « l'histoire » de l'isolant (c'est-à-dire les DP et/ou les claquages subis), du gaz utilisé et de la pression, et rend très difficile la réalisation d'expériences dans des conditions parfaitement contrôlées.

Un phénomène nouveau observé dans l'air est l'apparition de DP après un temps long (2 minutes) après la coupure de la tension et la mise à la masse du système. Les charges sur la surface de l'isolant solide en époxy s'accumulent pour finalement produire un champ électrique suffisant pour l'amorçage d'une DP entre le fil conducteur et l'électrode centrale mis à la terre.

Du point de vue des applications, la présence d'une particule conductrice introduit une forte dégradation de la tenue du SF₆, particulièrement à forte pression. L'influence bénéfique d'une haute pression disparaît dans ces conditions. La mise en évidence de décharges partielles à tension nulle suite à l'application d'une impulsion générant des DP mais ne conduisant pas au claquage a été observée dans l'air. Si ce phénomène peut également exister dans le SF₆, cela pourrait avoir des conséquences pratiques non négligeables, le système étant « fragilisé » pendant un temps long suivant un choc de foudre ou une surtension temporaire.

5. Cellule à barrière diélectrique

Une cellule à champ uniforme a été conçue pour déterminer dans de meilleures conditions (à épaisseur de gaz constante) les tensions d'apparition des DP en fonction du gaz et de sa pression. Dans la littérature [14], en utilisant la méthode dite du « condensateur en coin » (deux électrodes planes formant un dièdre de faible ouverture dont un est recouverte d'une couche isolante) on trouve les tensions de Paschen. Nous avons voulu vérifier si, dans une géométrie simple, ceci est retrouvé. Un autre objectif était de pouvoir déterminer expérimentalement la quantité de charge réelle déposée sur l'isolant par les DP. En effet, en champ uniforme les capacités du circuit équivalent peuvent être connues, ce qui permet en principe de calculer le rapport entre la charge réelle et la charge apparente. Il faut toutefois être en mesure de connaître la charge totale par demi-alternance pour pouvoir calculer la charge déposée sur toute la cellule.

5.1. Tensions d'apparition des DP

Les essais ont eu lieu en **tension alternative** pour la distance de 0,5 mm entre l'électrode métallique et l'isolant en plexiglas, pour les deux gaz SF₆ et air sec.

La tension d'apparition des DP a été mesurée pour chaque pression du gaz de 1 à 4,5 bars avec une incrémentation de 0,5 bar. Les résultats sont montrés sur la Figure 5.1. Les valeurs obtenues sont reproductibles d'un essai à l'autre. On remarque que l'allure des courbes est qualitativement comparable à celle de la géométrie précédente du PT : la valeur de la pente de la courbe du SF₆ est supérieure à celle de l'air sec. On observe aussi que le rapport $U_{\text{SF}_6} / U_{\text{air_sec}}$ reste quasiment égal à 2 pour tout le domaine de pression étudié (1 – 4,5 bars). Notons que la tension mesurée est celle appliquée sur l'ensemble de la cellule et pas seulement celle dans l'espace rempli du gaz entre l'électrode et l'isolant en PMMA.

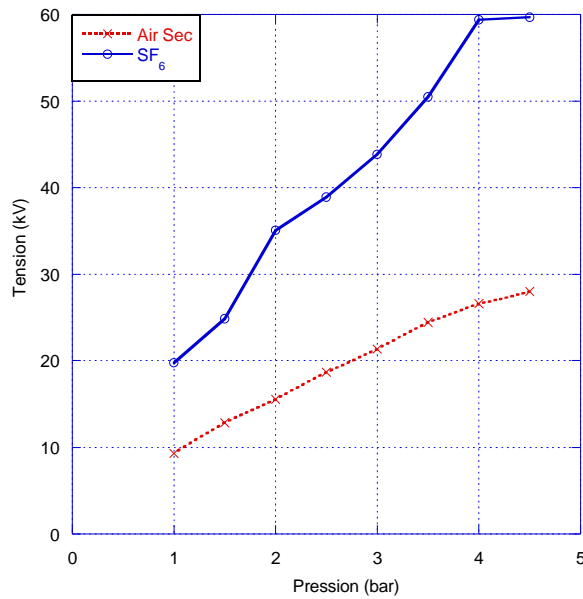


Figure 5.1. Tension d'apparition des DP en champ quasi-uniforme.

Distance entre électrode et isolant de 0,5 mm.

Une simulation à l'aide du logiciel Mathcad de la courbe de Paschen pour l'air et pour le SF₆ [14] a été réalisée (Figure 5.2). Dans cette géométrie on peut calculer précisément la tension nécessaire pour l'apparition des DP entre l'électrode métallique et l'isolant en plexiglas en fonction de la tension appliquée et des permittivités des matériaux. Pour l'air sec la tension a été estimée directement de la courbe de Paschen (Figure Chapitre 1). Pour le SF₆, la courbe a été calculée à l'aide de la courbe de Paschen mesurée pour une distance comparable (1mm) à celle de nos essais (0,5 mm) qui est différente de la courbe de Paschen « idéale » (Figure chapitre 1).

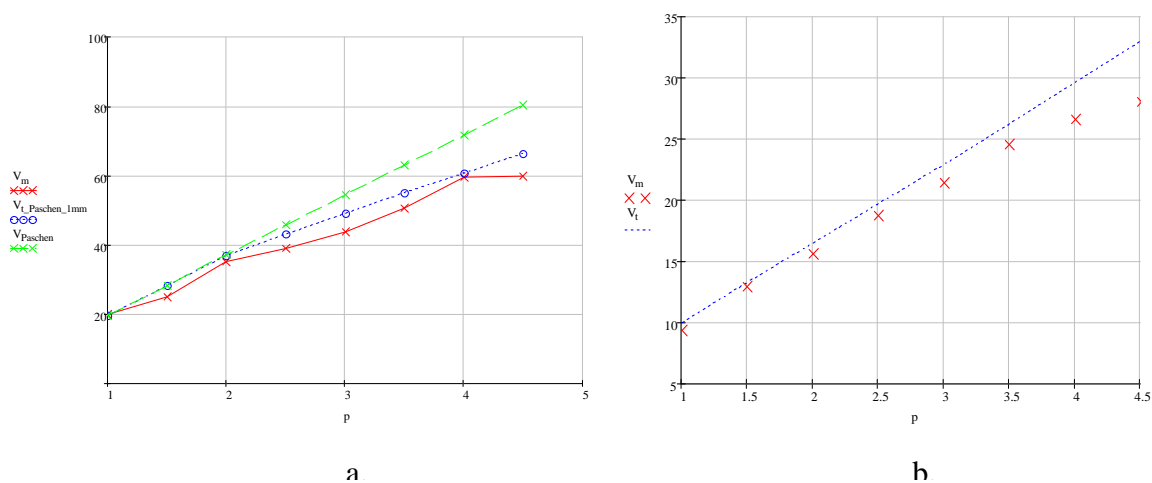


Figure 5.2. Simulations de la tension d'apparition pour

a. SF₆ et b. Air Sec. $\epsilon_{\text{plexiglas}}=3,7$

L'équation utilisée se présente sous la forme :

$$U_{théorique} = \frac{U_{Paschen}}{d_g + \frac{d_s}{\epsilon_{plexi}}}, \quad (4 - iii)$$

où : d_g est la distance entre l'électrode métallique et la plaque en plexi ; d_s est l'épaisseur du plexi ; $U_{Paschen}$ est la tension de Paschen pour le produit $p \cdot d$; ϵ_{plexi} est la valeur la permittivité du plexiglas, soit 3,7.

Par rapport aux simulations réalisées pour le PT, on ne trouve plus le facteur 0,6 entre la courbe théorique et la courbe mesurée. Une hypothèse pour expliquer cette différence est bien sûr que la distance est parfaitement connue en champ uniforme. Une autre hypothèse serait la nature différente des matériaux isolants utilisés dans les expériences (époxy et plexiglas) et leur comportement vis-à-vis de l'écoulement des charges déposées. Néanmoins, dans la littérature la valeur de la conductivité volumique du plexiglas est comparable à celle de l'époxy, calculée dans le chapitre suivant. ρ_v plexiglas peut avoir des valeurs entre 10^{13} et $6,7 \cdot 10^{13} \Omega m$ [55] (par rapport à ρ_v époxy = $2,8 \cdot 10^{16} \Omega m$). Dans le cas d'une valeur de l'humidité relative inférieure à 40%, la courbe du déclin du potentiel mesuré sur la surface des films en plexiglas est comparable à celle des échantillons en résine époxy [56, 57].

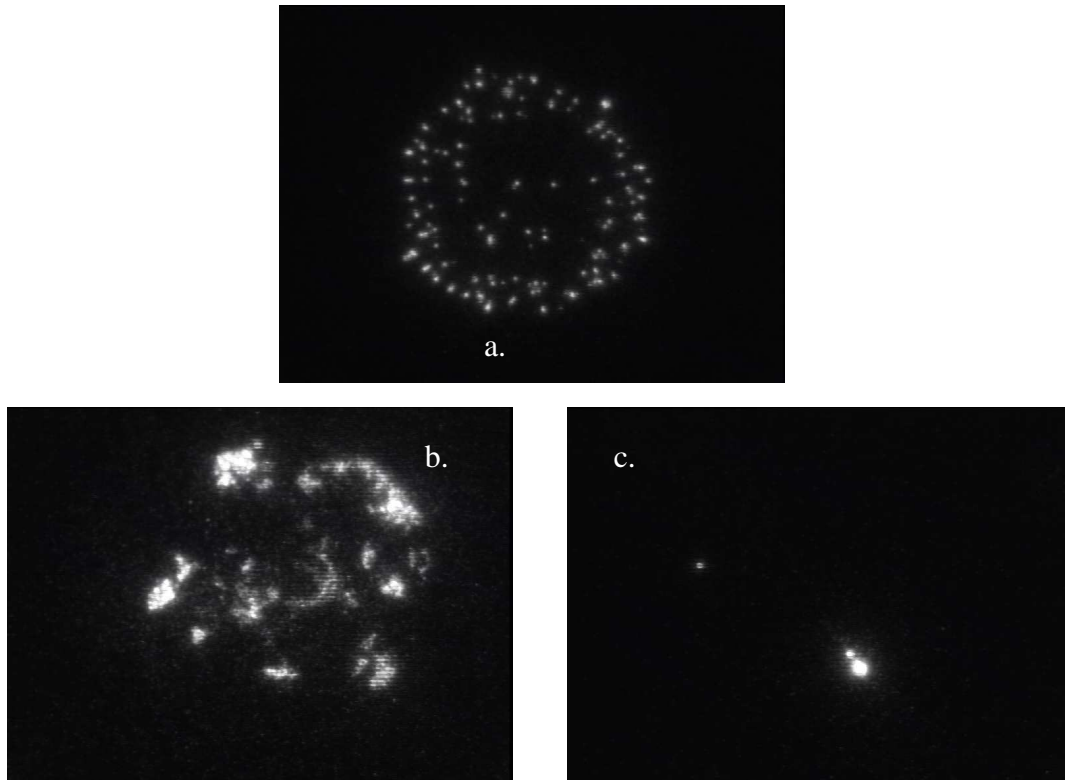


Figure 5.3. Différents types de DPs.

a) Air sec, 3,5 bars, 21,8 kV ; b) SF₆, 1,5 bars, 20 kV; c) SF₆, 4,5 bar, 42,2 kV.

Une différence importante a été observée entre le SF₆ et l'air sec concernant l'aspect visuel des DP. La Figure 5.3 montre trois acquisitions avec la caméra haute-sensibilité pour chacun de ces gaz. L'air sec produit des DP ponctuelles pour toutes les pressions (Figure 5.3a) alors que dans le SF₆, de 1 jusqu'à 3 bars les décharges sont plus diffuses (Figure 5.3b). A partir de 3,5 bars, dans le SF₆, avant le claquage, des décharges ponctuelles se produisent systématiquement en certains points de l'électrode (Figure 5.3c), sans se répandre sur la totalité de la surface. Ce phénomène est explicable par l'importance des défauts de surface (aspérités), en utilisant des gaz électronégatifs à hautes pressions (le cas du SF₆).

Nous pouvons observer sur les photos de la Figure 5.3 que, malgré l'attention donnée, il y a une zone préférentielle vers l'extérieur de l'électrode métallique pour l'apparition des DP (surtout à des valeurs de tension peu supérieures à U_{DP}). Cette préférence est déterminée par le faible renforcement du champ présent, qui a été déjà déterminé analytiquement dans le deuxième chapitre (Figure 5.4).

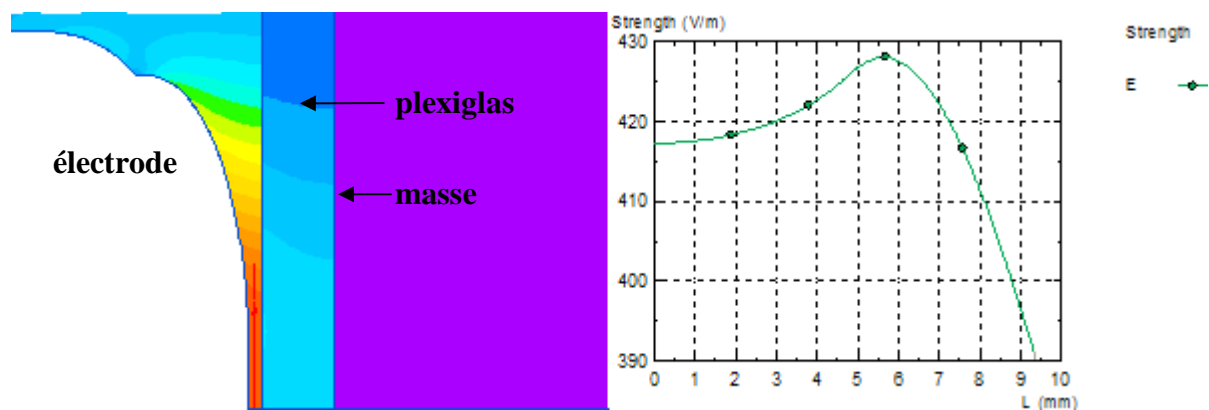
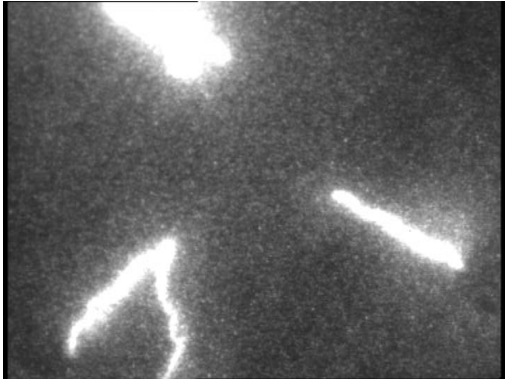
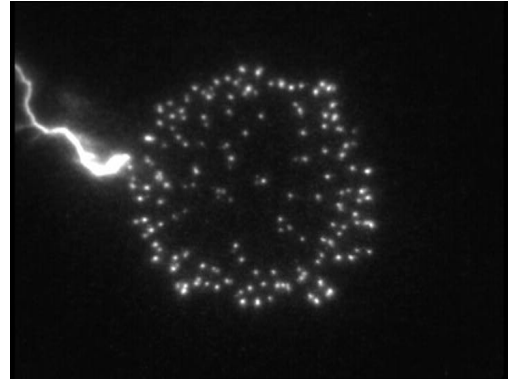


Figure 5.4. Répartition du champ électrique dans le cas d'une courbure ellipsoïdale

Dans le SF₆, la valeur de la tension d'apparition des DP est proche de la tension de claquage comme cela été observé dans la configuration du PT. Dans cette géométrie à champ uniforme, à la pression de 4,5 bars, si on applique pendant 30s une tension correspondant à la tension d'apparition des DP (soit 42,2 kV RMS), un claquage se produit entre l'électrode métallique et la masse (Figure 5.5a).



a.



b.

Figure 5.5. **a.** claquage dans le SF₆ à la tension de 42,2 kV RMS, entre l'électrode métallique centrale et la masse, sur la surface de l'isolant en plexiglas ; **b.** décharge rampante (pas de claquage observé) sur la surface de l'isolant, dans l'air sec à 3,5 bars, à la tension de 21,2 kV RMS

Sur la Figure 5.6 (détail) on observe la dégradation de la cale 0,5 mm en téflon due à un claquage. Après le claquage, la cellule a été démontée et nettoyée pour éliminer les éventuels effets de la dégradation de la surface du plexiglas.

Un autre phénomène observé est l'apparition de décharges rampantes, sur la surface de l'isolant (Figure 22 b). Ce phénomène n'est apparu que dans l'air sec et ceci pour toutes les pressions utilisées.

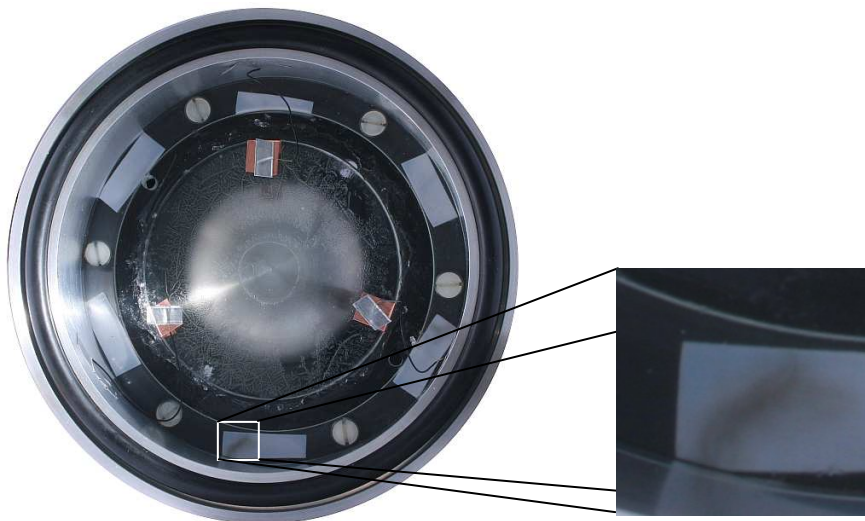


Figure 5.6. Dégradation suite lors d'un claquage dans la cellule d'essai.

5.2. Circuit électrique pour la mesure des DP par alternance

Un circuit différentiel pour une mesure électrique plus précise des DP sur chaque alternance de la tension d'alimentation a été conçu. Il s'agit d'un pont capacitif dont une des capacités est la cellule de mesure. Le signal de sortie est amplifié par un amplificateur opérationnel et il est envoyé vers un oscilloscope numérique pour l'acquisition.

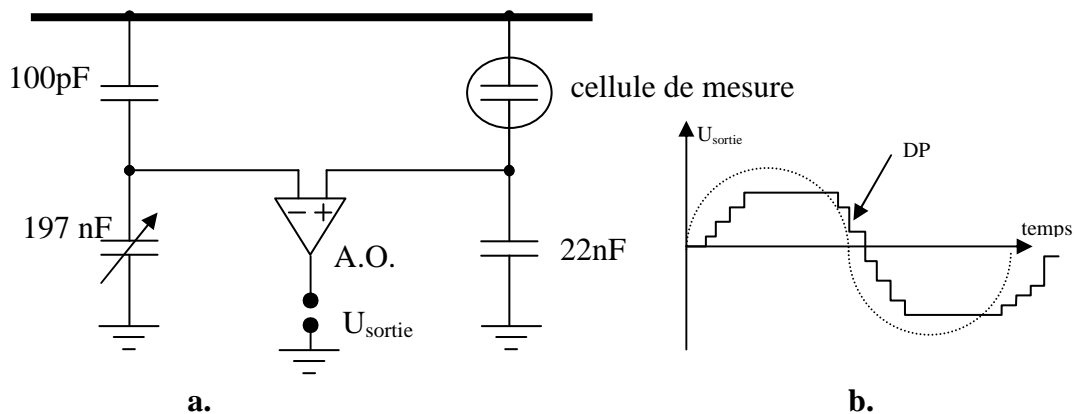


Figure 5.7. **a.** Circuit différentiel pour mesurer les DP ; **b.** signal théorique

Le signal de sortie théorique du circuit est montré dans la figure Figure 5.7b. Pour chaque DP produite, la capacité sur la sortie de la cellule se charge avec une tension proportionnelle à la DP, et le signal peut donc donner la charge totale transférée par demi-alternance.

En pratique, nous n'avons pas réussi à équilibrer parfaitement ce pont capacitif. Une tension résiduelle directement proportionnelle à la tension d'alimentation apparaît sur la sortie. Celle-ci est due à un déphasage entre les deux tensions U_1 et U_2 du pont capacitif (Figure 5.8).

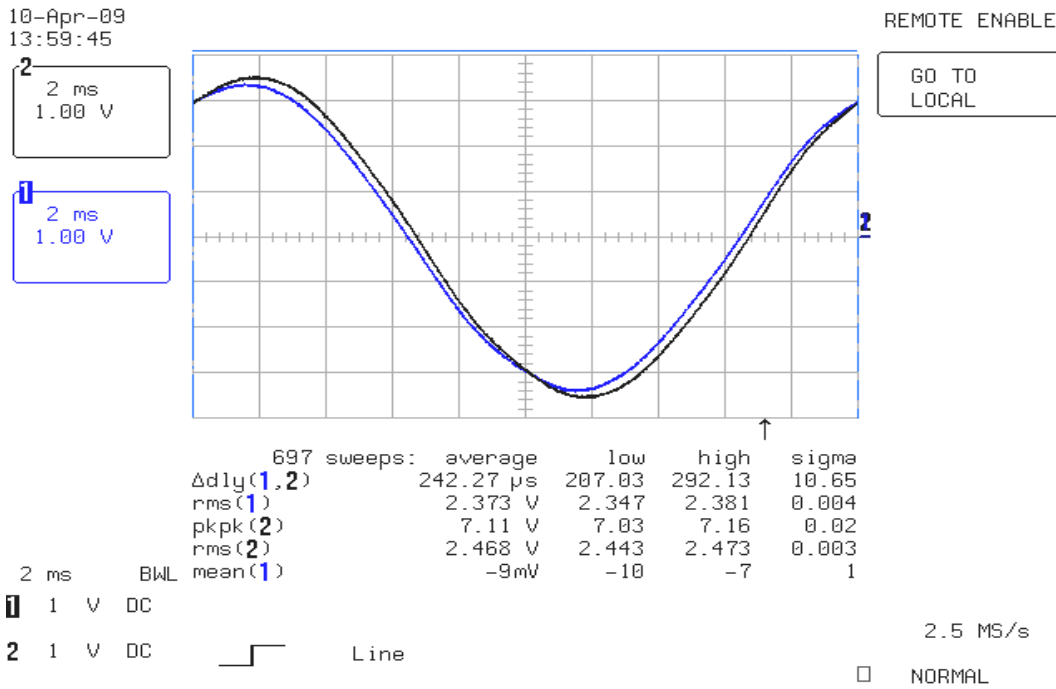


Figure 5.8. Tensions U_1 et U_2 du pont capacitif

Le signal de sortie dans le cas d'apparition des DP est donc superposé à la différence de ces deux tensions comme on peut l'observer sur la Figure 5.9. Ce déphasage ne peut pas être supprimé à l'aide de l'oscilloscope, car sa valeur dépend non-linéairement de la tension d'alimentation du système. Finalement, ce système de mesure n'a pas pu fournir les résultats attendus, qui auraient permis de déterminer quantitativement la charge déposée sur les isolants.

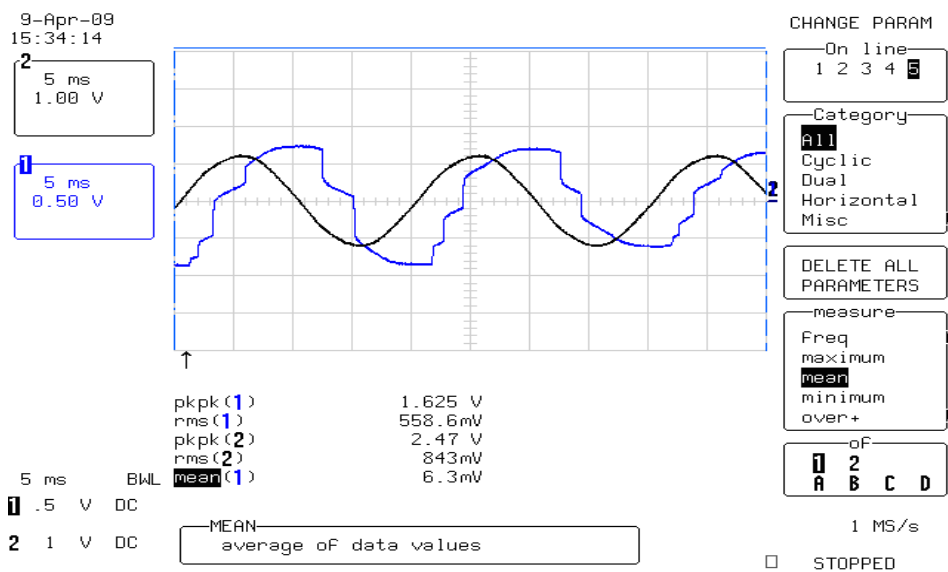


Figure 5.9. Le signal d'alimentation de la cellule (noir) et le signal de sortie de l'ampli op (bleu), qui est composé d'une tension résiduelle et de la tension donnée par les DPs.

5.3. Conclusions

Dans une géométrie du champ électrique quasi-uniforme, nous avons trouvé des valeurs calculées des tensions d'apparition des DPs (en utilisant une solution des équations du circuit capacitif équivalent) très proches de celles mesurées. Les déviations de la loi de Paschen, pour les distances très faibles, sont aussi présentes. La méthode choisie pour prédire les tensions aux quelles les DPs apparaissent est validée et des questions restent sur l'existence d'un facteur 0,7 entre la tension mesurée et celle calculée pour la géométrie du PT.

Rappelons que, pour les deux géométries, nous avons utilisé une simplification du problème expérimentale, sans prendre en compte les charges déposées sur la surface de l'isolant qui influencent les phénomènes sous tension alternative. De même, il existe une large incertitude sur la longueur réelle des décharges dans la géométrie de PT.

6. Caractérisation de l'isolant

L'intérêt des mesures de déclin de potentiel a été d'observer le comportement différent des charges déposées sur la surface des certains types des isolants utilisés dans l'industrie.

Ensuite, en utilisant le même système de mesure (voltmètre électrostatique) nous avons mesuré le potentiel produit par les charges présentes sur la surface de l'isolant porteur, dues aux DPs dans le point triple.

6.1. Déclin du potentiel des échantillons

Le déclin de potentiel a été suivi pour des échantillons disque de 1mm et 3mm d'épaisseur pendant 2 heures dans une enceinte climatique à température et d'humidité contrôlées (30°C et 35%RH). Les échantillons ont été gardés pendant toute la période d'expériences dans l'enceinte climatique. Après l'usinage et aussi avant d'être chargés et mesurés, ils ont été nettoyés avec l'Isopropanol (Alcool isopropylique) et le dichlorométhane (chlorure de méthylène), les solvants utilisés dans l'industrie pour leur dégraissage et nettoyage. La tension de la grille a été fixée à 2,5 kV et la tension de la pointe à 7 kV (dans le logiciel on peut maîtriser la différence entre les deux, ainsi 4,5 kV). La distance entre la sonde électrostatique et l'échantillon est de 4 mm (la distance doit être entre 3 et 5 mm, conformément au manuel de la sonde Monroe) et la distance entre l'échantillon et la grille a été fixée à 11 mm.

6.1.1. Résine époxy

L'intérêt principal de cet étude est de caractériser les échantillons en époxy chargé corindon, matériau utilisé comme support isolant dans les PSEM/GIS et dans la cellule de caractérisation des DPs. On a disposé de deux types d'échantillons en résine époxy : résine « neuve » (notée sur le graphique – R) qui est moulée et usinée à AREVA Aix-les Bains et résine époxy provenant d'un cône utilisé pendant trois ans dans un GIS et, ensuite, usiné en forme d'échantillon (notée - é).

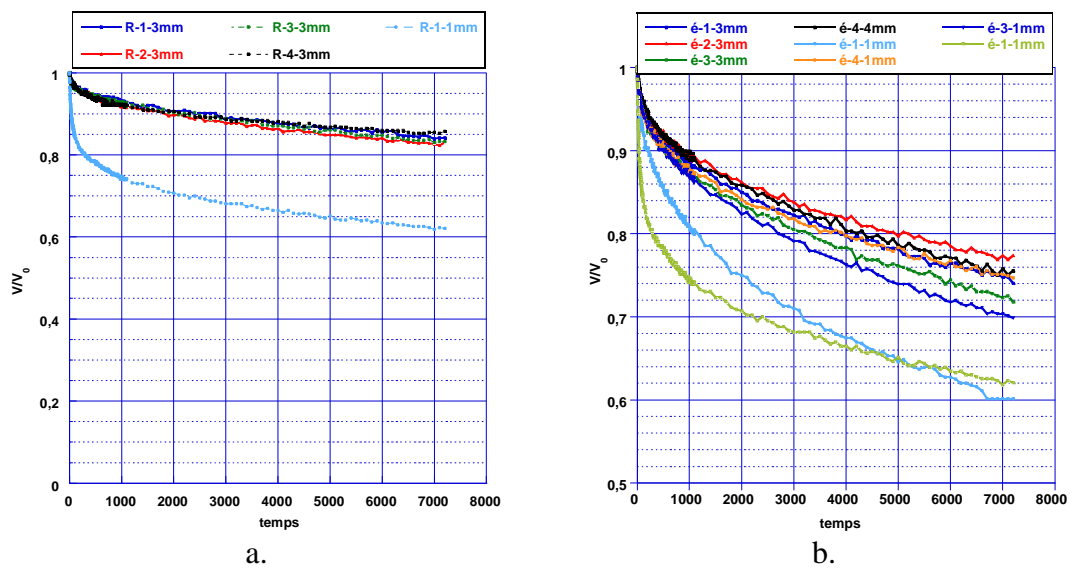


Figure 6.1. Mesures de déclin de potentiel des échantillons en résine époxy.
a. résine époxy « neuve » ; b. résine utilisée 3 ans.

Les courbes, pour les échantillons de 3mm du même matériau, sont quasiment identiques (Figure 6.1), et différentes des deux échantillons de 1 mm pour chaque matériau. Une explication possible de cette dispersion pourrait provenir d'une augmentation plus importante de température pendant l'usinage de ces échantillons de 1 mm par rapport à ceux de 3 mm. Ainsi on constate que les échantillons de 1mm sont déformés (ils présentent certaines ondulations provenant de l'usinage).

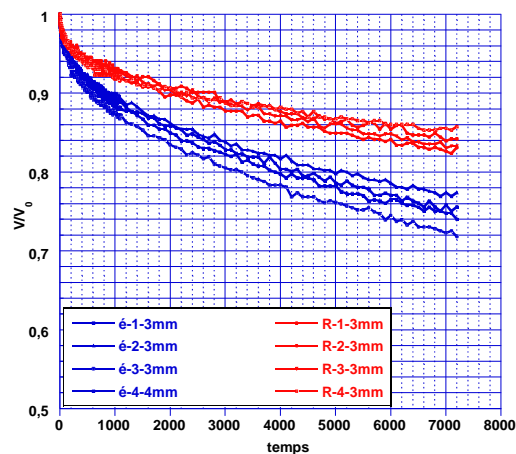
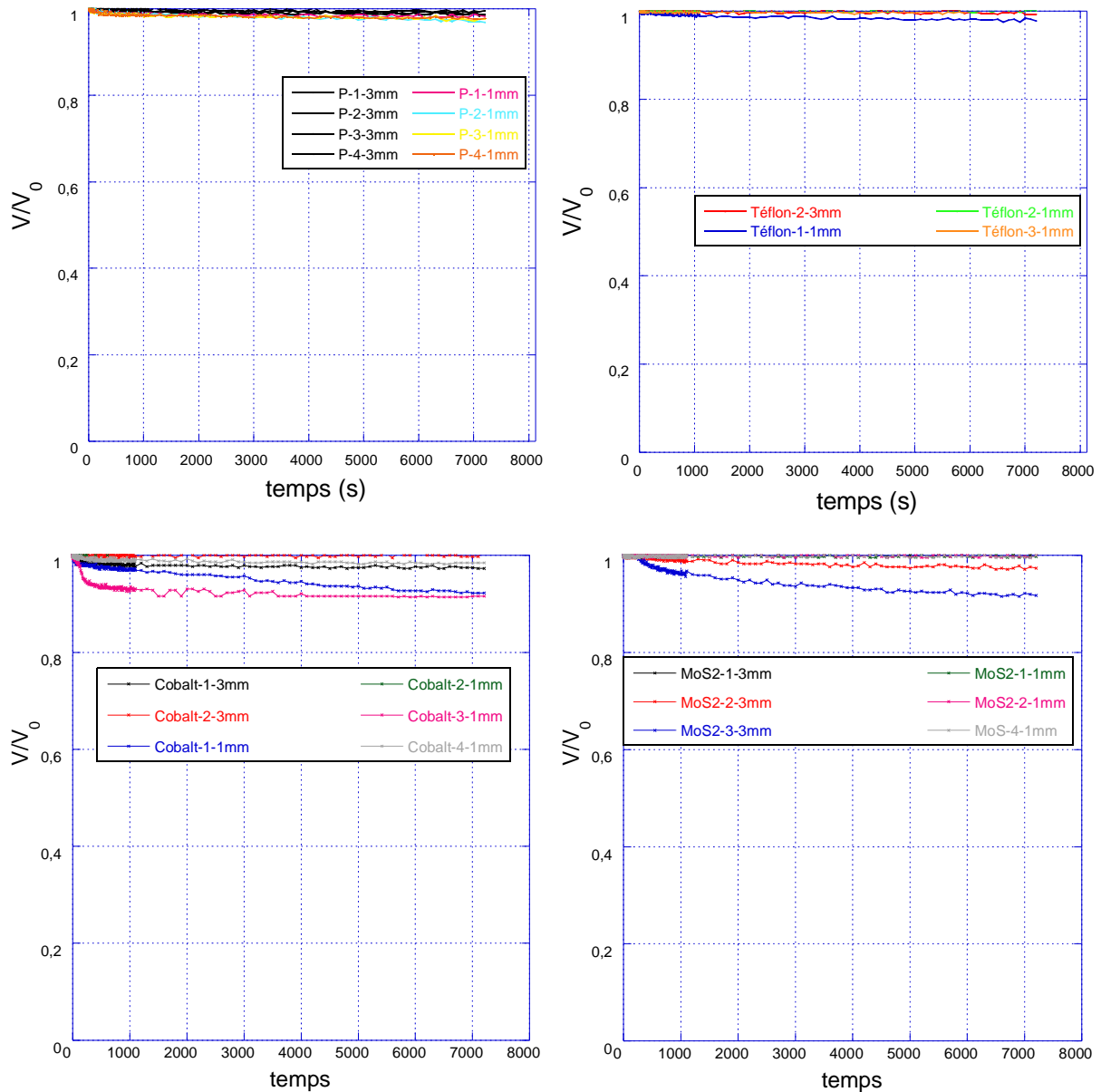


Figure 6.2. Mesures de déclin de potentiel des échantillons de 3 mm en résine époxy.

En comparant le déclin du potentiel des échantillons de 3 mm des deux résines (Figure 6.2), on observe que la résine neuve garde plus long temps la charge sur la surface. Par rapport à la résine neuve, la résine époxy utilisée pendant trois ans

6.1.2. Autres échantillons

Les autres échantillons caractérisés sont en PETP (notés P), PETF (Téflon), PETF chargé MoS₂ (MOS2), PETF chargé Cobalt (Cobalt) (Figure 6.3). Pour vérification des matériaux, une caractérisation par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (réflexion totale atténuée) a été réalisée. Les spectres sont décrits dans l'annexe.



Les figures montrent que, comme attendu, le PETP et le PETF garde la charge déposée sur la surface plus long temps que la résine époxy [58], sa valeur restant quasi-constante pour les deux heures, le temps du chaque essai.

Certains échantillons (Cobalt -3- 1mm et MoS2 -3- 3mm) présentent un comportement atypique, comportement probablement dû au stress thermique provenu de l'usinage utilisé pour arriver à cette épaisseur.

6.1.3. Discussion

En connaissant la constante du temps, τ , des courbes du déclin du potentiel des échantillons, nous pouvons calculer, avec une certaine erreur, les valeurs, à la fois, de la conductivité de surface ρ_s et de la conductivité volumique ρ_v .

En représentant le déclin du potentiel sous la forme $\ln(\frac{V}{V_0})$ en fonction du temps, nous pouvons déterminer la constante du temps de ces courbes (Figure 6.4). Nous avons gardé seulement la dernière partie des courbes, à partir de $t=1000$ s, car la première partie est beaucoup influencée des phénomènes de dépolarisation et moins influencée par les valeurs de la conductivité (dans le cas de ces matériaux, en particulier).

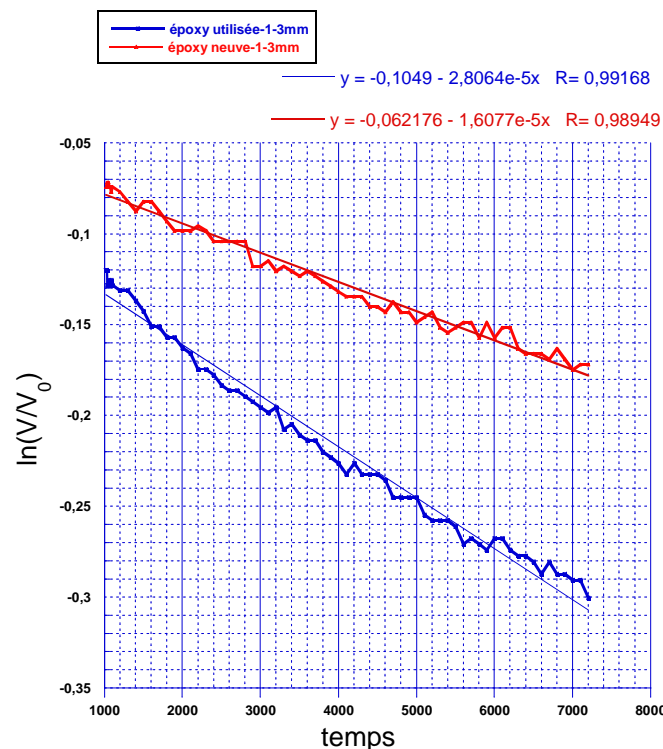


Figure 6.4. Mesures de déclin de potentiel pour deux échantillons de 3 mm en résine époxy.

La pente de la droite qui approxime les courbes nous donne la constante du temps, soit $\tau \sim 10^{-5}$. Si on considère qu'il n'y a que la conduction volumique qui intervient dans les phénomènes, nous avons :

$$\frac{V}{V_0} \approx \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

avec $\tau = \varepsilon\rho_v$. D'où :

$$\rho_v = \frac{10^5 \cdot 36 \cdot \pi \cdot 10^9}{4} \approx 2,8 \cdot 10^{15} \text{ } \Omega m.$$

Si on considère qu'il y a que la conduction de surface qui intervient dans les phénomènes, nous avons

$$\frac{V}{V_0} \approx \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right),$$

avec $\tau = \left(\frac{R}{2,41}\right)^2 \cdot \frac{\varepsilon}{d \cdot \sigma_s}$, avec R , le rayon de l'échantillon, d , l'épaisseur et σ_s , la résistivité de

surface

D'où, en faisant les calculs :

$$\sigma_s \approx 5 \cdot 10^{-17} \text{ S}, \text{ donc } \rho_s \approx 2 \cdot 10^{16} \text{ } \Omega.$$

Ces résultats montrent que les valeurs des résistivités de surface et volumiques des échantillons utilisés dans les mesures caractérisant le PT sont suffisamment grandes pour ne prendre en compte les conductivités afférentes. Néanmoins, nous sommes conscients que la présence des DP, donc des produits de décomposition (du gaz et/ou du solide) peuvent modifier suffisamment ces grandeurs pour modifier localement la nature des phénomènes [59].

Les courbes du déclin du potentiel nous assurent que pour tous les échantillons utilisés, pendant les temps du changement de polarité (soit 20ms en alternatif et de l'ordre de plusieurs minutes en impulsionnelle), la zone de PT ne se décharge pas d'une manière appréciable. Nous supposons alors que l'isolant reste chargé à 100%.

6.2. Mesures du potentiel sur la surface de l'isolant porteur.

Avant que le potentiel de surface de l'isolant utilisé dans la cellule de PT soit mesuré à l'aide du dispositif présenté dans le Chapitre 2.5.2, les premiers essais ont été réalisés avec un dispositif simplifié, sans une précision de positionnement aussi élevée.

Avant de mettre l'isolant dans la cellule, sa surface est nettoyée à l'isopropanol puis, il est placé dans une cage de Faraday et sa charge totale initiale est mesurée. Après l'application de l'impulsion de tension l'isolant est sorti de la cellule et placé de nouveau dans une cage de Faraday et la charge totale de l'isolant est mesurée. Puis, il est placé sur la plaque tournante et sous la sonde du voltmètre électrostatique.

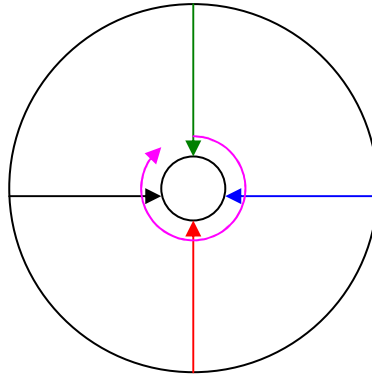


Figure 6.5. Directions de mesure du potentiel sur la surface de l'isolant

Plusieurs types de mesures ont été réalisés pour essayer de caractériser la charge de surface de l'isolant résultant des DP's et/ou claquages.

Essai 1 : $U_{\text{appliquée}} = + 34 \text{ kV}$. $Q_{\text{initiale}} = 1 \text{ nC}$. $Q_{\text{finale}} = 39,1 \text{ nC}$

Les mesures du potentiel sont faites en plusieurs points sur trois des rayons de l'isolant, en se rapprochant du PT (Figure 6.5). Les résultats sont montrés sur la Figure 6.6. On observe que sur un rayon, le potentiel mesuré est négatif mais il remonte vers le PT vers une valeur positive comparable pour les trois rayons. Le potentiel maximal est mesuré au niveau du point triple, à l'intérieur du trou de l'électrode, et sa valeur est élevée : 11kV (à comparer à la tension appliquée : 34kV).

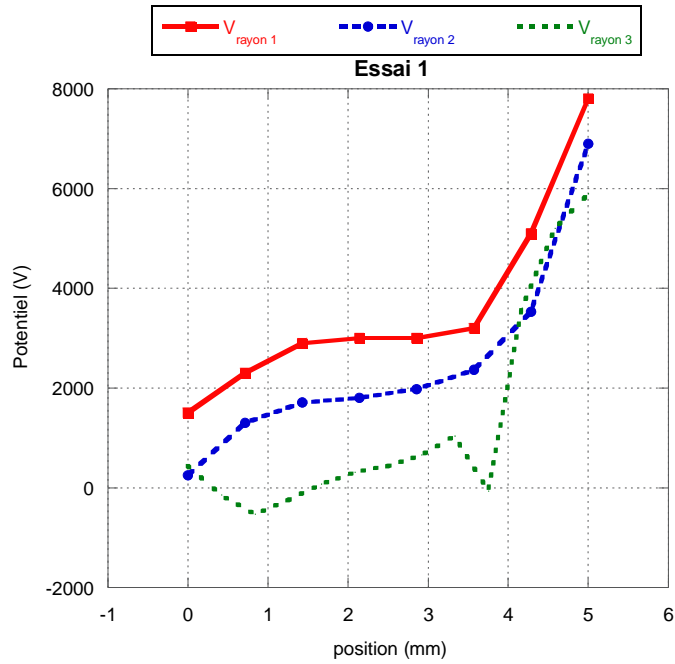


Figure 6.6. Mesure du potentiel de surface sur les rayons de l'isolant (Voir figure 7). Air atmosphérique. $U_{app}=34kV$.

Essai 2 : $U_{appliquée}= + 34 kV$. $Q_{initiale}=1 nC$. $Q_{finale}=60 nC$

Essai 3 : $U_{appliquée}= + 58 kV$. $Q_{initiale}=2 nC$. $Q_{finale}=20 nC$

Après l'application d'une tension de 51kV et l'apparition des DP's autour du point triple, la tension est augmentée à une valeur de 58 kV qui a produit un claquage au long de la surface de l'isolant.

La mesure est effectuée sur le chemin approximatif du claquage et sur un rayon à 90° de celui-ci. On observe (Figure 6.7) une diminution importante des valeurs de potentiel et donc de charge, la valeur maximale étant de 2500V (valeur à comparer à 11 kV sans claquage) mesurée dans le trou de l'électrode au-dessus du PT.

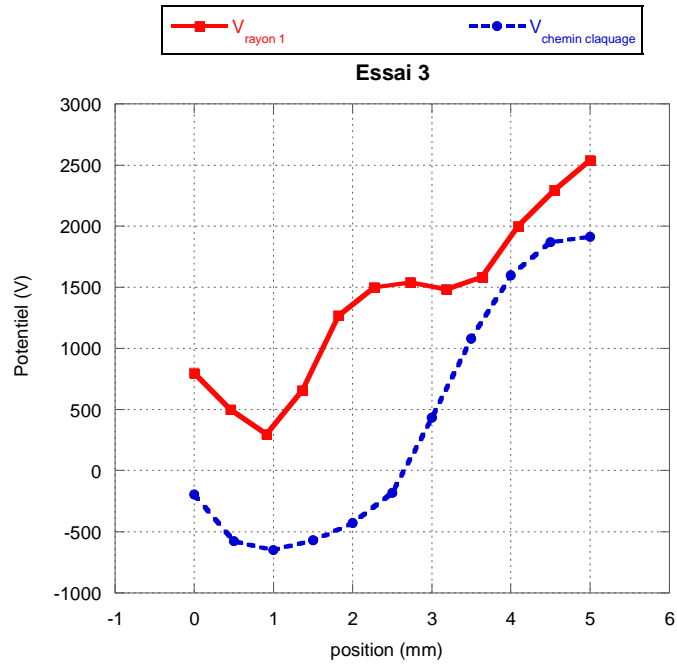


Figure 6.7. Mesure du potentiel de surface sur deux rayons de l'isolant. Air atmosphérique.
 $U_{app}=58kV$. Claquage

Essai 4 : $U_{appliquée}= + 58 kV$. $Q_{initiale}=1 nC$. $Q_{finale}=2 nC$

Un autre claquage est produit à la même tension de 58kV. Cette fois le deuxième axe de mesure est situé sur le rayon à 180° du chemin de claquage. On observe toujours que les valeurs du potentiel sont plus faibles sur le chemin de claquage (Figure 6.8).

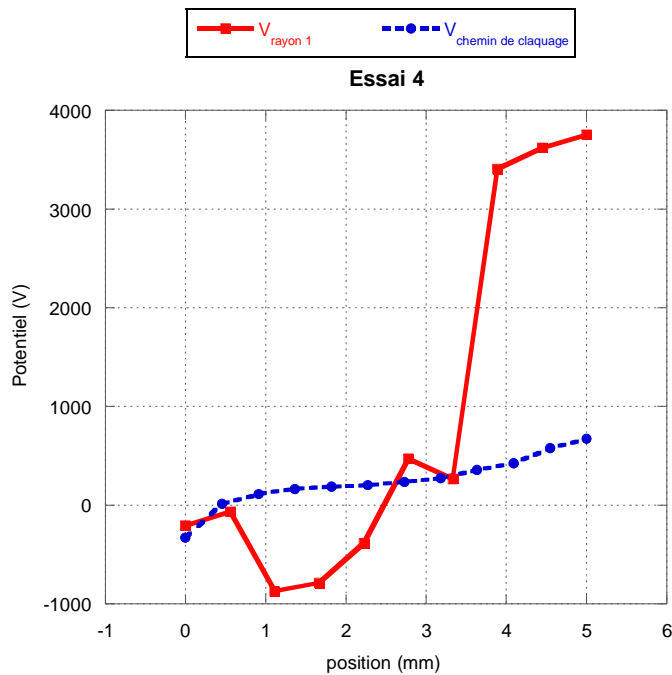


Figure 6.8. Mesure du potentiel de surface sur deux rayons de l'isolant. Air atmosphérique.
 $U_{app}=58kV$. Claquage.

Une mesure circulaire a été réalisée au-dessus du PT, chaque 10°, en commençant à partir de la zone du claquage. Les résultats sont montrés sur la Figure 6.9 et ils montrent que la zone où se produit le claquage est à un potentiel plus faible ce qui indique une élimination des charges dans cette zone.

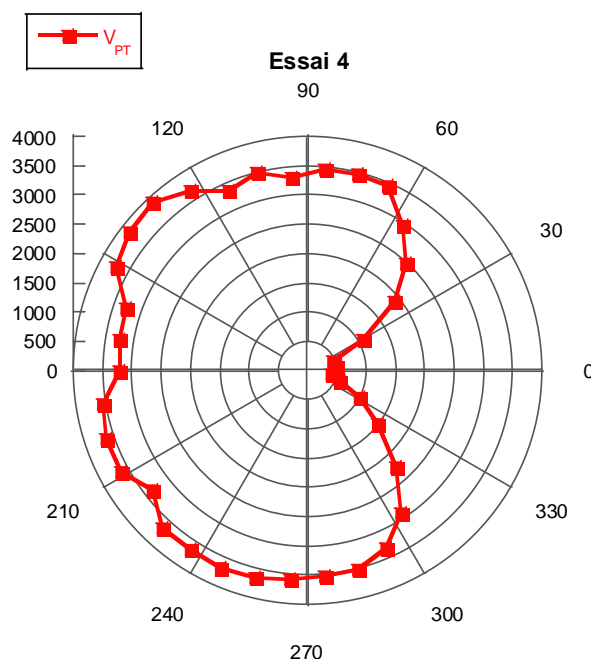


Figure 6.9. Mesure du potentiel de surface dans la zone de PT.
Air atmosphérique. $U_{app}=58kV$. Claquage

En mettant le système de mesure au point (déplacement et rotation sur l'axe horizontale graduées, anneau de masse autour de l'isolant, système de fixation de la sonde électrostatique), plusieurs essais ont été réalisés pour des impulsions de signe négatif et positif.

Pour les impulsions négatives, les résultats sont détaillés dans le Tableau 6-1 et la figure.

TABLEAU 6-1. POTENTIELS MESURES SUR LA SURFACE DE L'ISOLANT POUR DIFFERENTES IMPULSIONS DE TENSION NEGATIVE APPLIQUEES

Tension appliquée (kV)	V_{max}	V_{min}	V_{moyen}
-34,1	-357	-7960	-2780
-51	-422	-10360	-3020
-59,5	-360	-11500	-3112
-68	-472	-18760	-5426

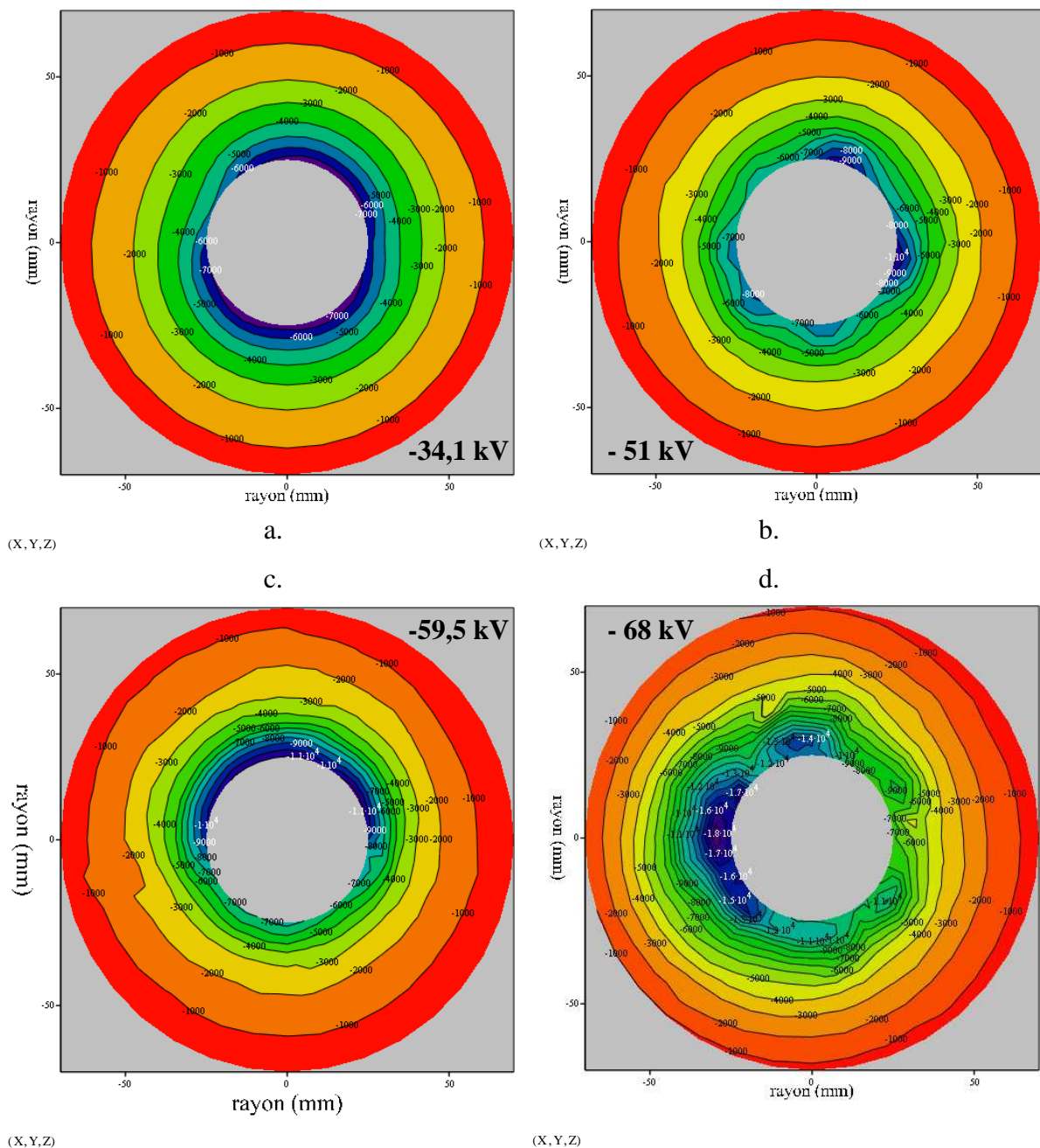


Figure 6.10. Potentiels mesurés sur la surface de l'isolant pour différentes impulsions de tension négative appliquées.

Ces résultats montrent une distribution quasi-concentrique du potentiel mesuré sur la surface de l'isolant. Les potentiels localisés (Figure 6.10b. et d.) sont dus aux décharges spécifiques vues à l'aide de la caméra haute-sensibilité en appliquant une impulsion négative de tension (Figure 3.39a).

Le potentiel mesuré après l'application d'une impulsion positive de tension est décrit dans le Tableau 6-2, la Figure 6.12 et la Figure 6.13.

TABLEAU 6-2. POTENTIELS MESURES SUR LA SURFACE DE L'ISOLANT POUR DIFFERENTES IMPULSIONS DE TENSION POSITIVE APPLIQUEES

Tension appliquée (kV)	V_{\max} (V)	V_{\min} (V)	V_{moyen} (V)
+34,1	7630	580	2611
+37,4	9090	-2640	1712
+42,5	10150	-3250	1394
+51 (DP)	11680	-2000	2676
+51 (DP) +51 (claq)	6530	-1050	1533
2x +51 (DP) +51 (claq)	11160	-5520	1705
59,5 (claq)	2680	-1218	195

Ces essais montrent que les impulsions positives génèrent des décharges qui déposent sur la surface de l'isolant des charges négatives. Tenant compte de la position de ces charges, la cause de ce phénomène pourrait être des décharges qui apparaissent entre la masse de la cellule et l'isolant, comme indiqué dans la Figure 6.11. La difficulté de l'accès optique dans cette zone nous a empêchés de vérifier avec la caméra haute-sensibilité cette hypothèse. Un renforcement du champ dans cette zone a été observé dans les simulations réalisées en QuickField et FEMM, mais seulement quand l'effet du point triple était annulé.

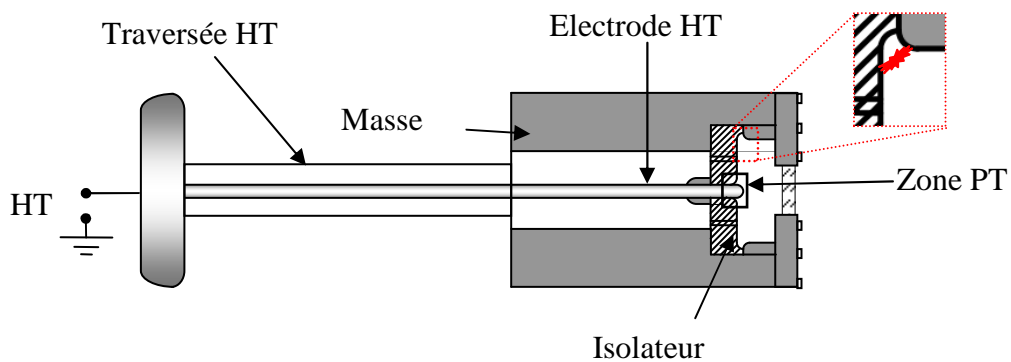
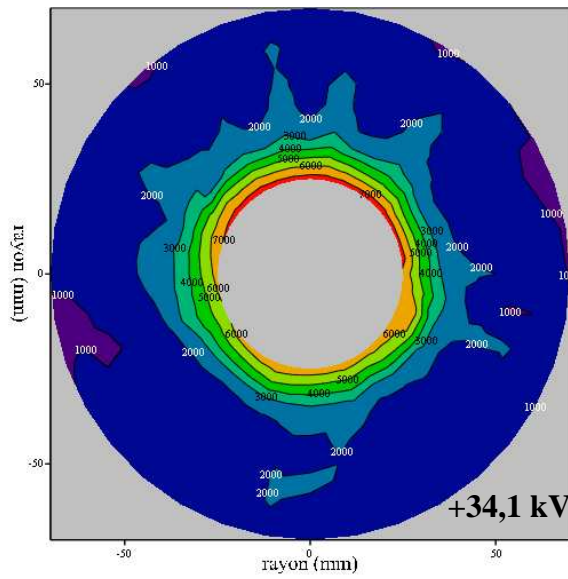


Figure 6.11. Zone hypothétique d'apparition des décharges de signe opposé à la tension appliquée.

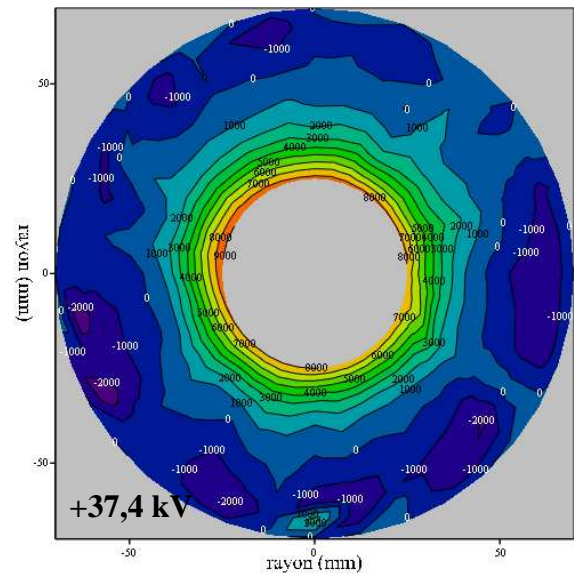
A cause de ces « taches » de charges de signe opposé, les graphiques sont beaucoup moins réguliers dans le cas des impulsions positives par rapport à celles négative.



(X, Y, Z)

a.

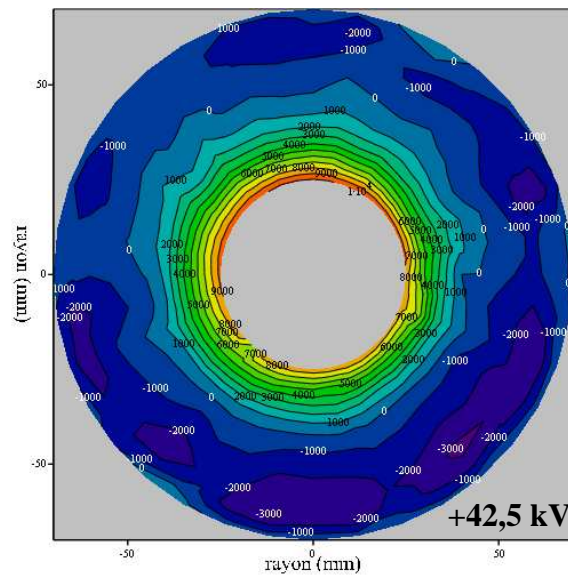
c.



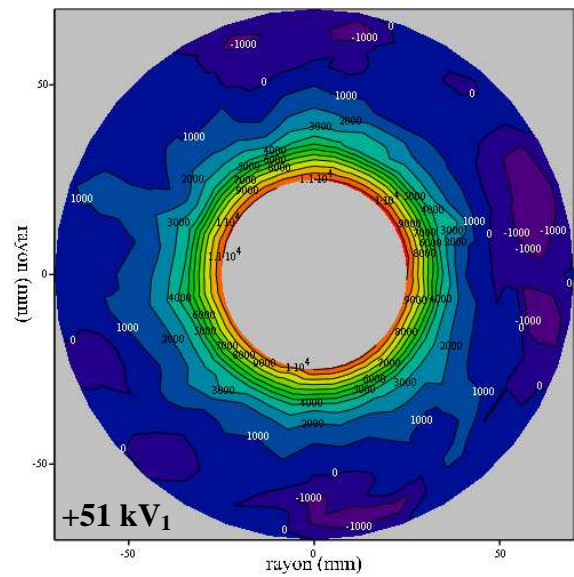
(X, Y, Z)

b.

d.



(X, Y, Z)



(X, Y, Z)

Figure 6.12. Potentiels mesurés sur la surface de l'isolant pour différentes impulsions de tension positive appliquées générant seulement des DP dans la zone du PT.

La valeur de la tension appliquée a été augmentée jusqu'au claquage. Les résultats (Figure 6.13) détaillent, en effet, la Figure 6.9. La surface de l'isolant est « lavée » de charges dans toute sa totalité (Figure 6.13a, c) ou sur de zones bien déterminées (Figure 6.13b)

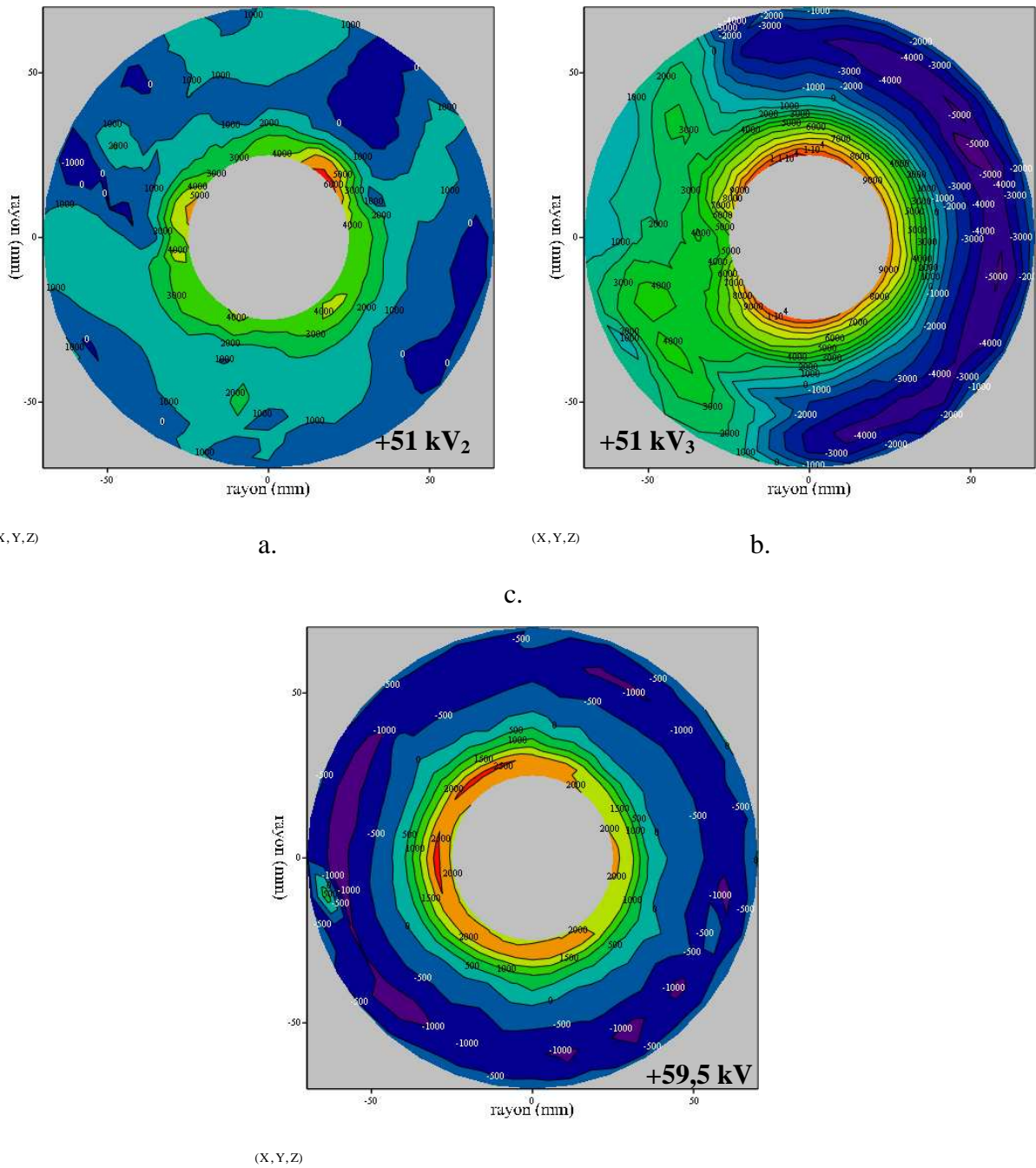


Figure 6.13. Potentiels mesurés sur la surface de l'isolant pour différentes impulsions de tension positive appliquées générant des claquages ;

a. 51 kV - claquage du 2^{ème} coup ; b. 51 kV - claquage du 3^{ème} coup ; c. 59,5 kV - claquage du 1^{er} coup

Un paramètre non pris en compte est la variation du potentiel pendant la durée des mesures (~30' pour ~200 points). Un essai pour déterminer le déclin du potentiel en différents points sur un des rayons de l'isolant a été réalisé. Les résultats sont montrés dans la figure 14. On observe la diminution importante du potentiel de signe négatif présent vers l'extérieur du disque (50% pendant 30').

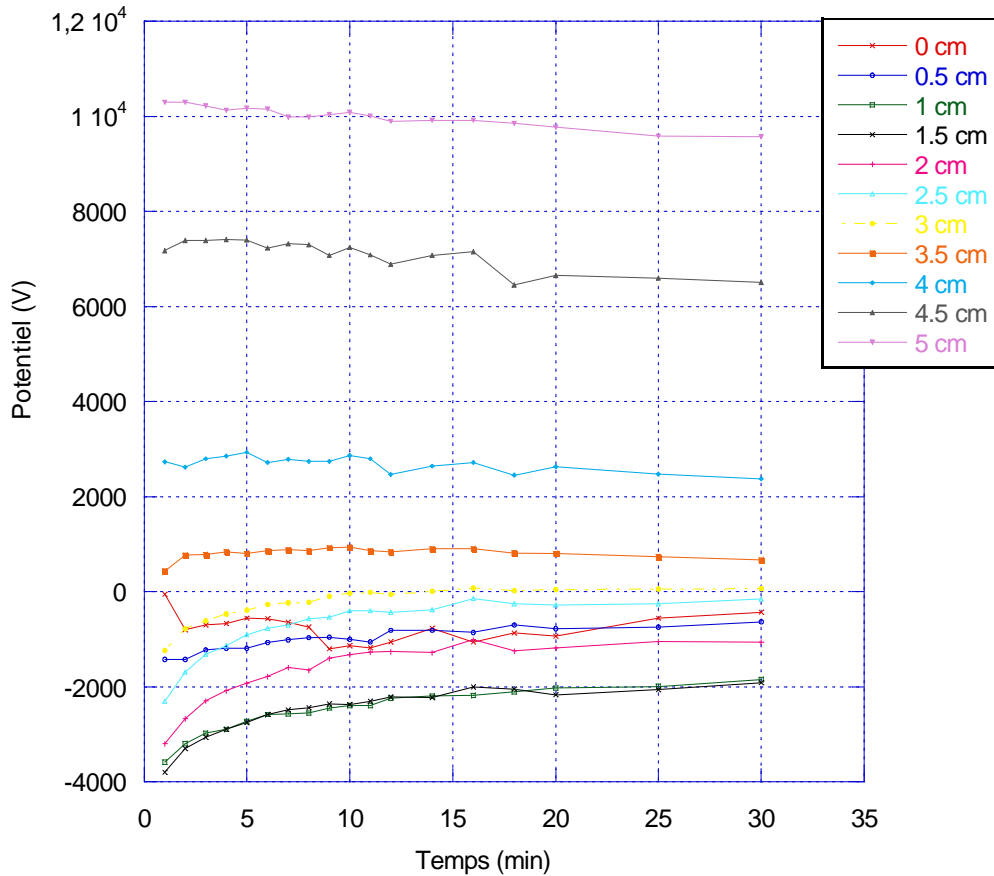


Figure 6.14. Déclin du potentiel sur un rayon de l'isolant en différent points. Distance en cm de l'extérieur du disque vers l'intérieur (PT). Tension appliquée : +41 kV.

6.3. Conclusions

Les charges déposées sur la surface des isolants utilisés dans nos mesures (résine époxy et PTFE) restent long temps, sans s'écouler vers la terre. Les temps relatifs aux types de tensions appliqués sur notre cellule de mesure (alternative, 40ms et impulsionnelle, de l'ordre de minutes) ne laissent pas la surface se décharger

Conclusions générales

L'isolation dans les postes sous enveloppe métallique n'est pas exclusivement gazeuse, mais composée de gaz et de solide, car l'utilisation des supports isolants est indispensable pour des raisons mécaniques. Le but du travail présenté était d'analyser le comportement diélectrique des systèmes et les phénomènes apparaissant en présence de haute tension, à l'interface créée par l'association gaz-solide-électrode.

L'étude a été axée sur trois axes importants qui, dans certaines parties ont fusionné : l'étude du **point triple**, l'étude d'une **particule** fixée près du point triple, l'étude de la **charge déposée** sur l'isolant par les **décharges partielles**.

La cellule expérimentale utilisée dans l'expérimentation constitue un point triple facilement observable visuellement. Même si l'intérêt industriel est de minimiser l'effet du PT et l'effet des particules présentes dans le système, nous avons voulu maximiser ces effets pour mieux comprendre les causes des défaillances et pour éventuellement proposer des solutions pour les éliminer. L'objectif a été d'analyser les phénomènes dans le gaz le plus utilisé dans l'appareillage : le SF_6 . Néanmoins, nous avons opté pour une étude comparative du système isolé au SF_6 et à l'Air Sec. Ces études ont été réalisées en variant la pression (de 1 à 4,5 bar absolu) des gaz utilisés pour observer l'influence de ces paramètres sur les phénomènes qui apparaissent sous haute tension.

La présence d'une jonction triple du côté de l'électrode haute tension détermine un renforcement du champ électrique dans le voisinage du PT, renforcement qui dépend de la permittivité de l'isolant utilisé :

- **280 V/m** pour 1 V appliqué sur l'électrode centrale. Isolant en époxy. $\epsilon = 4$.
- **110 V/m** pour 1 V appliqué sur l'électrode centrale. Isolant en PTFE. $\epsilon = 2$.

Le renforcement détermine une baisse importante de la tension de claquage, U_b , mesurée en alternatif, comparée à la tension de claquage calculée dans même géométrie, sans utiliser le support isolant. Ce rapport est beaucoup plus important dans le cas de l'air sec que dans le cas du SF_6 . Dans cette géométrie, dans l'air sec, l'augmentation de la pression n'influence quasiment pas la valeur de la tension de claquage. Dans le SF_6 , cette valeur varie d'un facteur 2 de 1,5 à 4,5 bar.

D'une manière très générale, les expériences réalisées ont mis en évidence la difficulté d'obtenir des conditions stables et reproductibles pour caractériser les décharges et le

claquage en présence d'une interface gaz/solide, en comparaison du cas dans lequel un gaz seul entre électrodes métalliques est étudié. La charge du solide et sa dégradation progressive, tous les deux inévitables lors des essais et très difficile à quantifier, introduisent des paramètres non contrôlable dans les expériences.

La tension d'apparition des DP, U_{DP} , en alternatif, est très influencée par l'état de propreté de la surface de l'isolant utilisé, dans l'air sec. Cette influence n'a pas été observée dans le SF₆. La courbe de U_{DP} en fonction de la pression suit parallèlement la courbe $U_b(p)$ pour le SF₆, avec une différence faible entre les deux (domaine d'existence des DP très étroit, malgré la géométrie de la cellule conçue pour générer facilement des DP). Pour l'air sec ces deux courbes sont beaucoup plus éloignées (large domaine d'existence des DP), et se rapprochent avec l'augmentation de la pression. Ceci montre des situations bien différentes dans les deux gaz : claquage dépendant essentiellement des conditions d'apparition de DP dans le SF₆, et des conditions de propagation dans l'air.

Nous avons proposé une modélisation qui permet le calcul théorique de la tension d'apparition de DP, en utilisant le calcul de champ par la méthode des éléments finis et la courbe expérimentale de Paschen $U_b(p \cdot d)$. Un facteur qui varie entre 0,6 et 0,7 a été trouvé entre la tension calculée et la tension mesurée, indépendant de la pression et du gaz utilisé. Même avec la présence de ce facteur, dû à la géométrie complexe et la simplification du problème, en utilisant l'algorithme proposé, nous pouvons facilement prédire le comportement du système en présence de la haute tension.

Nous avons réalisé une calibration en tension alternative entre la mesure électrique (réponse de l'ICMSsystem en pC) et une mesure optique obtenue à l'aide d'un photomultiplicateur. Nous avons pu ainsi développer une méthode de mesure optique des DP, utilisable avec n'importe quelle forme de tension, (par exemple des impulsions) avec lesquelles, les mesures classiques électriques sont impossibles. La différence entre les calibrations pour des différentes pressions n'est pas significative et des lois de puissance peuvent caractériser chaque gaz, avec une incertitude plus importante dans le SF₆ que dans l'air sec. La sensibilité de cette calibration est élevée, d'environ 1pC, pour les deux gaz utilisés.

Les mesures en tension impulsionnelle montrent un domaine d'incertitude de la tension d'apparition des DP qui augmente avec la pression dans le SF₆, et des valeurs caractéristiques peu différentes de celles obtenues sous tension alternative. Dans l'air sec, nous avons réalisé des mesures seulement que pour la pression de 2,5 bar, car la saturation du PM a été vite atteinte. L'influence des charges déposées sur la surface de l'isolant par les DP est mise en évidence :

-
- en appliquant des impulsions de tension du même signe, les charges produites modifient la distribution du champ et les décharges suivantes ne peuvent pas produire des décharges au même endroit.
 - En appliquant des impulsions de tension de signe opposé, les valeurs de la tension d'apparition des DP et du claquage diminuent fortement, car le champ électrique au voisinage du PT est renforcé par les charges présentes.

Un défaut de fabrication du système a été simulé en collant sur l'isolant en résine époxy une particule métallique à une distance de 2 mm de l'électrode centrale. Les signatures des mesures électriques de DP sont modifiées, des nouvelles espèces des DP, dues à la particule, sont apparues.

Les valeurs de tensions d'apparition des DP et de claquage sont diminuées sensiblement et l'influence bénéfique de la pression disparaît dans le cas du SF₆, ces tensions spécifiques n'étant plus dépendantes de la pression. Dans l'air sec on observe même une baisse de la tenue électrique de la cellule, avec l'augmentation de la pression.

En appliquant une tension impulsionnelle, de nouveau l'effet des charges déposées sur la surface de l'isolant est visible, avec des DP qui apparaissent à des tensions très basses, en changeant la polarité. Un phénomène nouveau observé est l'apparition de DP après un temps long (2 minutes) après la coupure de la tension et la mise à la masse du système.

D'une manière générale, les résultats obtenus mettent en évidence l'intérêt très fort d'optimiser la zone de point triple pour éviter l'apparition de DP. En effet, dans le SF₆, le domaine d'existence des DP est très étroit, et le claquage survient en général très rapidement. Cet aspect est particulièrement important pour la tenue du système sous forte surtension du type onde de choc.

Parallèlement à la caractérisation des DP, des mesures de déclin de potentiel ont été réalisées pour caractériser les isolants utilisées dans l'industrie. Nous avons utilisé des échantillons en résine époxy (neuve et utilisée pendant trois ans), PTFE pur et chargé MoS₂ et CoAl₂O₄ et PETP. Les résultats ont montré que, pendant 2 heures, un maximum de 40% de la charge déposée sur la surface de ces échantillons s'écoule vers la terre (dans le cas d'époxy). Au cours du temps employé dans les essais en haute tension (20ms en tension alternative et de l'ordre de plusieurs minutes en tension impulsionnelle), nous sommes certains que la charge reste en totalité sur la surface de l'isolant.

Finalement, une cellule avec un champ quasi-uniforme entre l'électrode et l'isolant a été conçue pour vérifier que la méthode de calcul de la tension d'apparition des DP est valide.

Nous avons alors trouvé un bon accord entre les valeurs calculées (cette fois sans utiliser des logiciels de calcul du champ, mais une formule qui résout le circuit capacitif équivalent) et celles mesurées.

De nombreuses perspectives sont ouvertes par cette étude. En particulier, il serait très intéressant à partir des mesures de potentiel réalisées sur l'isolateur soumis à des décharges, de remonter à la distribution quantitative de charge sur l'isolant, par l'application de méthodes numériques de type « méthode inverse ». Ce type d'investigation théorique complexe n'a pas pu être réalisé dans le cadre de ce travail.

Annexe 1

La commande envoyée à l'oscilloscope par l'ordinateur est :

TA : pava ? ampl ; C2 : pava ? min,max,wait

avec :

TA : pava ? ampl – demande de l'**amplitude** du signal TA (pava – **parameter value**);

Le signal TA est ERES(C1 - signal entrée du PM) ; où ERES (**enhanced resolution**) filtre les fréquences hautes du signal TA ;

C2 : pava ? min,max – demande du minimum et du maximum du signal de l'ICM ;

wait – l'ordinateur attend un autre déclenchement du trigger de l'oscilloscope ;

La réponse de l'oscilloscope sera de la forme :

TA:PAVA AMPL,<valeur> V,<état>;C2:PAVA MIN,-<valeur> V,<état>,MAX,<valeur> V,<état>

L'état des paramètres peut être :

OK – paramètre enregistré sans problème ;

OF – paramètre partiel en « overflow » - trop grand pour l'écran de l'oscilloscope ;

UF – paramètre partiel en « underflow » - signal trop grand pour une analyse correcte ;

NP – pas de pulse pour le signal ;

Exemples de réponse de l'oscilloscope :

TA:PAVA AMPL,688E-3 V,OK;C2:PAVA MIN,-795E-3 V,OU,MAX,799E-3 V,OU

Le signal du PM (0,688 V) est bien acquis, par contre l'état du MIN de C2 montre que le signal de l'ICM est trop grand. Donc cette ligne de réponse doit être ignorée.

TA:PAVA AMPL,4E-3 V,NP;C2:PAVA MIN,-120E-3 V,OK,MAX,36E-3 V,OK

Il n'y a pas un pulse de signal de la part de PM (l'état de AMPL de A est NP), malgré une valeur de décharge montrée par l'ICM de -0,120V.

TA:PAVA AMPL,44E-3 V,OK;C2:PAVA MIN,-120E-3 V,OK,MAX,211E-3 V,OK

Annexe 2

Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

Les six matériaux (PETP, PETF, PETF chargé Cobalt, PETF chargé MoS₂ et les deux types de résine époxy) ont été caractérisés et les résultats ont été comparés avec la base de données contenue par le logiciel de l'appareil. Les spectres sont montrés dans les figures ci-dessous.

Dans les premières trois figures on observe que les spectres mesurés sont quasiment identiques entre eux. Les charges présentes dans les échantillons (MoS₂ et Cobalt) ne se voient pas. La différence avec la référence contenue par la base de données du logiciel vient des différences entre les méthodes d'acquisition des deux spectres (ATR, dans notre cas, versus Transmission, pour la référence). Pour l'ATR, l'absorption augmente avec la valeur de la longueur d'onde. Cette différence s'observe aussi dans le cas du spectre du PETP (Figure 6.18).

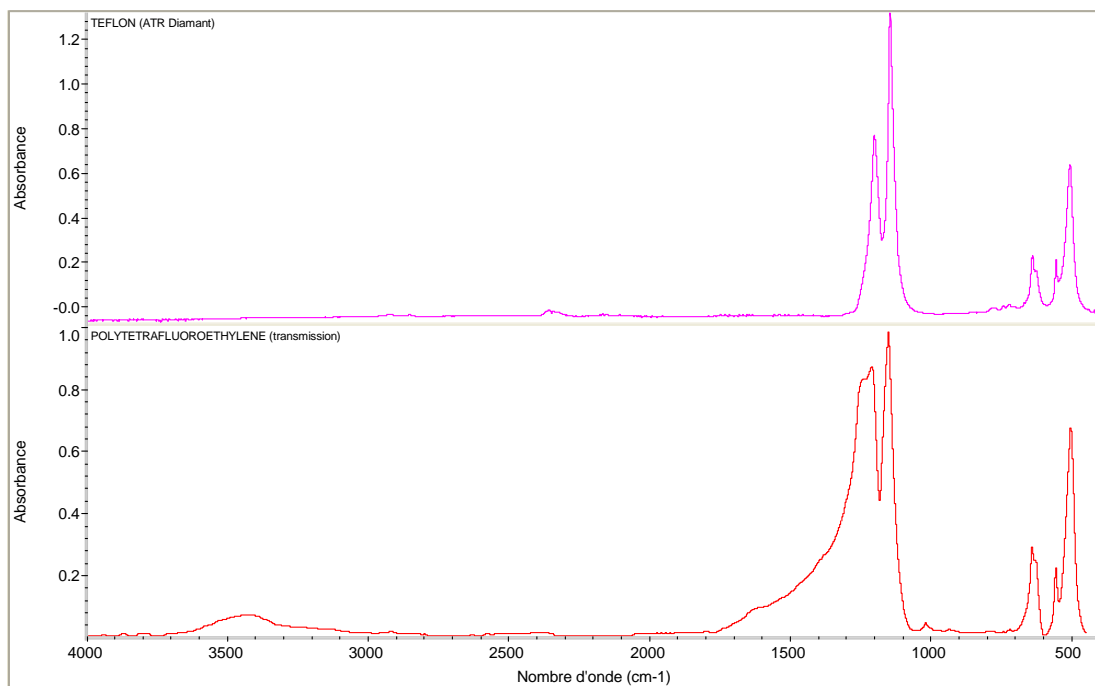


Figure 6.15. PETF pur vs. PETF de la base de données

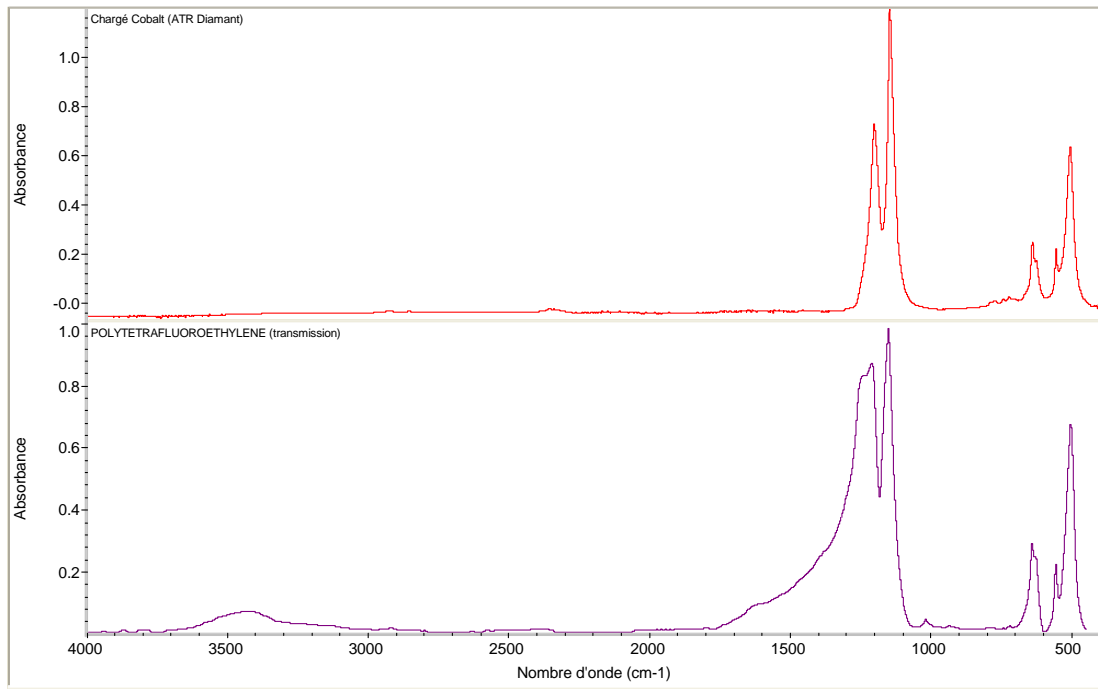


Figure 6.16. PETF chargé Cobalt vs. PETF de la base de données

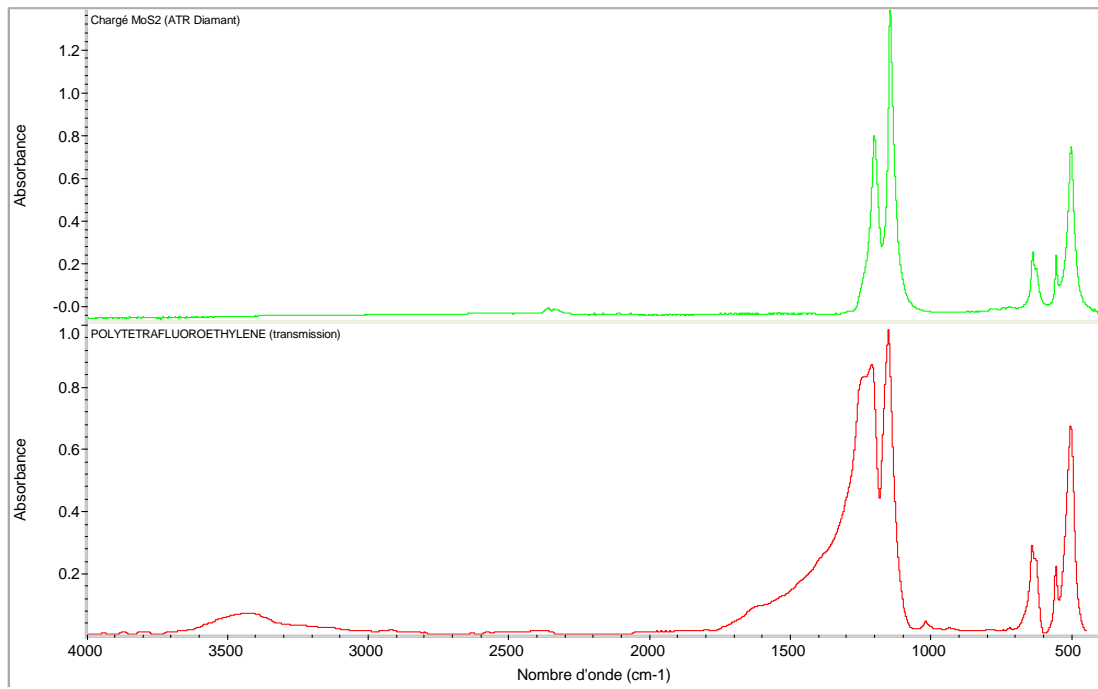


Figure 6.17. PETF chargé MoS₂ vs. PETF de la base de données

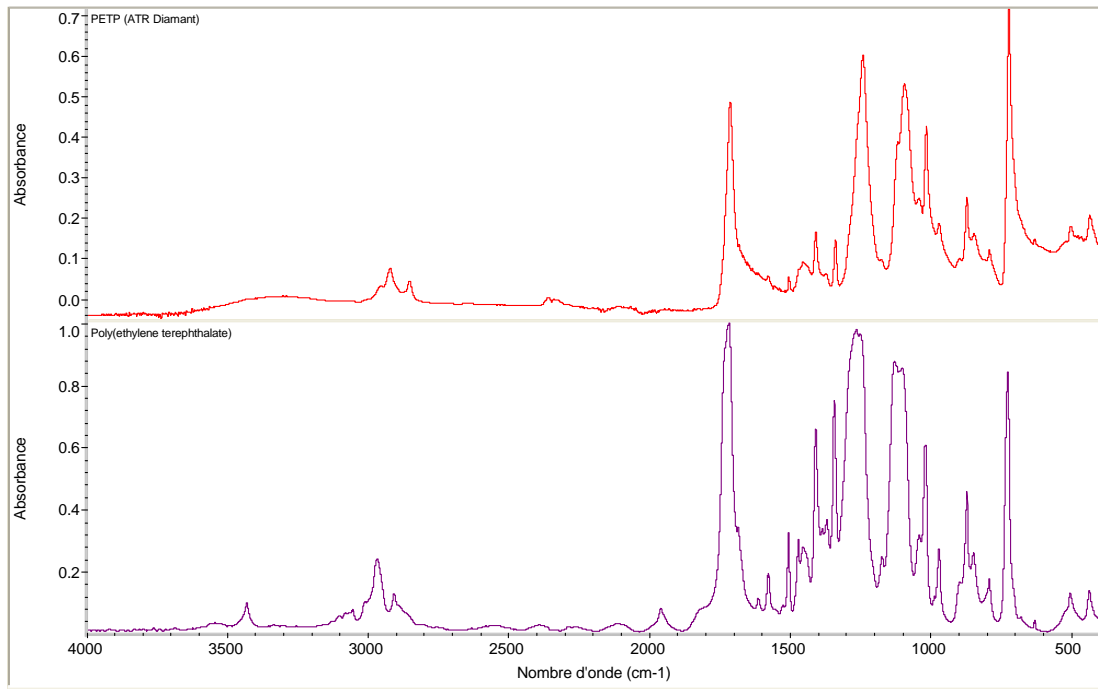


Figure 6.18. PETP vs. PETP de la base de données

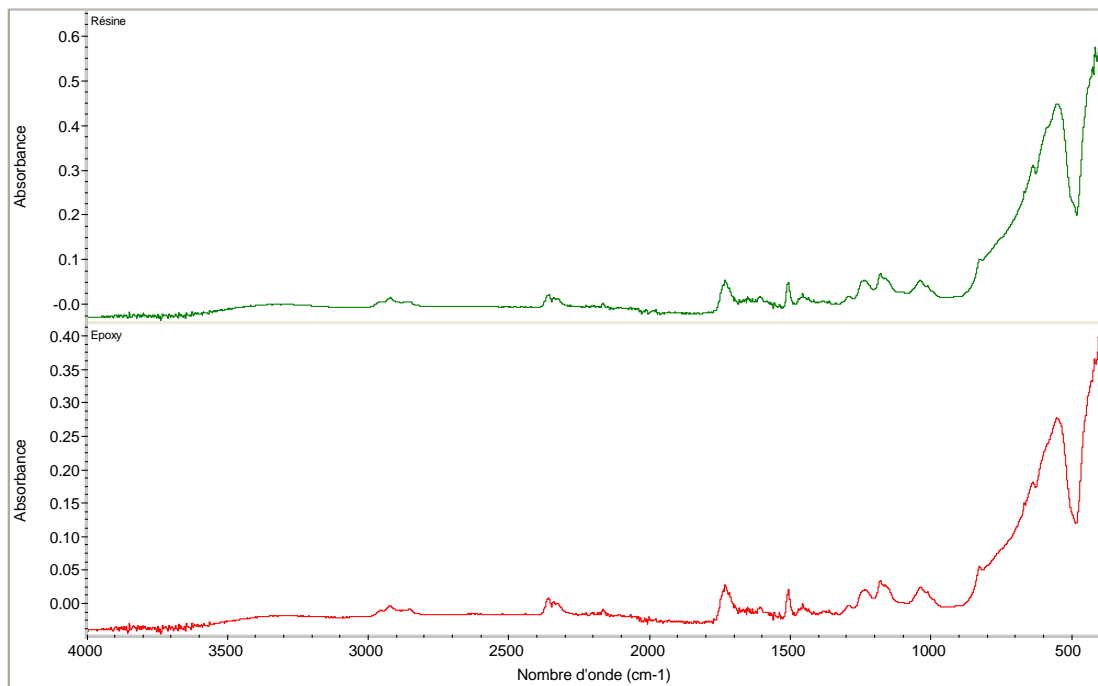


Figure 6.19. Résine époxy vieillie vs. résine époxy « neuve »

La signature des charges minérales s'observe facilement dans les spectres mesurés pour la résine époxy pour les faibles valeurs de la longueur d'onde (Figure 6.19). Les deux spectres sont identiques (99,8%), le vieillissement n'étant pas observé dans le cas de cette mesure.

Bibliographie

- [1] L. Christophorou and L. Pinnaduwege, "Basic physics of gaseous dielectrics," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on]*, vol. 25, no. 1, pp. 55–74, Feb. 1990.
- [2] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. Averyt, M. Tignor, and H. Miller, Eds., *Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007. Disponible sur : <http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>
- [3] Centre Interprofessionnel Technique d'Etudes de la Pollution Atmosphérique, "Données annuelles nationales - GES (gaz à effet de serre) – SF₆," 2009. Disponible sur : http://www.citepa.org/emissions/nationale/Ges/ges_sf6.htm
- [4] F. Y. Chu, "SF₆ decomposition in gas-insulated equipment," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, no. 5, pp. 693–725, 1986.
- [5] F. Buret and A. Beroual, "SF₆ dielectric behaviour in a high voltage circuit breaker at low temperature under lightning impulses," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 267–273, 1996.
- [6] J. Meek and J. E. Craggs, *Electrical breakdown of gases*, Wiley Series in Plasma Physics ed., J. Meek, J.M. Craggs, Ed. John Wiley and Sons, Ltd., New York, NY, 1978.
- [7] P. Ségur, "Gaz isolants" *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique ISSN 0992-5449*, vol. D3, no. D2530, pp. 2530.1–2531.23, 1990. Disponible sur : <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=15905252>
- [8] S. Boggs and N. Wiegart, *Gaseous Dielectrics IV: Proceedings of the Fourth International Symposium on Gaseous Dielectrics pp. 531-539*, L. Christophorou and M. Pace, Eds. Pergamon, 9 1984. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0080315704/>
- [9] S. Sangksaad, "Corona inception and breakdown voltages in nonuniform field in SF₆," *Proceedings 2nd International Symposium on High Voltage Engineering*, pp. 379–384, 1975.
- [10] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "Breakdown mechanisms in sulphur-hexafluoride," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, no. 3, pp. 135–145, 1978.

-
- [11] A. Pedersen, "On the electrical breakdown of gaseous dielectrics-an engineering approach," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on]*, vol. 24, no. 5, pp. 721–739, Oct 1989.
- [12] W. McAllister, I, "On the concept of electrode to discharge phenomena in surface roughness with reference strongly electronegative gases," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-21, no. 4, pp. 659–662, 1986.
- [13] A. Blair, *Electrical Insulation*, 1st ed. Springer, 10 1997. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0412497603/>
- [14] T. W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Virgreux, G. Wind, and H. Winkelkemper, "Breakdown of gases in uniform fields. Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride," *Electra*, vol. 32, p. 61–82, 1974.
- [15] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases (Advanced physics series. Monographs on ionization and electrical discharges in gases)*. Butterworths, 1964. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B0000CM6B9/>
- [16] F. L. Jones, *Ionization & Breakdown in Gases*. Methuen & Co Ltd (England), 1957. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B000YBLST2/>
- [17] L. B. Loeb, *Fundamental Processes of Electrical Discharge in Gases*, 1st ed. John Wiley and Sons, 1939. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/B000AU86AG/>
- [18] L. Niemeyer and F. Pinnekamp, "Leader discharges in SF₆" *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 16, no. 6, pp. 1031–1045, 1983. Disponible sur : <http://stacks.iop.org/0022-3727/16/1031>
- [19] I. Gallimberti and N. Wiegart, "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions. II. Streamer to leader transition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 2363–2379, 1986. Disponible sur : <http://stacks.iop.org/0022-3727/19/2363>
- [20] O. Farish, "Corona-controlled breakdown in SF₆ and SF₆ mixtures," in *Phenomena in Ionized Gases, XVI International Conference, Invited Papers*, W. Bötticher, H. Wenk, & E. Schultz-Gulde, Ed., Sep. 1983, pp. 187–+.
- [21] B. T. Diarra, "Étude de la tenue diélectrique dans les câbles haute tension à isolation gazeuze," Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 1996.
- [22] R. Hawley, "Solid insulators in vacuum: A review (invited paper)," *Vacuum*, vol. 18, no. 7, pp. 383 – 390, 1968. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6TW4-46Y2WYJ-115/2/70e9f010a3048a83e81df44504a51abd>
-

-
- [23] A. Pedersen, "The effect of surface roughness on breakdown in SF₆" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 94, no. 5, pp. 1749–1754, 1975.
- [24] N. H. Malik and A. H. Qureshi, "Calculation of discharge inception voltages in SF₆-N₂ mixtures," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-14, no. 2, pp. 70–76, 1979.
- [25] Y. Khan, K. Sakai, S. Okabe, J. Suehiro, and M. Hara, "Importance of the consideration of electrical gradient force in the deactivation of free conducting particle under dc voltage," in *Proc. Transmission and Distribution Conf. and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES*, vol. 2, 2002, pp. 904–908.
- [26] J. Jia, Q. Zhang, J. Zhu, and L. Yang, "Metal inserted spacer influence on particle motion in nonuniform electrical field under DC voltage," in *Proc. Int. Symp. Electrical Insulating Materials (ISEIM 2005)*, vol. 2, 2005, pp. 372–375.
- [27] 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 Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 96, no. 3, pp. 768–777, 1977.
- [28] A. H. Cookson, "Gas-insulated cables," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-20, no. 5, pp. 859–890, 1985.
- [29] A. H. Cookson and O. Farish, "Particle-initiated breakdown between coaxial electrodes in compressed SF₆" *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 3, pp. 871–876, 1973.
- [30] B. Mazurek, J. D. Cross, and R. G. van Heeswijk, "The effect of a metallic particle near a spacer on flashover phenomena in SF₆" *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 28, no. 2, pp. 219–229, 1993.
- [31] I. M. Bortnik and C. M. Cooke, "Electrical breakdown and the similarity law in SF₆ at extra-high-voltages," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, no. 5, pp. 2196–2203, 1972.
- [32] F. H. Kreuger, *Partial Discharge Detection in High Voltage Equipment*, illustrated edition ed. Butterworth-Heinemann, 3 1990. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/-0408020636/>
- [33] I. Kemp, *M. Haddad - Advances in High Voltage Engineering (IEE Power and Energy)*. The Institution of Engineering and Technology, 2004, ch. 4, p. 139. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0852961588/>
-

-
- [34] P. Bezborodko, "Études des mécanismes de décharges partielles dans des cavités gazeuses au contact des isolants solides ou liquides. relation avec le phénomènes de gassing des liquides," Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1988.
- [35] B. Techaumnat, S. Hamada, and T. Takuma, "Effect of conductivity in triple-junction problems," *Journal of Electrostatics*, vol. 56, no. 1, pp. 67–76, Sep. 2002. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V02-44SKDS5-5/2/-fd23dad1bc21b0d2208d786c4ebf21d0>
- [36] J. Meixner, "The behavior of electromagnetic fields at edges," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 20, no. 4, pp. 442–446, 1972.
- [37] T. Takuma, T. Kouno, and H. Matsuda, "Field behavior near singular points in composite dielectric arrangements," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, no. 6, pp. 426–435, 1978.
- [38] T. Takuma, T. Kawamoto, and H. Fujinami, "Effect of conduction on field behavior near singular points in composite medium arrangements," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-17, no. 3, pp. 269–275, 1982.
- [39] T. Takuma, "Field behaviour at a triple junction in composite dielectric arrangements," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 3, pp. 500–509, 1991.
- [40] M. Hara, T. Kurihara, S. Kozuru, J. Suehiro, and N. Hayashi, "Estimation of partial discharge onset characteristics in gases around a triple junction," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 144, no. 1, pp. 1–11, 2003. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1002/ej.10175>
- [41] A. Pedersen, I. W. McAllister, G. C. Crichton, and S. Vibholm, "Formulation of the streamer breakdown criterion and its application to strongly electronegative gases and gas mixtures," *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, vol. 67, no. 6, pp. 395–402, Nov. 1984. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01614884>
- [42] K. Srivastava and J. Zhou, "Surface charging and flashover of spacers in SF₆ under impulse voltages," *IEEE transactions on electrical insulation*, vol. 26 (3), pp. 428–442, 1991.
- [43] S. Tenbohlen and G. Schroder, "The influence of surface charge on lightning impulse breakdown of spacers in SF₆" *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7(2), pp. 241–6, 2000.
- [44] M. M. Morcos, S. A. Ward, and H. Anis, "On the detection and control of metallic particle contamination in compressed GIS equipment," in *Proc. Annual Report Electrical Insulation and Dielectric Phenomena Conf*, 1998, pp. 476–480.
-

-
- [45] C. Tran Duy, “Études des interfaces triples métal/isolant/gaz sur les caractéristiques d’isolation haute tension des gaz comprimés et simulation,” Thèse de Master, LEMD-CNRS, Grenoble, juin 2005.
- [46] W. Rogowski, “Die elektrische festigkeit am rande des plattenkondensators,” *Electrical Engineering (Archiv fur Elektrotechnik)*, vol. 12, no. 1, pp. 1–15, Jan. 1923. Disponible sur : <http://dx.doi.org/10.1007/BF01656573>
- [47] M. Naidu, *High Voltage Engineering*, 1st ed. McGraw-Hill Professional, 11 1999. Disponible sur : <http://amazon.com/o/ASIN/0071361081/>
- [48] P. Diagnostix, *The ICMsystem - Digital Partial Discharge Recording - User Manual - Rev. 3.03E*, Bruesseler Ring 95a * D-52074 Aachen * Germany. Disponible sur : www.pd-systems.com
- [49] Hamamatsu, *Photosensor Module, H7732-10*, Hamamatsu. Disponible sur : http://jp.hamamatsu.com/products/sensor-std/pd002/pd395/H7732-10/index_en.html
- [50] M. Laroussi, X. Lu, and C. M. Malott, “A non-equilibrium diffuse discharge in atmospheric pressure air,” *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 53–56, 2003. Disponible sur : <http://stacks.iop.org/0963-0252/12/53>
- [51] A. Lemzadmi, N. Bonifaci, A. Denat, and M. Nemamcha, “Light emission from corona discharge in SF₆ and SF₆/N₂ gas mixtures at high pressure,” *EPJ Applied physics Print*, vol. 33 (3), pp. 213–219, 2006.
- [52] A. Quenin, “Étude des propriétés diélectriques des mélanges azote-SF₆ à faible taux de SF₆” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [53] R. Morrow, “A survey of the electron and ion transport properties of SF₆” *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 14, no. 3, pp. 234–239, 1986.
- [54] J. Dutton, “A survey of electron swarm data,” *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, vol. 4, no. 3, pp. 577–856, 1975. Disponible sur : <http://link.aip.org/link/?JPR/4/577/1>
- [55] J. Liesegang, B. C. Senn, and E. R. Smith, “Resistivity of static and antistatic insulators from surface charge measurement,” *Journal of Applied Physics*, vol. 77, no. 11, pp. 5782–5785, 1995.
- [56] Y. Hori, “The lateral migration of surface charges on poly(methyl methacrylate) graft-copolymerized onto polypropylene film, and its dependency on relative humidity,” *Journal of Electrostatics*, vol. 48, no. 2, pp. 127 – 143, 2000. Disponible sur : <http://>
-

www.sciencedirect.com/science/article/B6V02-3Y6GYPF-5/2/-
5fb14223ee015ed252ae3258ea018cba

[57] C. Lili, J. Jian, X. Zhongfu, C. Gangjin, and W. Zhenzhong, “Charge storage and transport in polymethylmethacrylate (PMMA) film,” *Journal of Electrostatics*, vol. 44, no. 1-2, pp. 61 – 65, 1998, selected Papers from the 3rd International Conference on Applied Electrostatics. Disponible sur : <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V02-3WRC6DR-8/2/005a22a7f1cdc25cd3f6706533d50f01>

[58] J. Kindersberger and C. Lederle, “Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid. Part II: Measurements,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 4, pp. 949–957, 2008.

[59] C. Hudon, R. Bartnikas, and M. Wertheimer, “Effect of physico-chemical degradation of epoxy resin on partial discharge behavior,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on [see also Electrical Insulation, IEEE Transactions on]*, vol. 2, no. 6, pp. 1083–1094, Dec. 1995.

Papiers publiés pendant la thèse

C. Tran Duy, N. Bonifaci, A. Denat, O. Lesaint, **L. Caliap**, A. Girodet, B. Gelloz, and P. Ponchon. Partial discharges at a triple junction metal/solid insulator/gas and simulation of inception voltage. *Journal of Electrostatics*, 66(5-6):319–327, May 2008.

L. Caliap. Étude de l’optimisation diélectrique des isolants pour les contraintes des postes haute tension sous enveloppes métallique (PSEM). In *Congress of Electrical Engineering Young Researchers (JCGE), Lyon, France, 2008*.

L. Caliap, O. Lesaint, A. Denat, N. Bonifaci, G. Blanchet, A. Girodet, and B. Gelloz. Étude de l’optimisation des isolants d’un point de vue diélectrique pour les contraintes du GIS. In *6th Conference of the Electrostatic French Society (SFE), Paris, 2008*.

L. Caliap, O. Lesaint, A. Denat, N. Bonifaci, G. Blanchet, A. Girodet, and B. Gelloz. Influence of a metallic particle at a metal/insulator/gas triple junction in air and sf6. In *Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP, 2009*.

A. Girodet, G. Blanchet, **L. Caliap**, O. Lesaint, and A. Denat. Influence of a simulated defect on the performance of a triple junction in synthetic air and sulfur hexafluoride, under HVAC. In *Annual meeting of Study Committee D1 of CIGRE (International Council on Large Electric Systems), Budapest, 2009*.

L. Caliap, N. Bonifaci, A. Denat, O. Lesaint, G. Blanchet, A. Girodet, and B. Gelloz. Influence des décharges partielles sur la tenue diélectrique d'une géométrie de type " point triple ". In *7th Conference of the Electrostatic French Society (SFE), Montpellier, France, 2010*.