Comparaison des caractéristiques électriques et optiques des décharges glissantes sur différents types d'isolateurs dans le CO2, le SF6, le N2 et leurs mélanges à différentes pressions

Fares Sadaoui

▶ **To cite this version:**

Fares Sadaoui. Comparaison des caractéristiques électriques et optiques des décharges glissantes sur différents types d'isolateurs dans le CO2, le SF6, le N2 et leurs mélanges à différentes pressions. Autre. Ecole Centrale de Lyon, 2013. Français. NNT : 2013ECDL0019 . tel-00985379

HAL Id: tel-00985379

https://theses.hal.science/tel-00985379

Submitted on 29 Apr 2014

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.

N° d'ordre : 2013-19 **Année 2013**

T H È S E

présentée devant

L'ÉCOLE CENTRALE DE LYON

pour obtenir le grade de

DOCTEUR
(Arrêté du 30/03/1992)

Spécialité: Génie Electrique

Préparée au sein de

L'ÉCOLE DOCTORALE
ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE
DE LYON

par

Fares SADAOUI

Comparaison des caractéristiques électriques et optiques des décharges glissantes sur différents types d'isolateurs dans le CO_2, le SF_6 et le N_2 et leurs mélanges à différentes pressions

---

Soutenue le 24 septembre 2013 devant la commission d'examen

J U R Y

S. AGNEL	Professeur – Université de Montpellier II	***Rapporteur***
A. BEROUAL	Professeur – Ecole Centrale de Lyon – AMPERE - Lyon	***Directeur de thèse***
C. BROSSEAU	Professeur – Université de Bretagne Occidentale – Brest	***Président/Examinateur***
N. BURAIS	Professeur – Université Claude Bernard de Lyon	***Examinateur***
J. MARTINEZ	Professeur – Université Paul Sabatier - Toulouse	***Rapporteur***

NOM	Prénom	Laboratoire	Spécialité	Date de soutenance
SIMONET	Pascal	*AMPERE*	microbiologie	1990
MOREL	Hervé	*AMPERE*	électrotechnique	10 février 1994
NICOLAS	Laurent	*AMPERE*	électrotechnique	12 juillet 1994
REDARCE	Hervé Tanneguy	*AMPERE*	*automatique*	*20 juillet 1995*
KRÄHENBÜHL	Laurent	*AMPERE*	par nomination DR au CNRS	1 octobre 1996
CLERC	Guy	*AMPERE*	*PR LYON 1*	6 mars 1998
BURAIS	Noël	*AMPERE*	*PR LYON 1*	7 décembre 2004
VOLLAIRE	Christian	AMPERE	génie électrique	25 mars 2005
SCORLETTI	Gérard	AMPERE	automatique	6 octobre 2006
BURET	François	AMPERE	électrotechnique	17 novembre 2006
VENET	Pascal	*AMPERE*	*génie électrique*	*24 octobre 2007*
BEROUAL	Abderrahmane	AMPERE	Doctorat d'Etat es Sc Physiques	1 janvier 1987

TOTAL AMPERE : 4

LAFON	Philippe	*Extérieur*	*Acoustique*	*26 janvier 2011*
GOURDAIN	Nicolas	*Extérieur*	*Mécanique des fluides*	*3 novembre 2011*

TOTAL EXTERIEUR :

MAITRE	*Jean-François*	*ICJ*	*PR émérite*	30 novembre 1974
MOUSSAOUI	Mohand	*ICJ*	*retraite au 1/10/11*	20 juin 1977
MUSY	François	ICJ	Doctorat d'Etat	7 juin 1985
MARION	Martine	ICJ	Doctorat d'Etat en Mathématiques	15 décembre 1988
MIRONESCU	Elisabeth	ICJ	Doctorat d'Etat	15 décembre 1999
LOHEAC	Jean-Pierre	ICJ	Mathématiques	15 novembre 2002
ZINE	Abdel-Malek	ICJ	Mathématiques	9 novembre 2005

TOTAL ICJ : 5

VIKTOROVITCH	Pierre	*INL*	Doctorat d'Etat es Sc Physiques	1975
SOUTEYRAND	Eliane	*INL*	Doctorat d'Etat en Matériaux	1985
GRENET	Geneviève	*INL*	Doctorat d'Etat es Sciences	6 novembre 1981
GENDRY	Michel	*INL*	Doctorat d'Etat es Sciences	12 octobre 1986
ROBACH	Yves	INL	Doctorat d'Etat en Matériaux	31 janvier 1989
JACQUEMOD	Gilles	*INL*	*électronique*	*13 janvier 2000*
GAFFIOT	Frédéric	INL	électronique	18 janvier 2000
PHANER-GOUTORBE	Magali	INL	Physique	19 décembre 2003
CLOAREC	Jean-Pierre	INL	chimie des matériaux	20 décembre 2004
DANESCU	Alexandre	INL	mécanique	20 juin 2005
O'CONNOR	Ian	INL	électronique	11 octobre 2005
SEASSAL	Christian	*INL*	Photonique	9 mars 2007
CALLARD	Anne-Ségolène	INL	Physique, Nanophotonique	6 décembre 2007
LETARTRE	Xavier	*INL*	Photonique	3 juin 2008

SAINT-GIRONS	Guillaume	*INL*	milieux denses et matériaux	5 juin 2009
GARRIGUES	Michel	*INL*		
JOSEPH	Jacques	*INL*	*PR émérite*	
TARDY	Jacques	*INL*	électronique	
MIEYEVILLE	Fabien	INL	Dispositif de l'électronique intégrée	29 mai 2012
CHEVOLOT	Yann	*INL*	Chimie théorique, physique, analytique	28 septembre 2012

TOTAL INL : 8

DAVID	Bertrand	LIESP	doctorat d'Etat en Informatique	1981
SEFFAH	Ahmed	*LIESP*	*informatique*	*15 septembre 2006*

TOTAL LIEPS : 2

CHEN	Liming	LIRIS		1 janvier 1998

TOTAL LIRIS : 1

SCOTT	Julian	LMFA	PhD	1978
HAMADICHE	Mahmoud	*LMFA*	*Doctorat d'Etat es Sciences*	*7 juin 1905*
JUVE	Daniel	LMFA	Doctorat d'Etat es Sciences	1985
BLANC-BENON	Philippe	*LMFA*	Doctorat d'Etat es Sciences	9 juin 1905
ROGER	Michel	LMFA	Doctorat d'Etat en Acoustique	1989
JEANDEL	Denis	LMFA	Doctorat d'Etat es Sc Physiques	9 juillet 1976
GOROKHOVSKI	Mickael	LMFA		28 avril 1982
LEBOEUF	Francis	LMFA	Doctorat d'Etat en Mécanique	26 juin 1984
FERRAND	Pascal	*LMFA*	Doctorat d'Etat	17 mars 1986
HENRY	Daniel	*LMFA*	Docteur es Sciences Physiques	19 juin 1986
GALLAND	Marie-Annick	LMFA	Acoustique	12 juillet 1993
PERKINS	Richard	LMFA	mécanique	20 février 1998
BAILLY	Christophe	LMFA	Acoustique	29 mars 1999
CARRIERE	Philippe	*LMFA*	Mécanique des Fluides	27 septembre 2000
SIMOENS	Serge	*LMFA*	Mécanique des Fluides	1 avril 2002
TREBINJAC	Isabelle	LMFA	mécanique	7 mai 2003
LE RIBAULT	Catherine	*LMFA*	Mécanique des Fluides	11 juillet 2003
LAKEHAL	Djamel	*LMFA*	*mécanique, génie mécanique et civil*	*26 novembre 2004*
GODEFERD	Fabien	*LMFA*	énergétique et thermique	13 décembre 2004
UHLMANN	Markus	*LMFA*	*Thermique et Energétique*	*27 juin 2006*
BOGEY	Christophe	*LMFA*	Acoustique	25 mai 2007
SHAO	Liang	*LMFA*	Mécanique	15 septembre 2007
NICOLLEAU	Franck	*LMFA*	*mécanique, génie mécanique et civil*	*8 décembre 2009*
BERTOGLIO	Jean-Pierre	*LMFA*	Doctorat d'Etat es Sciences	1 juin 1986
BIESHEUVEL	Arie	*LMFA*		
CAMBON	Claude	*LMFA*		
CHAMPOUSSIN	J-Claude	*LMFA*		
COMTE-BELLOT	Geneviève	*LMFA*	*PR émérite*	
BOS	Wouter	LMFA	Mécanique des Fluides	29 juin 2012

TOTAL LMFA : 9

JUVE	Denyse	LTDS	Doctorat d'Etat en Chimie	1983
JEZEQUEL	Louis	LTDS	Doctorat d'Etat	1985
LOUBET	Jean-Luc	*LTDS*	Doctorat d'Etat	1 décembre 1986
STREMSDOERFER	Guy	LTDS	chimie des matériaux	3 avril 1992
DONNET	Christophe	*LTDS*	*PR ENISE*	27 avril 1995
MAZUYER	Denis	LTDS	mécanique	27 avril 1995
SALVIA	Michelle	LTDS	matériaux	4 décembre 1997
CHOVELON	J.Marc	*LTDS*	matériaux	3 avril 1998
BOMBA	Cécile	LTDS	*génie des matériaux*	*29 mai 1998*
PONSONNET	Laurence	LTDS	*matériaux*	*29 mai 1998*
CHATEAUMINOIS	Antoine	*LTDS*	*matériaux*	*22 janvier 1999*
PERRET-LIAUDET	Joël	LTDS	mécanique	16 avril 1999
DUBUJET	Philippe	*LTDS*	*PR ENISE*	31 mars 2000
JEANDIN	Michel	*LTDS*	Matériaux Mécanique	20 mars 2001
THOUVEREZ	Fabrice	LTDS	mécanique	5 juillet 2001
WONG	Henry	*LTDS*	génie civil	8 janvier 2002
FOUVRY	Siegfrid	*LTDS*	Matériaux Mécanique	12 septembre 2002
LE BOT	Alain	*LTDS*	Acoustique	19 décembre 2002
BENAYOUN	Stéphane	LTDS	matériaux	9 décembre 2003
HERTZ	Dominique	*LTDS*	*génie des matériaux*	*18 juin 2004*
ICHCHOU	Mohamed	LTDS	mécanique	6 décembre 2004
GUERRET	Chrystelle	*LTDS*	milieux denses et matériaux	7 mars 2005
HOC	Thierry	LTDS	chimie des matériaux	19 novembre 2007
SINOU	Jean-Jacques	LTDS	Mécanique	21 novembre 2007
VINCENS	Eric	LTDS	génie civil	17 novembre 2010
CAMBOU	Bernard	*LTDS*	*PR émérite*	
KAPSA	Philippe	*LTDS*		
MARTIN	Jean-Michel	*LTDS*	*PR émérite*	
SIDOROFF	François	*LTDS*	*PR émérite*	
VINCENT	Léo	*LTDS*	*PR émérite*	
CAYER-BARRIOZ	Juliette	*LTDS*	Mécanique	14 octobre 2012
DASSENOY	Fabrice	LTDS	Chimie théorique, physique, analytique	2 décembre 2011
DE BARROS BOUCHET	Maria Isabel	LTDS	Chimie des matériaux	12 décembre 2011
VALETTE	Stéphane	LTDS	milieux denses et matériaux	4 décembre 2012
TREHEUX	Daniel		*PR émérite*	

TOTAL LTDS : 15

Personnels ECL
Personnels CNRS
Personnels extérieurs

A la mémoire de ma très chère grand-mère Tayakout

A mes parents qui m'ont toujours soutenu

A mon frère et mes sœurs

A ma famille

A tous ceux qui me sont chers

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais adresser mes sincères remerciements à mon directeur de recherche, le Professeur Abderrahmane BEROUAL, pour m'avoir accueilli dans son équipe et avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail. Qu'il trouve ici mon respect et ma gratitude pour ses conseils, ses encouragements, sa disponibilité et surtout ses qualités humaines.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur Laurent Nicolas, ancien directeur du laboratoire AMPERE, pour m'avoir accueilli au sein de son unité de recherche, au Professeur François BURET, directeur du département Electrotechnique, Electronique et Automatique (EEA) de l'Ecole Centrale Lyon ainsi qu'au professeur Alain Nicolas, ancien responsable de la formation doctorale.

Je remercie vivement Monsieur Serge AGNEL, Professeur à l'Université Montpellier et Monsieur Juan MARTINEZ-VEGA, Professeur à l'Université Paul Sabatier, Toulouse III, pour avoir accepté de rapporter sur cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur Christian BROSSEAU, Professeur à l'Université de Bretagne Occidentale de Brest et à Monsieur Noël BURAIS, Professeur à l'Université Claude Bernard de Lyon pour avoir examiné ma thèse et accepté de faire partie du jury.

J'adresse également mes remerciements à tous les personnels techniques et administratifs d'AMPERE qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce travail.

Mes collègues (ou anciens collègues) Boubekeur MERABET, Yoann JAFFRE, Viet DANG, Jean-François NDOUMBE, Amine SLAMA, Salah-Eddine ADAMI, Sofiane AZHARI, Houssem Eddine NECHMI et Henry B.H. SITORUS pour les nombreux moments partagés au cours de ces années qui resteront inoubliables

Je remercie profondément mes parents qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager durant mes études. A qui je dois tout ce que je suis aujourd'hui. Une

pensée particulière à mon frère Sofiane et mes sœurs Sabrina, Sonia, Sofia, Sandra et Sarah qui ont toujours su me soutenir le moral pendant ces années de thèse. Je remercie également ma grande famille, plus particulièrement mon oncle Makhlouf qui m'a accueilli les bras ouverts dès mon arrivée en France. Son soutien à mon égard sur tous les plans m'a aidé à mener à bien mes projets.

Je ne saurais terminer sans adresser mes plus vifs remerciements à toutes les personnes, qui par leur soutien (moral, physique ou autres) de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Résumé

Le présent travail porte sur une étude comparative des caractéristiques optiques et électriques des décharges glissantes se propageant aux interfaces solide/gaz sur des isolateurs de verre, de Bakélite et de résine époxy en présence des gaz N_2, CO_2 et SF_6 et des mélanges SF_6/N_2 et SF_6/CO_2, sous tension continue et alternative (50 Hz), en géométrie pointe - plan. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans l'initiation des décharges partielles et leur évolution et développement en décharges surfaciques (glissantes) lesquelles peuvent conduire au contournement des composants et systèmes haute tension. Les résultats obtenus montrent que la morphologie et la longueur finale (d'arrêt ou d'extension maximale) des décharges surfaciques dépendent de la forme et de l'amplitude de la tension, de l'épaisseur et de la nature du solide isolant, du type du gaz/mélange et de sa pression. Il est montré que la longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension. L_f diminue lorsque la pression du gaz et/ou l'épaisseur du solide augmentent. Cette longueur est plus courte dans le SF_6 que dans le CO_2 ou le N_2 ; et elle diminue significativement lorsque le taux de SF_6 dans le mélange de gaz augmente. Par ailleurs, pour une tension donnée, L_f augmente avec la constante diélectrique de l'isolant solide. La longueur finale des décharges est nettement plus élevée sous tension alternative que sous tension continue. La morphologie des décharges glissantes générées sous tension continue et alternative est généralement non radiale; leur orientation est fortement influencée par la présence des charges d'espace présentes ou déposées sur la surface de l'isolateur. Une analyse fractale des décharges glissantes obtenues expérimentalement sous tension continue est également réalisée et une corrélation entre la dimension fractale, la pression du gaz, la constante diélectrique et l'épaisseur du matériau solide est mise en évidence. En particulier, la dimension fractale augmente lorsque la constante diélectrique augmente et/ou l'épaisseur de l'isolant solide diminue et/ou la pression du gaz diminue.

Mots clés :

Interface solide/gaz, décharges partielles, décharges glissantes, longueur d'arrêt, dimension fractale.

Abstract

This work deals with a comparative study of optical and electrical characteristics of creeping discharges propagating at solid/gas interfaces on insulators made of glass, Bakelite and epoxy resin in the presence of N_2, CO_2 and SF_6 gases and SF_6/N_2 SF_6/CO_2 mixtures, under DC and AC (50 Hz) voltage, using a point - plane electrode arrangement. The objective is to better understand the mechanisms involved in the initiation of partial discharges and their evolution and development into discharges surface (creeping discharges) that can lead to flashover of components and high voltage systems. The results show that the morphology and final length (maximum extension or stopping length) depend on the shape and amplitude of the voltage, the thickness and the nature of the solid insulator, type of gas / mixture and its pressure. It is shown that the final length L_f increases quasi-linearly with the voltage. L_f decreases as the gas pressure increases and/ or the thickness of the solid increases. L_f is shorter in SF_6 than in CO_2 or N_2, and it decreases significantly when the rate of SF_6 in the gas mixture increases. Moreover, for a given voltage, L_f increases with the dielectric constant of the solid insulation. The final length of the discharge is much higher under AC voltage than under DC voltage. The morphology of creeping discharges generated under DC and AC voltage is generally not radial; and their orientation is strongly influenced by the presence of space charges present or deposited on the surface of the insulator. A fractal analysis of creeping discharges experimentally obtained under DC voltage is also carried out and a correlation between the fractal dimension, the pressure of the gas, the dielectric constant and the thickness of the solid material is highlighted. In particular, the fractal dimension increases when the dielectric constant increases and / or thickness of the solid insulator decreases and / or pressure of the gas decreases.

Keywords:

Solid/gas interface, partial discharges, creeping discharges, stopping length, fractal dimension.

Table des matières

Abréviations et symboles 1

Liste des figures 3

Liste des tableaux 9

Introduction générale 11

CHAPITRE 1: ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE: CLAQUAGE DANS LES GAZ, DECHARGES PARTIELLES ET PHENOMENES DE DECHARGES AUX INTERFACES SOLIDE/GAZ

1. Introduction 15
2. Claquage diélectrique dans un gaz 15
   - 2.1. L'avalanche électronique 16
   - 2.2. Théorie de Townsend 17
     - 2.2.1. Mécanismes de claquage 17
     - 2.2.2. Critère de claquage de type Townsend 17
   - 2.3. Loi de Paschen 18
     - 2.3.1. Limites du mécanisme de Townsend 20
   - 2.4. Théorie du streamer 20
     - 2.4.1. Mécanismes de claquage 21
     - 2.4.2. Critère de claquage 22
3. Facteurs influençant la tenue diélectrique des gaz 24
   - 3.1. Les électrodes 25
     - 3.1.1. La géométrie des électrodes 25
     - 3.1.2. Le matériau des électrodes (en particulier la cathode) 25
     - 3.1.3. L'état de surface des électrodes 26
   - 3.2. Particules métalliques 26
   - 3.3. Influence de la pression du gaz 28
   - 3.4. Influence des impuretés du gaz 28
4. Utilisation du SF_6 dans l'industrie électrique 28
5. SF_6 est un gaz à effet de serre 29
6. Quelques moyens de réduction de l'émission de SF_6 30
   - 6.1. Réduction des fuites de SF_6 31
   - 6.2. Récupération et recyclage du SF_6 31

6.3. Optimisation de la conception des appareillages 31
6.4. Mélange de gaz à base de SF_6 32
7. Gaz alternatifs au SF_6 32
7.1. Propriétés intrinsèques 33
7.1.1. Propriétés physiques de base 33
7.1.2. Propriétés chimiques de base 33
7.2. Propriétés extrinsèques 34
7.2.1. Réactions et sous-produits 34
7.2.2. Décharge et claquage électrique 35
7.3. D'autres conditions pour la commercialisation 35
8. Décharges partielles 36
8.1. Définition 36
8.2. Classification des décharges partielles 36
8.3. Caractérisation des décharges partielles 37
8.3.1. Décharges dans une cavité (décharges internes) 37
8.3.2. Décharges couronnes (décharges externes) 40
8.3.3. Décharges surfaciques 40
8.4. Mesure électrique des décharges partielles 41
8.4.1. Les montages de détection électrique 41
8.4.2. Procédure d'étalonnage 44
9. Décharges surfaciques aux interfaces solide/gaz 44
9.1. Physique des décharges surfaciques 44
9.2. Analyse fractale des décharges glissantes 47
10. Conclusion 48

CHAPITRE 2: TENUE DIELECTRIQUE DES GAZ ET MELANGES

1. Introduction 50
2. Dispositif expérimental et méthodologies 50
2.1. Description de la Cellule d'essais 51
2.2. Configurations d'électrodes 52
2.3. Source de tension 53
2.4. Pressions partielles et admission des gaz dans la cellule d'essais 54
2.4.1. Calcul des Pressions partielles 54
2.4.2. Le remplissage de la cellule d'essais 57

2.5. Procédure d'essais pour la mesure de la tenue diélectrique 57
2.6. Coefficient de non uniformité du champ électrique 59
2.6.1. Pointe – plan (champ non uniforme) 59
2.6.2. Sphère - plan (champ quasi-uniforme) 60
3. Résultats de mesure de la tenue diélectrique 61
3.1. Résultats en champs quasi-uniforme (sphère – plan) 62
3.2. Résultats en champ non uniforme (pointe - plan) 65
3.2.1. Gaz purs 65
3.2.2. Mélanges de gaz 67
4. Conclusion 69

CHAPITRE 3: DECHARGES PARTIELLES SOUS TENSION ALTERNATIVE

1. Introduction 71
2. Dispositif de mesure et procédures expérimentales 71
2.1. Cellule d'essais 72
2.2. Gaz et diélectriques solides utilisés 73
2.3. Source de tension 74
2.4. Dispositif de mesure et détection des décharges partielles 74
2.4.1. Impédance de détection – ZDP 10 74
2.4.2. Calibrateur portable (ETL-X) 74
2.4.3. Le mesureur de décharges partielles 74
3. Résultats expérimentaux 76
3.1. Activité et localisation des décharges partielles 76
3.2. Charge apparente maximale 80
3.2.1. Influence de l'amplitude de la tension, de la nature et de la pression du gaz .. 80
3.2.2. Influence de la polarité de la tension 82
3.2.3. Influence du pourcentage de SF_6 dans les mélanges 83
3.2.4. Influence de l'épaisseur du solide 84
3.2.5. Influence de la nature de l'échantillon solide 86
4. Conclusion 87

CHAPITRE 4: DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE

1. Introduction 90
2. Dispositif et procédures expérimentaux 90

2.1. Mesure de la longueur finale des décharges 92
3. Morphologie et longueur finale des décharges 92
3.1. Verre 92
3.1.1. Morphologie des décharges 92
3.1.2. Longueur finale des décharges 96
3.1.3. Influence de l'épaisseur du solide 98
3.2. Bakélite et résine époxy 101
3.2.1. Morphologie et longueur finales des décharges 101
4. Conclusion 110

CHAPITRE 5: DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE

1. Introduction 113
2. Dispositif et procédures expérimentaux 113
3. Résultats expérimentaux 115
3.1. Morphologie et longueur finale des décharges 115
3.1.1. Influence de l'amplitude de la tension appliquée, du type de gaz et sa pression 115
3.1.2. Influence de la concentration de SF_6 dans les mélanges 121
3.1.3. Influence de l'épaisseur de l'échantillon solide 123
4. Courants et charges associés aux décharges glissantes 125
5. Analyse fractale des décharges glissantes par la méthode de quadrillage (Box counting method) 128
5.1. Procédure expérimentale 128
5.2. Principe de la méthode de quadrillage 129
5.3. Programme de calcul 129
5.4. Résultats 131
5.4.1. Influence de l'épaisseur du solide 131
5.4.2. Influence de la pression 134
6. Conclusion 137
Conclusion générale 139
Bibliographie 141

Abréviations et symboles

AC	*Alternating current - Courant (ou tension) alternatif*
α	*Premier coefficient d'ionisation de Townsend (1/cm³)*
β	*Facteur de non uniformité du champ dans l'intervalle inter électrode*
C	*Capacité*
CCD	*Charge Coupled Device (Détecteur de charge à couplage)*
CO_2	*Dioxyde de carbone*
d	*distance inter-électrodes*
D	*Dimension fractale de la décharge*
DC	*Direct current - Courant (ou tension) continu*
DP	*Décharges partielles*
q	*Charge élémentaire de l'électron ($e = q = 1{,}6.10^{-19}$ coulomb)*
q_{max}	*Charge apparente maximale (C)*
e	*Epaisseur de l'échantillon solide (mm)*
E	*Champ électrique*
ε_r	*Permittivité relative du matériau*
η	*Facteur d'uniformité du champ dans l'intervalle inter électrode*
γ	*Deuxième coefficient (d'émission de surface) de Townsend (1/cm³)*
HT	*Haute Tension*
I	*Courant électrique*
λ	*Libre parcours moyen*
L_f	*Longueur de la décharge dans son extension maximale (mm)*
N_2	*Diazote*
P	*Pression des gaz ou mélange (MPa)*
PDO	*Potentiel de Dégradation de l'Ozone*
PEG	*Potentiel d'Echauffement Global*
PMMA	*Polyméthacrylate de méthyle*
PVC	*Polychlorure de vinyle*
R	*Rayon de courbure de la pointe (µm)*
SF_6	*Hexafluorure de soufre*
T	*Température (K)*

T_{dec}	*Température de décomposition de gaz*
V_c	*Tension de claquage (V)*
V_{cn}	*Tension de claquage en polarité négative*
V_{cp}	*Tension de claquage en polarité positive*
U_{50}	*Tension provoquant le contournement (ou claquage) de 50% des échantillons soumis au test*
U_{sdp}	*Tension seuil d'apparition des décharges partielles (V)*
ZDP	*Impédance de mesure des décharges partielles*

Liste des figures

FIGURE 1.1. PROCESSUS D'EMISSION ET D'IONISATION DANS UNE DECHARGE ELECTRIQUE 16

FIGURE 1.2. COURBE DE PASCHEN POUR DIFFERENTS GAZ [23] 20

FIGURE 1.3. EMISSION ANNUELLE DU SF_6 [41] 30

FIGURE 1.4. DIFFERENTS TYPES DE DECHARGES PARTIELLES SELON KREUGER : INTERNE (A), SURFACE (B), COURONNE (C) ET EN ARBORESCENCE (D) 37

FIGURE 1.5. ISOLANT SOLIDE COMPORTANT UNE VACUOLE (CAVITE GAZEUSE) 38

FIGURE 1.6. MODELE CLASSIQUE DES CAPACITES EQUIVALENTES (A) ET RECURRENCE DES DECHARGES PARTIELLES DANS UNE CAVITE (B) [59] 39

FIGURE 1.7. CIRCUIT EQUIVALENT ET RECURRENCE DES DECHARGES COURONNES [59] 40

FIGURE 1.8. CONFIGURATION DE DECHARGES DE SURFACE [60] 40

FIGURE 1.9. SCHEMA DE PRINCIPE D'UN SYSTEME DE DETECTION ELEMENTAIRE (A) ET EN PONT (B) 42

FIGURE 1.10. LES DEUX TYPES DE COUPLAGES POSSIBLES 43

FIGURE 1. 11. CIRCUIT D'ETALONNAGE DE LA MESURE DE LA CHARGE APPARENTE 44

FIGURE 1.12. COMPARAISON DU CHAMP ELECTRIQUE AUTOUR DE L'ELECTRODE HT DANS L'AIR ET EN PRESENCE DE SURFACE DIELECTRIQUE [69] 45

FIGURE 1.13. PROCESSUS ELEMENTAIRES CONTROLANT LA PROPAGATION DU STREAMER LE LONG DE LA SURFACE DE L'ISOLANT ET LES COEFFICIENTS D'IONISATION ET D'ATTACHEMENT DE L'AIR SEUL RESPECTIVEMENT A_0 ET H_0 ET CEUX EN PRESENCE D'UNE SURFACE EN PVC (A ET H) 46

FIGURE 1.14. INJECTION DE CHARGES PAR EFFET CHAMP A PARTIR DES ELECTRODES [72] 47

FIGURE 2.1. SCHEMA DE L'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL 51

FIGURE 2.2. SCHEMA DE LA CELLULE D'ESSAIS 52

FIGURE 2.3. SYSTEMES D'ELECTRODES UTILISES 52

FIGURE 2.4. CHOC DE FOUDRE NORMALISEE [91] 53

FIGURE 2.5. SCHEMA DU CIRCUIT DE REMPLISSAGE DE LA CELLULE 57

FIGURE 2.6. METHODE DE MONTEE ET DESCENTE (UP AND DOWN) 58

FIGURE 2.7. SYSTEME D'ELECTRODES POINTE - PLAN 59

FIGURE 2.8. FACTEUR D'UTILISATION POUR DIFFERENTES CONFIGURATIONS EN FONCTION DE P ET Q [95] 61

FIGURE 2.9. TENUE DIELECTRIQUE DE L'AIR SEC EN CHAMP QUASI-UNIFORME (SPHERE - PLAN) POUR DEUX DISTANCES INTER-ELECTRODES 5 ET 10 MM, SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE) 62

FIGURE 2.10. TENUE DIELECTRIQUE DU N_2 EN CHAMP QUASI-UNIFORME (SPHERE - PLAN) POUR DEUX DISTANCES INTER-ELECTRODES 5 ET 10 MM, SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE) 63

FIGURE 2.11. TENUE DIELECTRIQUE DU CO_2 EN CHAMP QUASI-UNIFORME (SPHERE - PLAN) POUR DEUX DISTANCES INTER-ELECTRODES 5 ET 10 MM, SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE) 63

FIGURE 2.12. TENUE DIELECTRIQUE DU SF_6 EN CHAMP QUASI-UNIFORME (SPHERE - PLAN) POUR DEUX DISTANCES INTER-ELECTRODES 5 ET 10 MM, SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE)..... 64

FIGURE 2.13. TENUE DIELECTRIQUE DES GAZ EN CHAMP NON UNIFORME (POINTE - PLAN) POUR UNE DISTANCE INTER-ELECTRODES DE 20 MM SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE) 65

FIGURE 2.14. INFLUENCE DE LA CHARGE D'ESPACE SUR LA DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE INTER-ELECTRODES EN POLARITE POSITIVE [96]..... 66

FIGURE 2.15. INFLUENCE DE LA CHARGE D'ESPACE SUR LA DISTRIBUTION DU CHAMP ELECTRIQUE INTER-ELECTRODES EN POLARITE NEGATIVE [96]..... 67

FIGURE 2.16. TENUE DIELECTRIQUE DES MELANGES DE GAZ EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SF_6, EN CHAMP NON UNIFORME (POINTE - PLAN) POUR UNE DISTANCE INTER-ELECTRODES DE 20 MM SOUS TENSION IMPULSIONNELLE (POLARITE POSITIVE ET NEGATIVE)..... 68

FIGURE 3.1. SCHEMA DE L'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL 72

FIGURE 3.2. SCHEMA DE LA CELLULE D'ESSAIS AVEC LA STRUCTURE ISOLANTE ET VUE REELLE DE LA CELLULE 73

FIGURE 3.3. REPARTITION DU NOMBRE DE DECHARGES PARTIELLES PAR PHASE OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION, SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 6 KV..... 77

FIGURE 3.4. REPRESENTATION DE LA MATRICE Φ Q N POUR UN ENREGISTREMENT DE 500 CYCLES DE TENSION OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION, SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 6 KV. LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE M = 0.3 NC..... 77

FIGURE 3.5. REPARTITION DU NOMBRE DE DECHARGES PARTIELLES PAR PHASE OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION, SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 8 KV..... 78

FIGURE 3.6. REPRESENTATION DE LA MATRICE Φ Q N POUR UN ENREGISTREMENT DE 500 CYCLES DE TENSION OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION, SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 8 KV. LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE M = 1.3 NC..... 78

FIGURE 3.7. REPARTITION DU NOMBRE DE DECHARGES PARTIELLES PAR PHASE OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 10 KV..... 79

FIGURE 3.8. REPRESENTATION DE LA MATRICE Φ Q N POUR UN ENREGISTREMENT DE 500 CYCLES DE TENSION OBTENUE AVEC UN ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.2 MPA DE PRESSION, SOUS TENSION ALTERNATIVE DE 10 KV. LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE M = 5 NC 79

FIGURE 3.9. EVOLUTION DE LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE DES DECHARGES PARTIELLES EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUEE OBTENUE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DES TROIS GAZ (N_2, CO_2 ET SF_6), SOUS DIFFERENTES PRESSIONS..... 81

FIGURE 3.10. EVOLUTION DE LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE DES DECHARGES PARTIELLES EN FONCTION DE L'AMPLITUDE ET DE LA POLARITE DE LA TENSION APPLIQUEE, OBTENUE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DES TROIS GAZ (N_2, CO_2 ET SF_6) SOUS UNE PRESSION DE 0.2 MPA 83

FIGURE 3.11. EVOLUTION DE LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE DES DECHARGES PARTIELLES EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUEE ET DU POURCENTAGE DE SF_6 DANS LE N_2, OBTENUE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR, SOUS UNE PRESSION DE 0.2 MPA 83

FIGURE 3.12. EVOLUTION DE LA CHARGE APPARENTE MAXIMALE DES DECHARGES PARTIELLES EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUEE ET DU POURCENTAGE DE SF_6 DANS LE CO_2, OBTENUE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR, SOUS UNE PRESSION DE 0.2 MPA 84

FIGURE 3.13. EVOLUTION DE LA CHARGE MAXIMALE DES DECHARGES PARTIELLES EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUEE OBTENUE POUR LES GAZ N_2, CO_2 ET SF_6 ET AVEC DES ECHANTILLONS SOLIDES EN VERRE DE 2, 4 ET 6 MM D'EPAISSEUR 85

FIGURE 3.14. EVOLUTION DE LA CHARGE MAXIMALE EN FONCTION DE LA TENSION APPLIQUEE OBTENUE AVEC DES ECHANTILLONS EN RESINE EPOXY DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DES GAZ N_2, SF_6 ET SF_6/N_2 87

FIGURE 4.1. SCHEMA DE L'ENSEMBLE DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL SOUS TENSION ALTERNATIVE ET DE LA STRUCTURE ISOLANTE 91

FIGURE 4.2. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA TENSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR: A) SF_6, B) CO_2 93

FIGURE 4.3. INFLUENCE DE LA PRESSION DU GAZ SUR LES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR: A) SF_6, B) CO_2 94

FIGURE 4.4. INFLUENCE DE LA TENEUR EN SF_6 SUR LES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE SF_6 - N_2/VERRE (E = 2 MM) 95

FIGURE 4.5. INFLUENCE DE LA TENEUR EN SF_6 SUR LES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE SF_6 - CO_2/VERRE (E = 2 MM) 95

FIGURE 4.6. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DE LA TENSION POUR DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LES GAZ N_2, CO_2 ET SF_6 A DIFFERENTES PRESSIONS, SOUS TENSION ALTERNATIVE 97

FIGURE 4.7. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SF_6 POUR DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LES MELANGES SF_6 - N_2 ET SF_6 - CO_2, SOUS TENSION ALTERNATIVE 98

FIGURE 4.8. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES POUR UNE INTERFACE SF_6/VERRE, SOUS TENSION ALTERNATIVE 99

FIGURE 4.9. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES POUR UNE INTERFACE CO_2/VERRE, SOUS TENSION ALTERNATIVE 99

FIGURE 4.10. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DU SOLIDE EN VERRE DANS LES GAZ: N_2, CO_2 ET SF_6, SOUS TENSIONS ALTERNATIVE 101

FIGURE 4.11. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA TENSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE N_2/RESINE EPOXY (E = 2 MM) 102
FIGURE 4.12. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE N_2/RESINE EPOXY (E = 2 MM) 102
FIGURE 4.13. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA TENSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE SF_6/BAKELITE (E =2 MM) 103
FIGURE 4.14. INFLUENCE DE LA PRESSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE AVEC UNE INTERFACE SF_6/BAKELITE (E =2 MM) 103
FIGURE 4.15. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DE LA TENSION POUR DES ECHANTILLONS EN RESINE EPOXY DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LES GAZ N_2, CO_2 ET SF_6 A DIFFERENTES PRESSIONS, SOUS TENSION ALTERNATIVE 105
FIGURE 4.16. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DE LA TENSION POUR DES ECHANTILLONS EN BAKELITE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LES GAZ N_2, CO_2 ET SF_6 A DIFFERENTES PRESSIONS, SOUS TENSION ALTERNATIVE 106
FIGURE 4.17. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SF_6 POUR DES ECHANTILLONS EN RESINE EPOXY DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LES MELANGES SF_6 - N_2 ET SF_6 - CO_2, SOUS TENSION ALTERNATIVE 107
FIGURE 4.18. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES POUR UNE INTERFACE N_2/RESINE EPOXY, SOUS TENSION ALTERNATIVE 107
FIGURE 4.19. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES POUR UNE INTERFACE SF_6/RESINE EPOXY, SOUS TENSION ALTERNATIVE 108
FIGURE 4.20. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES POUR UNE INTERFACE SF_6/BAKELITE, SOUS TENSION ALTERNATIVE 108
FIGURE 4.21. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE EN RESINE EPOXY DANS LE N_2, SOUS TENSIONS ALTERNATIVE 109
FIGURE 4.22. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE EN RESINE EPOXY DANS LE CO_2, SOUS TENSIONS ALTERNATIVE 109
FIGURE 4.23. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE EN RESINE EPOXY DANS LE SF_6, SOUS TENSIONS ALTERNATIVE 110
FIGURE 4.24. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE EN BAKELITE DANS LE SF_6, SOUS TENSIONS ALTERNATIVE 110
FIGURE 5.1. SCHEMA DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL 114
FIGURE 5.2. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA TENSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE POUR UN ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LE SF_6 (A), LE CO_2 (B) ET LE N_2 (C) 116
FIGURE 5.3. INFLUENCE DE L'AMPLITUDE DE LA TENSION SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN BAKELITE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LE SF_6 (A) ET LE CO_2 (B) 117

FIGURE 5.4. INFLUENCE DE PRESSION DU GAZ SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 (A), CO_2 (B) ET N_2 (C)..... 118

FIGURE 5.5. INFLUENCE DE PRESSION DU GAZ SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN BAKELITE DE 2 MM D'EPAISSEUR DANS LE SF_6..... 119

FIGURE 5.6. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DE LA TENSION EN PRESENCE DES GAZ N_2, CO_2 ET SF_6 SOUS DIFFERENTES PRESSIONS POUR LES DEUX MATERIAUX (E = 2 MM): VERRE ($\varepsilon_R = 5$) ET BAKELITE ($\varepsilon_R = 4.8$), SOUS TENSION CONTINUE 120

FIGURE 5.7. INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE SF_6 DANS LE MELANGE SF_6 - N_2 A 0.3 MPA SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM 121

FIGURE 5.8. INFLUENCE DE LA CONCENTRATION DE SF_6 DANS LE MELANGE SF_6 - CO_2 A 0.3 MPA, SUR LES DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR..... 122

FIGURE 5.9. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SF_6 DANS LE N_2 A 0.3 MPA, SOUS TENSION CONTINUE, POUR LES DEUX MATERIAUX (E = 2 MM): VERRE ET BAKELITE..... 123

FIGURE 5.10. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES EN FONCTION DU POURCENTAGE DE SF_6 DANS LE CO_2 A 0.3 MPA, SOUS TENSION CONTINUE, POUR LES DEUX MATERIAUX (E = 2 MM): VERRE ET BAKELITE..... 123

FIGURE 5.11. INFLUENCE DE L'EPAISSEUR DE L'ISOLANT SOLIDE SUR LES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC UN ECHANTILLON EN VERRE (A) ET EN BAKELITE (B) DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6, SOUS TENSION CONTINUE..... 124

FIGURE 5.12. VARIATION DE LA LONGUEUR FINALE DES DECHARGES GLISSANTES EN FONCTION DE L'EPAISSEUR DU SOLIDE DANS LE SF_6 A 0.3 MPA, SOUS TENSION CONTINUE, POUR LES DEUX MATERIAUX (E = 2 MM): VERRE ET BAKELITE 125

FIGURE 5. 13. SCHEMA ELECTRIQUE DESTINE A LA MESURE DU COURANT 126

FIGURE 5. 14. LES COURANTS ET CHARGES ASSOCIES AUX DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC DES ECHANTILLONS EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 A 0.3 MPA DE PRESSION POUR DIFFERENTE VALEURS DE TENSION 30, 34 ET 38 KV..... 127

FIGURE 5.15. PRINCIPE DE LA METHODE DE QUADRILLAGE APPLIQUEE A UNE DECHARGE SE PROPAGEANT SUR UN ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR : (A) IMAGE ORIGINALE, (B) IMAGE EN BINAIRE, (C) ET (D) IMAGES BINAIRES COUVERTES PAR UN MAILLAGE CARRE DE COTE L = 40 PIXELS ET L = 10 PIXELS RESPECTIVEMENT 130

FIGURE 5.16. IMAGES DE DECHARGES GLISSANTES SE PROPAGEANT SUR L'ECHANTILLON EN VERRE EN PRESENCE DE SF_6 A 0.3 MPA SOUS TENSION CONTINUE POUR DIFFERENTES EPAISSEUR: (A) IMAGE ORIGINALE (B) IMAGE EN BINAIRE CORRESPONDANTE..... 132

FIGURE 5.17. NOMBRE TOTAL DE BOITES N EN FONCTION DE LA TAILLE DU MAILLAGE L CALCULE A PARTIR DES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC L'ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE EN PRESENCE DE SF_6

A 0.3 MPA EN UTILISANT LA METHODE DE QUADRILLAGE: D ≈ 1.50, 1.47, 1.43 RESPECTIVEMENT POUR E = 2 MM, 5 MM, 10 MM 133

.FIGURE 5.18. NOMBRE TOTAL DE BOITES N EN FONCTION DE LA TAILLE DU MAILLAGE L CALCULE A PARTIR DES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC L'ECHANTILLON SOLIDE EN BAKELITE EN PRESENCE DE SF_6 A 0.3 MPA EN UTILISANT LA METHODE DE QUADRILLAGE: D ≈ 1.49, 1.43 RESPECTIVEMENT POUR E =2 MM, 10 MM 133

FIGURE 5.19. IMAGES DE DECHARGES GLISSANTES SE PROPAGEANT SUR L'ECHANTILLON EN VERRE DE 2 MM D'EPAISSEUR SOUS TENSION CONTINUE POUR DIFFERENTES PRESSIONS DE SF_6: (A) IMAGE ORIGINALE ET (B) IMAGE EN BINAIRE CORRESPONDANTE 135

FIGURE 5.20. NOMBRE TOTAL DE BOITES N EN FONCTION DE LA TAILLE DU MAILLAGE L CALCULE A PARTIR DES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC L'ECHANTILLON SOLIDE EN VERRE EN PRESENCE DE SF_6 EN UTILISANT LA METHODE DE QUADRILLAGE: D ≈ 1.58, 1.54, 1.47, RESPECTIVEMENT POUR P = 0.1 MPA, 0.2 MPA, 0.3 MPA 136

FIGURE 5.21. NOMBRE TOTAL DE BOITES N EN FONCTION DE LA TAILLE DU MAILLAGE L CALCULE A PARTIR DES DECHARGES GLISSANTES OBTENUES AVEC L'ECHANTILLON SOLIDE EN BAKELITE EN PRESENCE DE SF_6 EN UTILISANT LA METHODE DE QUADRILLAGE: D ≈ 1.56, 1.53, 1.44, RESPECTIVEMENT POUR P = 0.1MPA, 0.2 MPA, 0.3 MPA 136

Liste des tableaux

TABLEAU 1.1. LES CONSTANTES A ET B POUR DIFFERENTS GAZ; ET LES GAMMES DE E/P OU LA FORMULE EST VALIDE [22]..... 19

TABLEAU 1.2 . PROPRIETES DE QUELQUES GAZ ALTERNATIFS 36

TABLEAU 2.1. PRESSIONS PARTIELLES DU MELANGE SF_6 - N_2 OBTENUES PAR LA METHODE DES GAZ PARFAITS..... 55

TABLEAU 2.2. PRESSIONS PARTIELLES DES MELANGES SF_6 - N_2, SF_6 - CO_2 ET SF_6 - AIR SEC OBTENUES PAR LA METHODE DE DALTON 56

TABLEAU 2.3. COEFFICIENTS D'UTILISATION DU CHAMP ELECTRIQUE POUR LES CONFIGURATIONS SPHERE -PLAN ET POINTE - PLAN..... 61

TABLEAU 5.1. TENSION MOYENNE REQUISE POUR L'OBTENTION D'UNE DECHARGE DE 38 MM DE LONGUEUR FINALE POUR DIFFERENTES EPAISSEURS DU MATERIAU SOLIDE EN PRESENCE DE SF_6 A 0.3 MPA 129

TABLEAU 5.2. TENSION MOYENNE REQUISE POUR L'OBTENTION D'UNE DECHARGE DE 35 MM DE LONGUEUR FINALE SE PROPAGEANT SUR DES MATERIAUX SOLIDES DE 2 MM D'EPAISSEUR EN PRESENCE DE SF_6 SOUS DIFFERENTES PRESSIONS..... 129

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les systèmes d'isolation solide/gaz présents dans les équipements haute tension (traversées, isolateurs, postes blindés, lignes d'isolation de gaz, disjoncteurs ...) sont exposés à différents types de contraintes dont celles résultant de l'application de la tension et donc du champ électrique. Du point de vue de l'isolation électrique, le point de contact (jonction) des trois matériaux, solide/gaz isolant/métal (électrode), appelé point triple, constitue le point le plus faible de tout équipement moyenne ou haute tension. La distribution du champ électrique au voisinage de ce point de contact dépend des caractéristiques physiques du système et ses constituants (géométrie des électrodes et de l'isolateur, permittivités diélectriques …) ainsi que des conditions d'exploitation. Notons que des permittivités diélectriques, dépend le siège (zone) de renforcement du champ électrique : le champ est plus intense dans le milieu dont la permittivité est la plus faible (le gaz) [1][2]. Lorsque le champ électrique au niveau de ce point triple atteint une certaine valeur critique (champ de seuil d'initiation), des décharges partielles (DP) peuvent prendre naissance. Celles-ci peuvent évoluer en décharges glissantes à la surface de l'isolateur ou en arborescences dans le volume de l'isolateur ; la propagation des premières peut conduire au contournement du système d'isolation si la tension appliquée (et donc le champ électrique) augmente jusqu'à une valeur critique (tension de contournement - FOV) et celle des secondes au claquage (rupture diélectrique du solide isolant). Il en résulte une détérioration partielle ou totale du système d'isolation nécessitant la réparation des équipements, voire leur remplacement.

Pour éviter de telles situations, dommageables pour les équipements haute tension, on se doit de bien concevoir le système d'isolation et de bien choisir les matériaux isolants constituants, vis-à-vis des contraintes auxquelles ceux-ci sont confrontés en service. Ainsi, la compréhension des conditions d'initiation et de développement de ces décharges et la connaissance des paramètres (électriques et optiques) caractérisant ces décharges et leurs évolutions en fonction des propriétés physiques et géométriques du solide, du type de gaz et de sa pression, de la géométrie des électrodes et de la tension appliquée (forme, polarité et amplitude), sont d'une très grande importance pour la conception et le dimensionnement des composants et systèmes haute tension.

Dans ce travail, nous nous intéressons plus particulièrement aux décharges partielles et glissantes se propageant aux interfaces solide/gaz sous tensions continue et alternative, en géométrie pointe - plan.

Le gaz majoritairement utilisé dans l'industrie électrique est l'hexafluorure de soufre (SF_6). Ce gaz présente une rigidité diélectrique relativement élevée et une bonne conductivité thermique. Il est chimiquement inerte et non toxique. Et après avoir été dissocié suite à un arc électrique, il se recombine rapidement et presque totalement. Il est aussi non inflammable et son prix est modéré. Toutes ces propriétés font de lui un gaz de premier plan pour les applications industrielles (disjoncteurs, commutateurs, transformateurs haute tension; sous-stations de distribution et lignes de transmission…). Malheureusement, il présente un inconvénient majeur qui est celui de son impact sur l'environnement : il contribue à l'effet de serre lorsqu'il est relâché dans l'atmosphère. Son potentiel de réchauffement global GWP (Global Warming Potential) sur une période de 100 ans est estimé à 23900 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone [3][4][5] et sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 3200 ans. Même si sa présence est faible, il a été visé par les organisations internationales pour la protection contre le réchauffement climatique (sommet de KYOTO tenu en 1997 sur le changement climatique). Ainsi, les recommandations internationales et européennes tendent à restreindre très fortement, voir interdire, son utilisation pour préserver l'environnement.

L'objectif de cette thèse est de comparer dans une première étape les propriétés diélectriques (tensions de claquage) de trois gaz (à savoir le CO_2, l'N_2 et le SF_6) et leurs mélanges (SF_6 - CO_2 et SF_6 - N_2) sous tension impulsionnelle en champ divergent (sphère - plan et pointe - plan) et dans une deuxième étape d'analyser les caractéristiques électriques et optiques des décharges glissantes se propageant aux interfaces solide/gaz sous tensions continue et alternative, en géométrie pointe - plan. Une étude portant sur la caractérisation des décharges partielles sous tension alternative est également menée.

Le présent manuscrit comporte cinq chapitres. Le premier chapitre traite brièvement les mécanismes physiques des décharges dans les gaz. Une partie de ce chapitre est consacrée aux propriétés et aux moyens de mesure des décharges partielles. Ce chapitre se termine par une présentation des phénomènes de décharges aux interfaces solide/gaz et des différents modèles décrivant leur forme et leur propagation.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons d'abord le dispositif et les procédures expérimentaux utilisés pour la mesure de la tension de claquage des gaz considérés, sous tension impulsionnelle de foudre 1.2/50 μs. Nous présentons par la suite les différents paramètres susceptibles d'influencer la tenue diélectrique.

Le troisième chapitre est consacré à la mesure des décharges partielles (DP) en tension alternative, pour différents types de gaz et solide, et à l'analyse de leur activité. Nous analyserons plus particulièrement le nombre, l'amplitude et la distribution des impulsions de décharges partielles en fonction de la phase de la tension appliquée. Une importance plus particulière est portée à la mesure de la charge apparente.

Au chapitre quatre, nous étudions les décharges glissantes sous tension alternative. Nous décrivons le dispositif expérimental ainsi que les caractéristiques des matériaux diélectriques faisant l'objet de nos investigations. Nous présentons les différentes figures de décharges glissantes observées ainsi que l'évolution de leur longueur finale (ou d'arrêt, c'est-à-dire l'extension maximale) en fonction de différents paramètres (nature du matériau isolant solide, épaisseur et constante diélectrique de l'isolateur, type de gaz/mélange et pression, tension).

Le dernier chapitre est dédié à la caractérisation expérimentale des décharges glissantes sous tension continue. Nous comparons ces caractéristiques à celles observées sous tension alternative. Le courant et la charge associés aux décharges surfaciques sont étudiés en fonction de l'amplitude de la tension appliquée. Nous terminons ce chapitre par une analyse fractale des décharges glissantes et plus particulièrement l'évolution de la dimension fractale de ces décharges en fonction de la pression des gaz/mélanges et des propriétés géométriques et physiques du matériau solide.

1

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE: CLAQUAGE DANS LES GAZ, DECHARGES PARTIELLES ET PHENOMENES DE DECHARGES AUX INTERFACES SOLIDE/GAZ

1. Introduction

La compréhension des phénomènes de décharges surfaciques se développant aux interfaces solide/gaz est d'une importance capitale pour la conception et le dimensionnement des équipements haute tension. Aussi, les mécanismes physiques impliqués dans le développement de ces décharges sont beaucoup plus complexes que ceux des décharges dans les gaz, ce qui expliquerait le manque de critères analytiques et/ou empiriques fiables, capables de prédire l'apparition et la propagation des décharges le long d'une surface diélectrique solide. Autant la littérature sur les phénomènes impliqués dans la rupture diélectrique des gaz et solides diélectriques, leurs interprétations et leurs modélisations est abondante [6][7][8][9][10][11][12][13][14], autant celle relative aux phénomènes d'interface reste pauvre. Il existe peu de travaux sur cette problématique et le nombre de publications sur le sujet est très réduit.

Dans ce chapitre, nous rappelons d'abord les points essentiels et interprétations des phénomènes de décharges dans les gaz ; puis nous présentons le phénomène de décharges partielles ainsi que les méthodes et techniques de leurs mesures et finirons par une description du comportement des décharges glissantes.

2. Claquage diélectrique dans un gaz

Théoriquement un gaz est un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. L'initiation du mécanisme d'ionisation est conditionnée par la présence dans le gaz de quelques particules chargées dites particules germes, généralement des électrons. Les électrons germes peuvent être fournis par :

- Rayonnements cosmiques ou radioactivité naturelle : la densité des électrons sont relativement faible ; dans l'air à la pression atmosphérique 7 à 20 électrons par cm^3/sec sont produits d'après Schonland [15].
- Contribution de la cathode : l'émission d'électrons par effet de champ à partir d'une cathode froide présentant une surface propre apparait pour des champs électriques locaux très élevés.

- Détachement collisionnel à partir des ions négatifs : Il constitue le processus principal de production d'électrons à partir d'ions négatifs. Ces derniers pré-existent dans l'espace inter-électrodes: c'est le cas de l'ion négatif prépondérant SF_6^- [16] [17] avec le SF_6 pur. En présence d'impuretés telles que O_2 ou H_2O, les pourvoyeurs principaux en électrons germes seront plutôt les ions négatifs $O_2^-(H_2O)_n$ ou $H_2O^-(H_2O)_n$ liés aux impuretés [18][19][20].

2.1. L'avalanche électronique

Un électron libre, placé dans un champ électrique uniforme ($E = U/d$ où U est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes planes distantes de d (Figure 1.1)) est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique par l'action de la force électrostatique $\vec{F} = q\vec{E}$ (q étant la charge de l'électron). Il parvient ainsi à gagner une énergie suffisante pour ioniser par collisions des particules neutres, donnant naissance à des ions positifs et à de nouveaux électrons. Ce phénomène est caractérisé par un coefficient α appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Ce coefficient représente le nombre de paires électron-ions produites par centimètre de parcours d'un électron dans la direction du champ électrique. Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode, à la création d'une avalanche électronique qui peut conduire, sous certaines conditions au claquage du gaz.

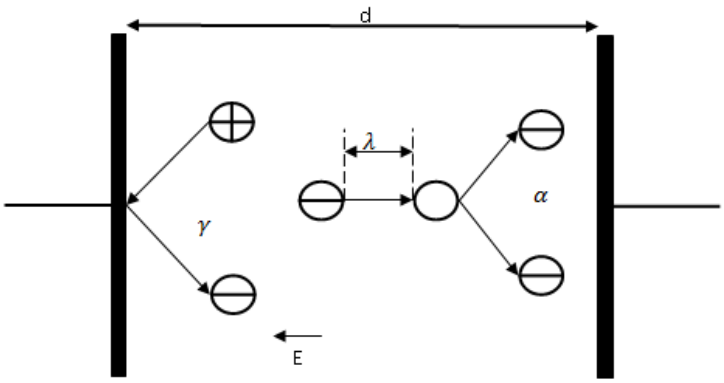


Figure 1.1. *Processus d'émission et d'ionisation dans une décharge électrique*

2.2. Théorie de Townsend

2.2.1. Mécanismes de claquage

Les ions positifs produits dans l'espace inter-électrodes lors de l'avalanche électronique dérivent vers la cathode. Si ces ions ont une énergie suffisante, ils peuvent arracher des électrons par bombardement de la cathode lesquels viendront renforcer l'avalanche. On définit le coefficient γ appelé coefficient d'émission secondaire ou second coefficient de Townsend qui représente le rapport entre le nombre d'électrons libérés à partir de la cathode et le nombre d'ions positifs qui tombent sur la cathode. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz employé. Lorsque l'intensité du champ électrique est suffisante, ce phénomène devient important. L'avalanche s'auto entretient et le claquage se produit même si la tension n'est plus appliquée.

2.2.2. Critère de claquage de type Townsend

Le courant I obtenu dans une configuration de champ uniforme pour une distance-inter électrodes d est donné par [21]:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{\frac{\alpha}{\alpha-\eta}\exp(\alpha-\eta)d - \frac{\eta}{\alpha-\eta}}{1-\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta}\left[\exp(\alpha-\eta)d-1\right]} \tag{1.1}$$

Où d est la distance inter-électrodes, I_0 le courant initial émis par la cathode sous l'effet du rayonnement extérieur, α le coefficient d'ionisation, γ le coefficient d'émissions secondaires et η le coefficient d'attachement. Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à capturer des électrons (gaz dits électronégatifs).

Le critère de claquage selon le mécanisme de Townsend est donné par:

$$\frac{\alpha\gamma}{\alpha-\eta}\left[\exp(\alpha-\eta)d-1\right]=1 \tag{1.2}$$

Pour un champ uniforme et pour un gaz non électronégatif ($\eta = 0$), le critère de claquage se réduit à:

$$\gamma[\exp \alpha d - 1] = 1 \tag{1.3}$$

En champ non uniforme la relation (1.2) doit être modifiée pour tenir compte du fait que le coefficient d'ionisation dépend de la position ; on aura :

$$\gamma \int_0^d \exp\left[\int_{\grave{a}}^{x} (\alpha - \eta) dx\right] \alpha dx = 1 \tag{1.4}$$

2.3. Loi de Paschen

Le mécanisme proposé par Townsend permet d'expliquer de manière théorique la loi empirique de Paschen décrivant la tension nécessaire à l'apparition d'une décharge disruptive en fonction du produit *pd* de la pression *p* et de la distance *d* inter-électrodes.

Le premier coefficient de Townsend α qui décrit le processus d'avalanche caractérisé par les ionisations successives et la création d'électrons dépend de l'intensité du champ électrique *E*. L'état du gaz étant déterminé par sa pression et sa température qui restent pratiquement constantes lors de l'ionisation par les électrons, le transfert d'énergie vers le gaz étant trop faible. Comme la densité du gaz est proportionnelle à la pression *p*, α ne dépendra finalement que de *E* et *p*. En s'appuyant sur une distribution maxwellienne des vitesses électroniques et en tenant compte de la variation de probabilité de collision élastique électrons-molécules avec l'énergie des électrons, l'expression de α peut se mettre sous la forme:

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(-\frac{B}{E/p}\right) \tag{1.5}$$

Avec:

p : pression exprimée en Torr ;

A et *B* : deux constantes exprimées respectivement en [$Torr^{-1}.cm^{-1}$] et [$V.Torr^{-1}.cm^{-1}$] ;

E/p : le champ réduit exprimé en [$V.Torr^{-1}.cm^{-1}$].

Les valeurs *A* et *B* sont déterminées expérimentalement pour chaque gaz (Tableau 1.1) et elles sont considérées constantes sur un domaine de champ réduit *E/p*.

Gaz	*A* (Torr $^{-1}$.cm^{-1})	*B* (V. Torr $^{-1}$.cm^{-1})	Domaine de validité *E/p* (V. Torr $^{-1}$.cm^{-1})
H_2	5	130	150 – 600
N_2	12	342	100 – 600
CO_2	20	466	500 – 1000
Air	15	365	100 – 800
H_2O	13	290	150 – 1000
HCl	25	380	200 – 1000
He	3	34	20 – 150
Ne	4	100	100 – 400
Ar	14	180	100 – 600
Kr	17	240	100 – 1000
Xe	26	350	200 – 800
Hg	20	370	200 – 600

Tableau 1.1. *Les constantes A et B pour différents gaz; et les gammes de E/p où la formule est valide* [22]

A partir de l'équation (1.5), on aura:

$$\alpha d = \ln\left(1+\frac{1}{\gamma}\right) \tag{1.6}$$

En champ uniforme:

$$E = \frac{U}{d} \tag{1.7}$$

Les équations (1.5), (1.6) et (1.7) nous donnent la relation entre la tension de claquage U_c et le produit *pd*:

$$U_c = \frac{Bpd}{\ln\left(\dfrac{Apd}{\ln\left(1+\left(1/\gamma\right)\right)}\right)} \tag{1.8}$$

Si le champ électrique n'est pas perturbé par des charges d'espace, la tension de claquage dépendra uniquement du produit *(pd)* :

$$U_c = f(pd) \tag{1.9}$$

Cette variation est connue sous le nom de la loi de Paschen. Elle est valable pour une température constante et est présentée par des courbes dites de Paschen déterminées expérimentalement. La Figure 1.2 montre les courbes de Paschen pour les gaz N_2, *He*, H_2, *Ne*, Air et *Ar*.

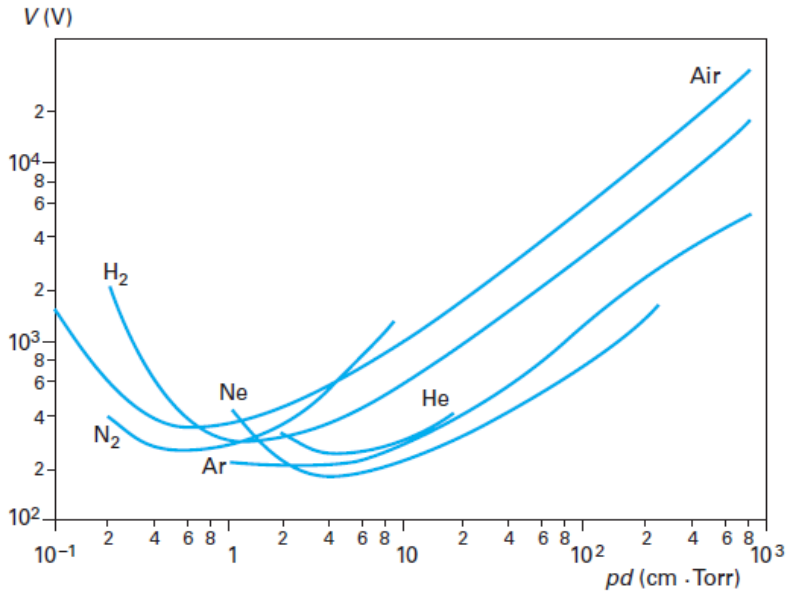


Figure 1.2. *Courbe de Paschen pour différents gaz* [23]

2.3.1. Limites du mécanisme de Townsend

Dans le cas des distances inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, le modèle de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurés (10^{-9} à 10^{-7} s) [24]. Ces temps étant beaucoup plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode conditionnant le passage des décharges non autonomes en autonomes (10^{-5} à10^{-4} s). Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension disruptive ne dépende pas du type de matériau composant la cathode. Par conséquent, l'émission d'électrons par bombardement des ions positifs, qui est conditionnée par la valeur du second coefficient de Townsend, n'est pas un mécanisme essentiel dans ce type de décharge [25][26].

2.4. Théorie du streamer

Loeb et Meek ont émis l'hypothèse que d'autres processus physiques sont à l'œuvre dans les décharges dans les gaz pour des valeurs élevées de *pd* [27]. Ainsi, ils ont proposé un nouveau modèle permettant d'expliquer les observations précédentes. Celui-ci est basé sur la formation d'électrons secondaires au sein du gaz et la constitution d'une charge d'espace importante : la théorie des streamers.

2.4.1. Mécanismes de claquage

Le claquage dans la théorie des « streamers » résulte d'une superposition de trois phénomènes:

- L'ionisation telle qu'elle est décrite dans la théorie de Townsend.
- Les effets de charge d'espace.
- La photoionisation dans le gaz qui entraîne la production d'électrons germes à l'avant du front de l'onde d'ionisation, assurant ainsi sa propagation.

L'avalanche dite primaire prend naissance en un point quelconque de l'intervalle inter-électrodes pour une valeur critique du champ électrique. Cette avalanche est accompagnée de la création d'une charge d'espace. En effet, dans une avalanche, les électrons forment un nuage négatif qui progresse rapidement vers l'anode alors que de l'autre côté, les ions positifs restent pratiquement immobiles en raison de leur mobilité trop faible par rapport à celle des électrons ; la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions. Le champ devient alors non homogène et plus intense près des pôles de l'avalanche et surtout au voisinage du pôle positif (constitué par les ions positifs) qui joue le rôle d'une pointe conductrice. Quant au champ sur les flancs de l'avalanche, il diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ 10^8 électrons), elle contribue à intensifier les collisions ionisantes sur le front et la queue de l'avalanche.

Dans l'avalanche, les électrons et les ions se recombinent en partie. L'énergie rayonnée peut provoquer la photo ionisation des particules de gaz se trouvant à l'intérieur et à l'extérieur de l'avalanche. Les électrons nouvellement créés peuvent, si le champ local est suffisamment intense, conduire par chocs ionisants, à la naissance de nouvelles avalanches, dites secondaires qui à leurs tours créeront une charge d'espace positive en avant de la première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien de la décharge (qui devient autonome) et d'amplification du nombre de porteurs de charges libres.

Chaque avalanche continue à se développer pour son propre compte et de façon très rapide. La première n'a pas fini de croître que déjà toute une chaîne se crée. Alors que les électrons se déplacent vers l'anode, la chaîne semble progresser vers la cathode. La progression de cette chaîne est très rapide du fait que les avalanches se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. L'ionisation se fait donc

sans intervention de la cathode. La décharge prend alors la forme d'un canal dans la direction de l'axe des électrodes ; son développement dépend de la répartition du champ.

D'autre part, lors de collisions élastiques avec les particules de gaz, les charges leur transmettent une partie de leurs énergies cinétiques. Il en résulte une augmentation de la température du gaz. Tant que celle-ci est inférieure à celle nécessaire à l'ionisation thermique, elle n'aura aucune influence sur le développement de la décharge. Ce stade de la décharge est appelé streamer.

Le champ extérieur nécessaire à l'entretien du streamer est inférieur à celui conditionnant l'ionisation par collisions. Pour l'air par exemple, le champ moyen du streamer se développant à partir de l'anode est d'environ 5 kV/cm et de 15 kV/cm lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ 30 kV/cm (dans les conditions normales de pression et de température).

Dans certaines conditions à savoir le cas d'intervalles inter-électrodes importants (> *1m* pour l'air à pression atmosphérique) 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.

2.4.2. Critère de claquage

Plusieurs critères ont été proposés pour caractériser le claquage selon le mécanisme du Streamer.

Meek [7] a proposé l'équation suivante pour la rupture d'un intervalle en champ non uniforme:

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = KE_x\left(\frac{x}{\rho}\right) \qquad (1.10)$$

Avec :

Indice x : position du front de l'avalanche ;

α : coefficient d'ionisation ;

x : longueur critique de l'avalanche ;

K : constante caractéristique du gaz ;

E : le champ électrique ;

ρ : la masse volumique du gaz.

Raether [28] a proposé une relation semblable:

$$\int_0^x \alpha \, dx = k \tag{1.11}$$

Où k est une constante du gaz. $k_{air\ atmosphérique} \approx 20$.

Pour l'air, Pedersen [29] a proposé un critère de claquage identique à celui de Raether. Pour un champ non uniforme, ce critère s'écrit sous la forme :

$$\alpha_x \exp\left[\int_0^x \alpha dx\right] = G(x,\rho) \tag{1.12}$$

Où $G(x,\rho)$ est une fonction de la longueur critique de l'avalanche et de la masse volumique du gaz. Pour les gaz électronégatifs :

$$(\alpha_x - \eta_x).\exp.\left[\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] = G(x,\rho) \tag{1.13}$$

α_x et η_x sont les valeurs de α et η à x ; $G(x,\rho)$ est une fonction empirique qui peut être déterminée à partir des résultats obtenus en champ uniforme. Juste avant le claquage $(\alpha_x/E) >> (\eta_x/E)$.

Le critère donné par l'équation précédente peut être écrit sous la forme :

$$\alpha_x \exp\left[2\int_0^x (\alpha - \eta) dx\right] = F(x,\rho) \tag{1.14}$$

Ou encore :

$$(\alpha_x / 2) + \int_0^x (\alpha - \eta) dx = f(x,\rho) \tag{1.15}$$

Expérimentalement, $F(x,\rho)$ ne dépend pas beaucoup de x et de ρ dans un champ uniforme; $lnF(x,\rho)$ est pratiquement constant. Ainsi, on aura:

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = k \tag{1.16}$$

Pour le SF_6:

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 18 \tag{1.17}$$

On conclut que le modèle du Streamer est important d'un point de vue quantitatif car il permet de connaître la probabilité conditionnant le mécanisme de décharges pour les grandes valeurs du produit *(pd)*. Malheureusement, à cause du grand nombre de phénomènes qui interviennent, l'obtention de résultats qualitatifs sur la base de ce mécanisme n'est pas une tâche évidente.

3. Facteurs influençant la tenue diélectrique des gaz

La tenue diélectrique des gaz utilisés dans l'appareillage électrique dépend de plusieurs paramètres comme la pression, la température, l'humidité et les impuretés. Elle dépend également de la distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes. Contrairement au cas d'un champ uniforme, une propagation de la décharge en champ électrique fortement divergent par un mécanisme de type streamer ou leader peut se manifester même en l'absence de toute surtension. Dans les gaz faiblement électronégatifs comme l'air, le champ de propagation du streamer étant bien inférieur au champ critique du gaz [30] ; la tension de claquage sera inférieure à la tension de Paschen. Par contre, dans les gaz très électronégatifs comme le SF_6, le champ requis pour la propagation du streamer est pratiquement égal au champ critique. L'abaissement de la tension de claquage par rapport au minimum de Paschen est alors la conséquence de la formation d'un canal de leader [30].

3.1. Les électrodes

3.1.1. La géométrie des électrodes

La géométrie des électrodes joue un très grand rôle sur la rigidité diélectrique d'un gaz. Elle définit la répartition du champ électrique inter-électrodes.

Champ électrique *E* uniforme : En tout point de l'espace inter-électrodes E reste constant. Une géométrie des électrodes engendrant un champ parfaitement uniforme n'est jamais réalisée en pratique. Pourtant, il est possible de choisir des formes d'électrodes telles que le champ électrique ne présente pas une variation importante. Pour caractériser l'importance de cette inhomogénéité, on introduit une grandeur appelée facteur d'utilisation du champ η, définie comme étant le rapport entre le champ moyen dans l'espace inter-électrodes et le champ maximal (c'est-à-dire le champ au niveau de l'électrode de plus faible rayon de courbure). Si E_{max} est la valeur maximale du champ dans l'intervalle, le facteur d'utilisation du champ η est égal à :

$$\eta = \frac{E_{moy}}{E_{\max}} = \frac{U/d}{E_{\max}} \qquad (1.18)$$

Pour des configurations dites champ uniforme caractérisées par η proche de 1. Les claquages seront produits par des mécanismes de type Townsend (et/ou streamer pour le SF_6) ; on dit que le claquage est direct.

Champ électrique *E* non uniforme : Lorsque le facteur d'utilisation du champ est très petit, (géométries pointe/plan, fil/cylindre, etc.), le champ électrique au niveau de l'électrode de faible rayon est très important. Le claquage peut intervenir soit par streamer soit par leader, selon le type de gaz testé et sa pression [31].

3.1.2. Le matériau des électrodes (en particulier la cathode)

Pour de grandes pressions et à des champs électriques divergents, le matériau de l'électrode (surtout celui de la cathode) peut influencer la tension d'apparition des décharges. Le matériau de la cathode (métal) est caractérisé par le travail de sortie qui montre la capacité à émettre et diffuser des électrons dans l'espace inter-électrodes. Lorsqu'on applique un

champ électrique intense à la surface métallique, la barrière de potentiel séparant les électrons du milieu gazeux est abaissée, et le travail d'extraction des électrons est diminué.

3.1.3. L'état de surface des électrodes

Les protubérances présentes sur les surfaces des électrodes génèrent des champs électriques locaux nettement supérieurs au champ appliqué sans défaut. Hawley [32] définit la valeur du facteur multiplicatif du champ β:

$$\beta = \frac{2h}{\omega} \tag{1.19}$$

h et ω sont respectivement la hauteur et 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. 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 SF_6, la tension de claquage suivra la courbe de Paschen tant que le produit $p.R_{max}$ sera inférieur à 40 bar. µm [33][34]. Dans le cas de l'air, un gaz faiblement électronégatif, l'effet des rugosités se fera sentir pour des valeurs de $p.R_{max}$ plus élevées.

3.2. Particules métalliques

Lors de la fabrication ou pendant le contrôle des systèmes électriques à isolation gazeuse, des particules métalliques ou isolantes peuvent être introduites dans le système. La tension de claquage n'est pas modifiée par la présence de particules isolantes, même de dimension relativement élevée. Par contre, des particules métalliques, même de dimension réduite, peuvent abaisser la tension disruptive du gaz. Cette influence est en fonction de leur position, de leur taille, de la forme de la tension appliquée et de la nature du gaz.

Cookson [35] a montré que les effets disruptifs, dans la géométrie coaxiale, dus à la présence des particules, augmentent avec leur longueur, leur densité, et diminuent avec leur diamètre.

En outre, l'influence de la présence des particules est plus importante en tension continue qu'en tension alternative. Pour les deux types de tension, on observe des oscillations des particules entre les deux électrodes (HT et masse), mais la probabilité qu'elles touchent une des électrodes est plus grande en continu qu'en alternatif. En effet, en tension alternative, le temps de transit des particules libres (proportionnel au rapport entre leur charge électrique et leur masse [36]) est le plus souvent supérieur à la durée de l'alternance et les particules n'atteignent pas l'électrode opposée [37]. Sous ondes de choc, les particules disposent encore de moins de temps pour atteindre les électrodes. Par conséquence la tension de claquage ne devrait pas être modifiée d'une façon aussi importante par leur présence comme en tension continue ou alternative.

La présence des particules métalliques libres dans le SF_6 est particulièrement catastrophique surtout lorsque la tension appliquée reste constante. Cette grande sensibilité est due à la variation rapide du coefficient d'ionisation suite au renforcement du champ électrique au niveau des particules. Cette sensibilité est plus faible pour les mélanges SF_6 - N_2 que pour le SF_6 pur soit en tension alternative qu'en continue [37].

Parmi les solutions qui ont été proposées pour diminuer l'influence des particules conductrices, on peut citer :

- La solution traditionnelle qui consiste à créer à l'intérieur du système des régions de faible champ électrique où les particules venant des régions de champ élevé seront piégées [36][38].

- Une autre approche a été proposée par Bortnik [39] pour réduire ce problème basée sur le principe de limiter ou de retarder le déplacement des particules métalliques par la création d'une surface collante à l'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.

- Une autre solution qui consiste à enrober les particules conductrices d'une gaine isolante en remplissant le système fermé par un gaz approprié et en créant une décharges dans ce gaz [40].

3.3. Influence de la pression du gaz

En champ non uniforme, l'augmentation de la pression du gaz s'accompagne en général d'une augmentation de la tension d'apparition de l'effet couronne et de la tension de claquage. Une exception importante à cette règle se manifeste avec les gaz électronégatifs. Pour ces gaz, la tension de claquage passe d'abord par un maximum, puis décroît jusqu'à une certaine valeur critique de la pression pour laquelle elle devient égale à la tension d'apparition de l'effet couronne. Au-dessus de cette pression critique, la tension croît à nouveau et le claquage se produit directement sans l'apparition préalable de l'effet couronne.

3.4. Influence des impuretés du gaz

L'influence des impuretés, principalement l'humidité (la vapeur d'eau) sur la tension de claquage des gaz dépend fortement de la géométrie des électrodes (distribution du champ électrique), de la nature et de la pression des gaz.

Dans l'air, l'influence de l'humidité sur la rigidité diélectrique est faible. Pour des valeurs d'humidité relative inférieures à 80%, la tension de claquage augmente un peu avec l'accroissement de l'humidité. La présence des molécules d'eau, plus denses que le gaz, freine le phénomène d'avalanche à l'origine du claquage. Pour le SF_6, l'humidité favorise le mécanisme de leader et surtout elle joue un rôle important sur la nature des sous-produits de décomposition du SF_6. Sous tension alternative, elle privilégie l'apparition de couronne stabilisée.

4. Utilisation du SF_6 dans l'industrie électrique

Outre l'air atmosphérique, l'hexafluorure de soufre (SF_6) est l'un des gaz les plus utilisés dans l'industrie électrique (80% environ). Sa grande qualité d'isolation (bonne tenue diélectrique), son aptitude à ne pas entretenir l'arc électrique et son excellente stabilité chimique et thermique font de lui (SF_6) un gaz préféré de l'industrie d'énergie électrique pour les équipements d'isolation et d'extinction d'arc électrique utilisés dans la transmission et la distribution de l'énergie électrique. Généralement, il y a quatre types principaux d'appareillage électrique qui utilisent le SF_6 pour des buts d'isolation et/ou d'interruption :

- ***Disjoncteurs et équipements d'interruption de courant*** : la bonne conductivité thermique et la tenue diélectrique élevée de SF_6 sont les principales raisons de sa grande capacité d'interruption.
- ***Transformateurs*** : la capacité de refroidissement du SF_6, la compatibilité avec les matériaux solides et les caractéristiques des décharges partielles qui apparaissent dans ce gaz ; ajouter à ça, ses bonnes caractéristiques diélectriques font de ce gaz un bon candidat dans ce type d'appareillage électrique. L'utilisation d'une isolation à base du SF_6 a des avantages par rapport à l'isolation à l'huile à savoir : réduire les risques d'incendie et les problèmes écologiques liés à l'utilisation de l'huile, avoir une fiabilité meilleure, peu d'entretien, une longue durée de vie, moins de bruit, une meilleur manipulation et avoir un équipement plus léger.
- ***Les lignes de transmission (les câbles à isolation gazeuse)*** : la rigidité diélectrique du milieu gazeux dans des conditions industrielles est d'une importance primordiale, particulièrement avec la présence des particules métalliques sous des tensions de choc de foudre et de manœuvre. Le gaz doit également être un bon conducteur thermique pour permettre le transfert de la chaleur et être stable pendant de longues périodes (environ 40 ans). Les lignes de transmission isolées en SF_6 présentent plusieurs avantages: la rentabilité, les pertes sont faibles, la disponibilité à une grande gamme de tension, aucun risque d'incendie, la fiabilité, et elles sont une alternative concrète à la transmission aérienne de la haute tension.
- ***Sous-stations de distribution*** : Les différents éléments constituant la sous-station (disjoncteurs, sectionneurs, commutateurs de mise à la terre, jeux de barre, transformateurs, etc.) sont reliés ensemble et isolés avec le milieu diélectrique gazeux. Ainsi, toutes les propriétés mentionnées ci-dessus du gaz SF_6 sont significatives ; elles permettent de réduire considérablement la taille de la station.

5. SF_6 est un gaz à effet de serre

Dans les dix dernières années, la production du SF_6 a connu une forte croissance et pourrait atteindre les 15000 tonnes à l'horizon 2015 si ce rythme n'est pas modifié. Avec son utilisation croissante, l'émission annuelle du SF_6 dans l'atmosphère a fortement augmenté depuis les années 1960 (Figure 1.3) [41].

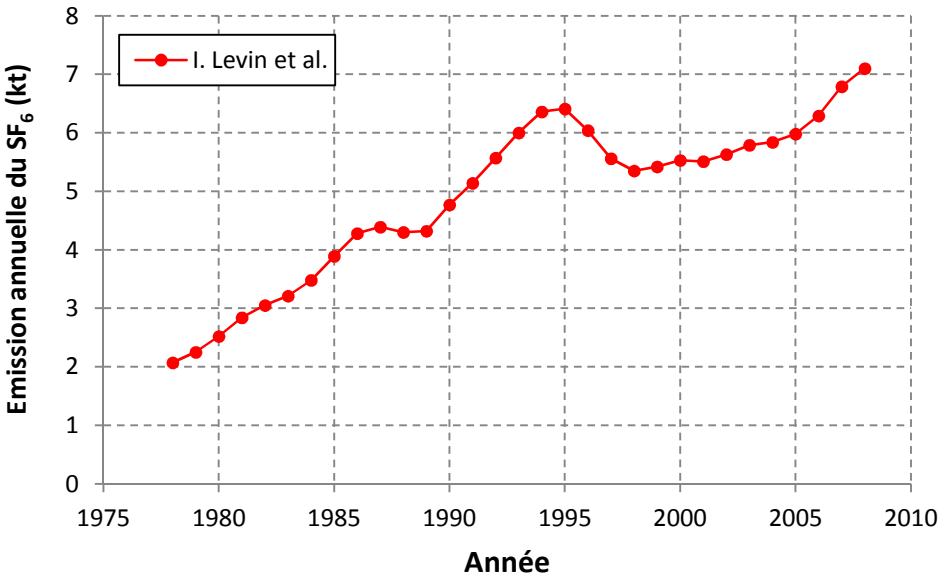


Figure 1.3. *Emission annuelle du SF_6* [41]

Cependant, malgré les bonnes performances (pouvoir de coupure élevé, bonne tenue diélectrique, stabilité thermique…) de cette molécule, elle présente malheureusement un gros inconvénient ; sa durée de vie dans l'atmosphère qui est estimé à 3200 ans [3]. Avec une telle durée de vie, le potentiel de réchauffement global (GWP) du SF_6 sur une période de cent ans calculé par la méthode établie en 1996 par l'IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [4] est ainsi 23900 fois plus élevé que celui du dioxyde de carbone (CO_2) [3] (Ce qui veut dire qu'un kilogramme de SF_6 a le même impact sur le réchauffement climatique que celui de 23900 kg de CO2). Par conséquent, ce gaz est considéré comme un agent aggravant de l'effet de serre. Il a été accusé par les organisations internationales pour la protection de l'environnement comme étant l'un des responsables du réchauffement climatique (sommet de KYOTO tenu en 1997 sur le changement climatique). Aussi, les recommandations internationales et européennes tendent à restreindre très fortement, voir interdire, son utilisation pour préserver l'environnement.

6. Quelques moyens de réduction de l'émission de SF_6

En ce qui concerne l'aspect environnemental, certains experts pensent que le meilleur moyen lorsqu'on utilise le SF_6 pur, c'est de réduire voire supprimer ses émissions dans l'atmosphère [42]. Pour l'industrie électrique, quelques solutions ont été mises en place afin de réduire l'émission de SF_6.

6.1. Réduction des fuites de SF_6

Les tests d'étanchéité lors de la fabrication d'équipements électriques génèrent la plus grande quantité de SF_6 rejetée. Ces tests sont actuellement réalisés avec du SF_6, ce qui génère de la pollution lors de la réparation ou de la destruction. Afin de remédier à ce problème, une méthodologie basée sur l'utilisation d'un gaz autre que le SF_6 en cours des tests d'étanchéité, qui n'est pas un gaz à effet de serre a vu le jour. Pour le choix du gaz de substitution, plusieurs options étaient possibles : azote ou hélium.
L'utilisation de la solution tests d'étanchéité à l'hélium par exemple présente plusieurs avantages :

- Arrêt des émissions de SF_6 lors de la réparation ou de la destruction des équipements non étanches.
- Augmenter la fiabilité du test. L'hélium étant une molécule plus petite, ce système permet de détecter des fuites très faibles, donc :
  - Une plus grande qualité des équipements électriques (disjoncteurs) en sortie.
  - Une diminution des fuites durant le service.

6.2. Récupération et recyclage du SF_6

Pour la récupération et le recyclage du SF_6, des normes ont été adoptées (norme CEI61634 [43], guide de la Cigré [44]). Elles expliquent les procédures et les précautions à prendre lors de la récupération et du recyclage du SF_6 en minimisant au maximum les risques de fuite dans l'atmosphère et permettant aux opérateurs d'intervenir avec un minimum de risques. Ces normes indiquent également la pureté du SF_6 réutilisable. Ce dernier sera réutilisable si la quantité des sous-produits après traitement reste inférieure à un seuil autorisé et fixé par des organisations internationales.

6.3. Optimisation de la conception des appareillages

L'optimisation de la conception des appareillages électriques permet de réduire la quantité de SF_6 utilisée et de minimiser ses fuites. Parmi les méthodes utilisées dans l'industrie, on peut citer:

- Utilisation de l'isolation hybride solide/gaz: en associant des gaz simples tels que le N_2, le CO_2 ou l'air qui ont des propriétés diélectriques nettement inférieures au SF_6 avec des diélectriques solides (sous forme d'une couche de revêtement ou d'une barrière) permet d'améliorer les performances de l'isolation [45]. Dans l'air atmosphérique, une augmentation de la tension de claquage de 180% en continue a été observée pour des essais en géométrie pointe - plan en présence d'une barrière diélectrique [46].
- Extension de l'utilisation du vide: le vide possède une tenue diélectrique et une capacité de coupure très bonnes aux faibles dimensions. Son utilisation est très réduite en tension et il est moins compétitif par rapport au SF_6 dans le domaine des très hautes tensions. Des recherches sont menées pour étendre son utilisation [47].

6.4. Mélange de gaz à base de SF_6

Un autre moyen de diminuer les rejets de SF_6 dans l'atmosphère est de réduire son utilisation en le mélangeant à un gaz ayant un potentiel de réchauffement global (GWP) plus faible. Parmi les mélanges ayant déjà fait l'objet d'études et qui présentent un bon effet de synergie pour des faibles concentrations en SF_6, on peut citer: SF_6 - CO_2, SF_6 - air, SF_6 - N_2 et SF_6 - N_2 - CO_2 [48][49][50][51][52][53].

7. Gaz alternatifs au SF_6

En parallèle avec l'effort de réduction du SF_6, la recherche de gaz de remplacement utilisables dans les équipements électriques se poursuit depuis plusieurs années compte tenu des enjeux écologiques et de certaines contraintes liées à l'utilisation du SF_6 (gaz à effet de serre). Nous définirons un certain nombre de critères que doit remplir le gaz ou mélange de substitution. Ces critères peuvent être divisés en trois groupes:

- Propriétés intrinsèques (physiques et chimiques).
- Propriétés extrinsèques (réactions, sous-produits de gaz, décharge et claquage électrique).
- Autres conditions pour l'usage commercial.

7.1. Propriétés intrinsèques

Les propriétés intrinsèques sont les propriétés du gaz qui dépendent de sa structure atomique ou moléculaire. Ces propriétés sont indépendantes de l'application et de l'environnement dans lesquels un gaz est placé.

7.1.1. Propriétés physiques de base

L'un des critères principaux qu'un diélectrique gazeux doit remplir est celui de sa rigidité diélectrique qui doit être élevée. Les propriétés qui sont à l'origine de cette rigidité diélectrique élevée sont ceux qui réduisent le nombre d'électrons présents dans un gaz soumis à une contrainte électrique. Pour avoir une réduction conséquente de la densité des électrons, un gaz doit:

- Etre un gaz électronégatif pour permettre la capture d'électrons libres et prévenir le phénomène d'avalanche qui est à l'origine de l'amorçage de la décharge.
- Avoir une faible section efficace d'ionisation et une grande énergie d'ionisation pour empêcher le phénomène d'ionisation par collision d'électrons.
- Avoir une section efficace de collision élevée qui permet de ralentir par collision les quelques électrons libres subsistant dans le gaz ce qui va les empêcher d'être trop rapidement accélérés sous l'action du champ électrique et va ainsi retarder la formation des électrons germes de la décharge.

7.1.2. Propriétés chimiques de base

Le gaz doit avoir les propriétés chimiques suivantes :

- Une température de liquéfaction élevée (pression de vapeur élevée): cette température représente la frontière entre la phase gazeuse et liquide. Elle doit être inférieure à la température minimale de fonctionnement de l'équipement à la pression de service choisie.
- Une chaleur spécifique élevée (conductivité thermique élevée).
- Une stabilité thermique sur de longues durées à des températures supérieures à 400 K.

- Une stabilité chimique : elle peut être exprimée sous forme de deux critères :
  - la température de décomposition T_{dec} du gaz qui doit être supérieure à la température maximale qui pourrait se produire dans l'équipement sous test (en général autour de 200 °C aux points chauds, T_{dec} > 200°C).
  - le gaz ne doit pas prendre feu (non inflammabilité) dans une réaction de décomposition provoquée par une décharge partielle produisant des étincelles qui peuvent avoir des températures supérieures à 10000 °K.
- Une inertie chimique vis-à-vis des pièces de l'appareillage électrique pour éviter leur usure.
- Non-toxique : le gaz doit être non toxique pour le personnel d'entretien et technique.
- Non explosif.

7.2. Propriétés extrinsèques

Les propriétés extrinsèques sont celles qui décrivent comment un gaz interagit avec son environnement et son comportement aux influences externes telles que les décharges et le claquage électrique.

7.2.1. Réactions et sous-produits

Pour être employé dans l'appareillage électrique, un gaz diélectrique devrait :

- Ne subir aucune décomposition extensive.
- Menez à aucune polymérisation.
- Ne formez aucun dépôt conducteur (couches de carbone ou autres dépôts).
- Etre non-corrosif et non-réactif aux métaux, isolants, et joints.
- Ne donner aucun sous-produit toxique et réactif.
- Avoir un taux de recombinaison élevé particulièrement pour l'interruption d'arc.

Enfin, le gaz doit être respectueux de l'environnement. Par exemple, il ne doit pas contribuer au réchauffement climatique, ni appauvrir la couche d'ozone stratosphérique ou persister dans l'environnement pendant de longues périodes. Les paramètres critiques qui ont le plus d'impact sur l'environnement sont le potentiel de dégradation de l'ozone (PDO) et le potentiel d'échauffement global (PEG). Ce dernier caractérise l'accumulation à long terme d'un gaz dans l'atmosphère. Le PEG du gaz doit, de préférence, être inférieur de 100 fois à

celui du SF_6. Tous les gaz contenant du chlore ou du brome sont à proscrire car susceptibles de détériorer la couche d'ozone [54].

7.2.2. Décharge et claquage électrique

Les propriétés spécifiques du gaz dans des conditions de décharge et de claquage sont:

- Une tension de claquage élevée sous champs électriques uniformes et non-uniformes.
- Une insensibilité à la rugosité de la surface ou aux défauts et aux particules métalliques en mouvement.
- De bonnes propriétés d'isolation dans des conditions pratiques.
- De bonnes caractéristiques de transfert thermique.
- Une auto-régénération.
- Ne donner lieu à aucune réaction défavorable à l'humidité et aux impuretés.
- N'avoir aucun effet nuisible sur l'équipement.

7.3. D'autres conditions pour la commercialisation

L'utilisation commerciale d'un gaz exige certaines caractéristiques, à savoir : la disponibilité, l'approvisionnement fiable, et la stabilité à longue portée d'approvisionnement.

Les propriétés de quelques gaz proposés comme alternative au SF_6 qui sont plus ou moins susceptibles de remplir les propriétés citées ci-dessus sont données dans le Tableau 1.2 [55]. Les gaz inertes comme l'azote ne présentent aucun danger pour l'environnement mais ils possèdent une tenue diélectrique bien trop faible pour être utilisables en isolation haute tension.

Gaz	Rigidité relative au SF_6	T° de liquéfaction à 1 bar (°C)	PEG pour 100 ans	Durée de vie (années)
C_4F_{10}	1,23-1,31	-2	5000	2600
c-C_4F_8	1,25	-6	8700	3200
SF_6	1	-64	23900	3200
C_3F_8	0,88	-36,6	7000	2600
C_2F_6	0,73	-78	9200	10000
N_2O	0,44-0,64	-88,5	310	120
CF_4	0,40	-128	6500	50000
N_2	0,40	-196	0	-
O_2	0,37	-183	0	-
CHF_3	0,27-0,37	-82,2	9000	280
CO_2	0,35	-78,5	1	50-200
Xe	0,32	-108,1	0	-
Ar	0,20	-186	0	-
Ne	0,10	-246,1	0	-
He	0,06	-268,9	0	-
1,1,1,2,3,3,3-C_3HF_7	-	-16,4	2500	31

Tableau 1.2 . *Propriétés de quelques gaz alternatifs*

8. Décharges partielles

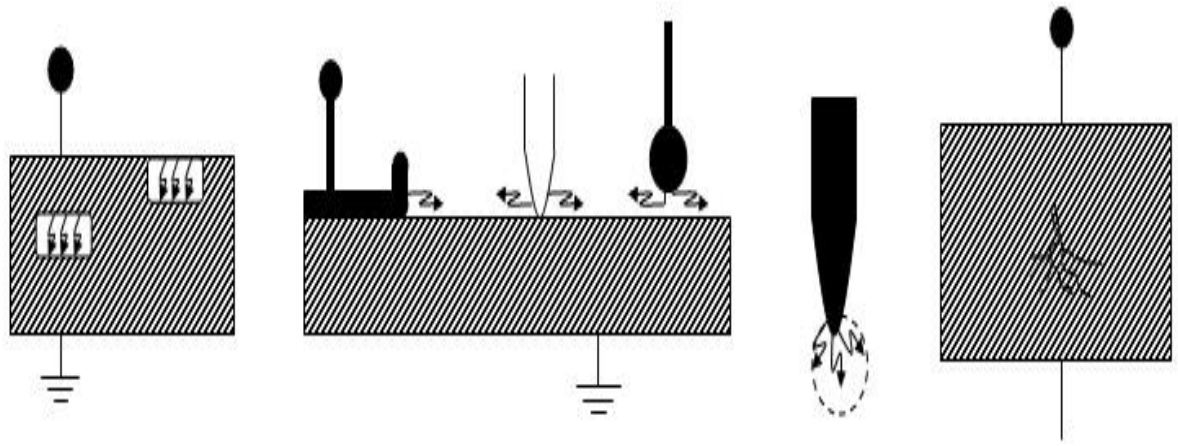
8.1. Définition

Selon la CEI, une décharge partielle est une décharge localisée dans une isolation. Celle-ci est dite partielle car elle ne court-circuite pas l'ensemble de l'isolation. L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide) [56].

8.2. Classification des décharges partielles

Plusieurs classifications des décharges partielles ont été proposées; elles varient selon le critère de sélection utilisé. Par exemple, Kreuger [57] classe les décharges en fonction de leur localisation et définit quatre catégories (Figure 1.4) :

- **Les décharges internes:** elles prennent naissance en des endroits du diélectrique où la rigidité diélectrique est faible. Une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide par exemple.
- **Les décharges de surface:** elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique.
- **Les décharges couronnes:** elles prennent naissance dans le matériau aux endroits où le champ électrique est très renforcé (par exemple par un effet de pointe). La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe.
- **Les arborescences:** un "arbre électrique" prend naissance sur un défaut de l'isolation. Il y a croissance d'une structure ramifiée composée de plusieurs branches.



(a) (b) (c) (d)

Figure 1.4. *Différents types de décharges partielles selon Kreuger : interne (a), surface (b), couronne (c) et en arborescence (d)*

8.3. Caractérisation des décharges partielles

L'objet de ce paragraphe est de décrire brièvement les caractéristiques principales des décharges partielles les plus fréquentes: décharges internes, décharges de surface et décharges de couronne.

8.3.1. Décharges dans une cavité (décharges internes)

Les matériaux isolants solides de qualités techniques comportent toujours des inclusions de particules étrangères et de vacuoles (cavités gazeuses). Lorsque ces isolants sont soumis à

une certaine tension alternative à fréquence industrielle, le champ électrique dans les vacuoles gazeuses E_g est plus élevé que le champ E_i dans l'isolant (Figure 1.5).

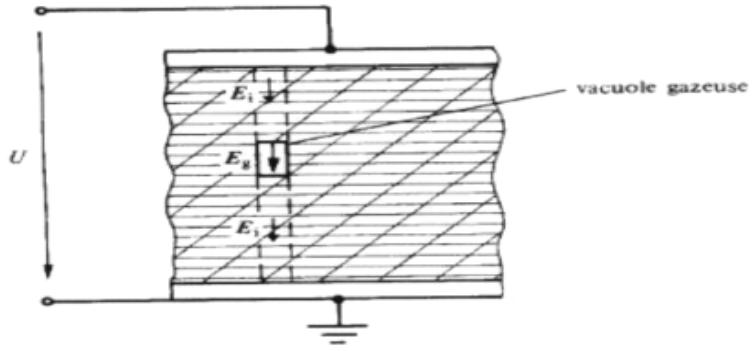


Figure 1.5. *Isolant solide comportant une vacuole (cavité gazeuse)*

Etant donné la continuité du vecteur d'induction électrique dans un milieu non ionisé à l'état initial, on a:

$$\frac{E_g}{E_i} = \frac{\varepsilon_{ri}}{\varepsilon_{rg}} \qquad \text{(I.21)}$$

ε_{ri} et ε_{rg} sont respectivement les constantes diélectriques du matériau solide et de l'inclusion (cavité gazeuse).

Deux facteurs contribuent à faire apparaître des décharges partielles dans les isolants:

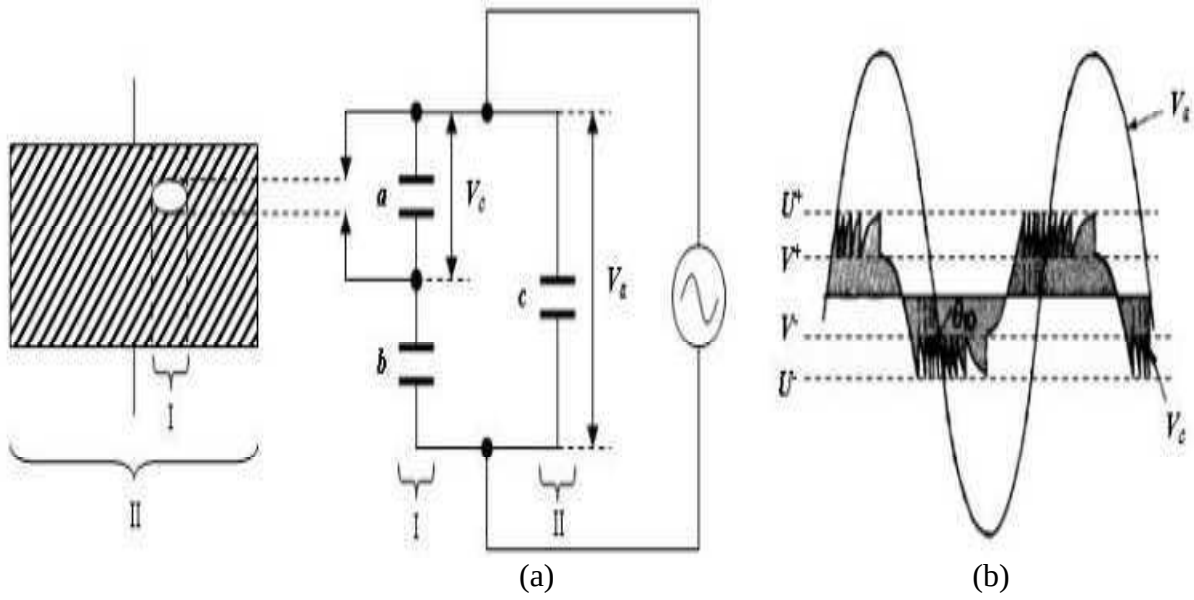
- D'une part la constante diélectrique des isolants solides étant toujours plus élevée (2 à 6 fois) que celles des gaz, le champ électrique dans les vacuoles est proportionnellement plus élevé d'après l'équation (1.21);
- D'autre part, la rigidité diélectrique des gaz est nettement plus basse (environ 10 fois) que celle des solides.

Ces deux constations, allant dans le même sens, font que des décharges partielles apparaissent dans les vacuoles des isolants solides pour des tensions 20 à 60 fois plus faibles que celles qui entraîneraient la perforation du diélectrique solide. A long terme, ces décharges internes peuvent provoquer le claquage du diélectrique qui est la conséquence directe d'un mécanisme d'érosion [58].

8.3.1.1. Circuit électrique équivalent et comportement récurent des décharges internes

Le comportement des décharges partielles internes sous tension alternative peut être décrit simplement en utilisant un schéma équivalent de capacités (Figure 1.6a). La cavité est modélisée par la capacité *a* qui est en parallèle avec un éclateur. La capacité du diélectrique en série avec la cavité est représentée par *b*. La partie saine du diélectrique est représentée par la capacité *c*. V_a et V_c représentent la haute tension appliquée sur le diélectrique et la tension aux bornes de la cavité respectivement.

Lorsque la tension dans la cavité V_c atteint une certaine valeur critique U_+ (tension seuil d'initiation), une décharge partielle apparaît ; V_c chute à une valeur résiduelle V_+ et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelques ns) par rapport à celle de la tension sinusoïdale (50 Hz). Puis la tension aux bornes de la cavité augmente de nouveau, lorsque sa tension arrive à la valeur U_+, une nouvelle décharge se produit ; ceci se répète jusqu'à ce que la haute tension V_a n'augmente plus (phase $\phi = 90°$). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt des décharges à 270°). Les décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (durée de quelques ns) dans l'échantillon et le circuit extérieur (Figure 1.6b) [59].



(a) (b)

Figure 1.6. *Modèle classique des capacités équivalentes (a) et récurrence des décharges partielles dans une cavité (b)* [59]

8.3.2. Décharges couronnes (décharges externes)

Considérons une configuration pointe - plan où des décharges couronnes peuvent se produire. Le comportement des décharges couronnes peut être approximativement représenté par un circuit équivalent (Figure 1.7). Lorsque la tension appliquée V_a dépasse une certaine valeur critique U_+ (seuil de décharge), l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne se manifeste. Ceci se répète jusqu'à ce que la tension appliquée V_a devienne inférieure au seuil de décharge U_+. Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les distributions de décharges sur une période sont centrées sur 90° et 270°.

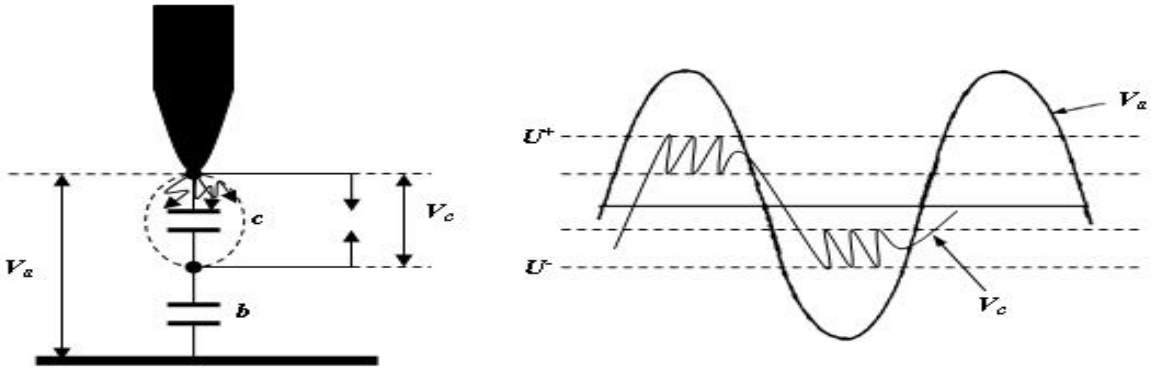


Figure 1.7. *Circuit équivalent et récurrence des décharges couronnes* [59]

8.3.3. Décharges surfaciques

Lorsqu'on est en présence de structures isolantes hétérogènes, on peut toujours s'attendre à des décharges surfaciques lorsque des champs tangentiels importants apparaissent aux interfaces. La Figure 1.8 donne deux exemples typiques de décharges de surface.

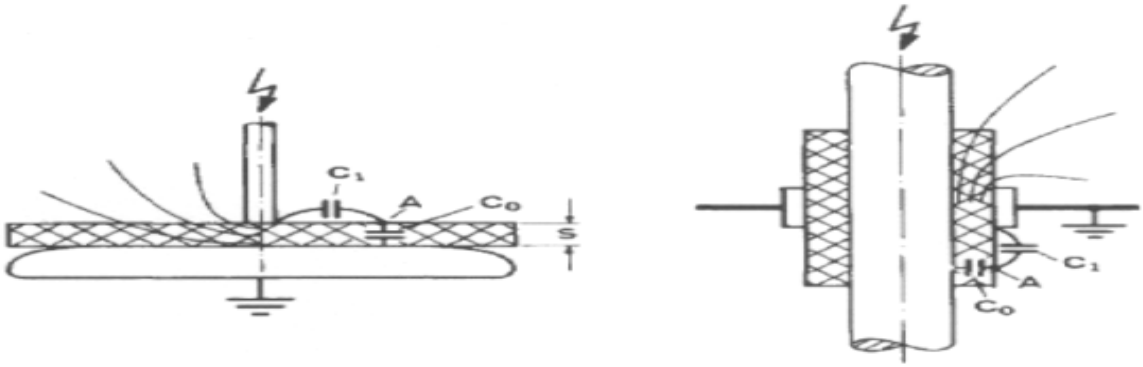


Figure 1.8. *Configuration de décharges de surface* [60]

La forme de base des lignes équipotentielles peut être illustrée par des capacités C_0 et C_1. Comme la capacité C_0 est beaucoup plus grande que C_1, la quasi-totalité de la tension se trouvera appliquée aux bornes de C_1. Quand la tension dépasse une tension dite seuil, des décharges partielles de couronnes apparaissent. Celles-ci se développent avec l'augmentation de la tension donnant naissance à des décharges glissantes le long de la surface de l'isolant. L'intensité des ces décharges surfaciques et la tension de leur apparition dépendent de la capacité C_0 [60].

8.4. Mesure électrique des décharges partielles

La méthode électrique consiste à mesurer les impulsions rapides de courant ou de charge engendrées dans un circuit extérieur lorsqu'une décharge partielle se produit. De nombreux travaux ont été publiés sur ces méthodes. Nous pouvons citer les travaux de Kreuger [61], Bartnikas [62][63], Nattrass [64].

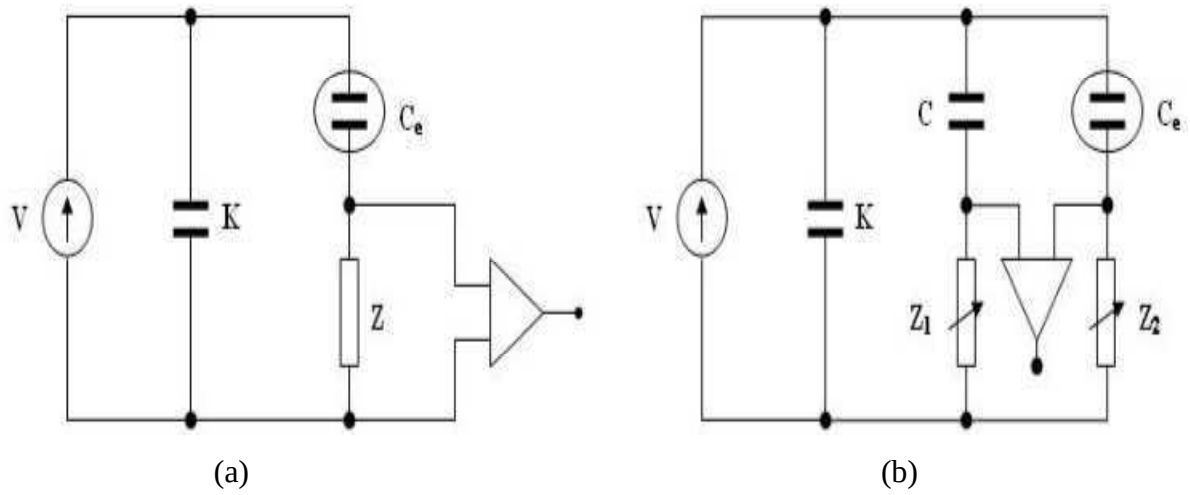
8.4.1. Les montages de détection électrique

Les montages actuellement utilisés sont dérivés du dispositif mis au point par Austen et Whitehead en 1941 [65]. L'un des paramètres essentiel d'un tel montage est la bande passante. Buggs et al [66] classent les détecteurs de la manière suivante:

- **Détecteurs à bande étroite:** ayant une bande passante de 10 kHz, centrée de 20 à 30 kHz. L'inconvénient de ce type de détecteur c'est le risque d'interférence entre deux décharges successives trop rapprochées.
- **Détecteurs à large bande:** ayant une bande passante de 100 kHz, centrée de 200 à 300 kHz. Ces dispositifs sont les plus utilisés, par exemple dans la norme IEC 270.
- **Détecteurs à ultra-large bande (100 kHz ÷ 1 GHz):** ces détecteurs permettent de séparer des décharges individuelles dont la durée est de l'ordre de la nanoseconde. Ils sont utilisables uniquement sur des cellules de laboratoire dont la réponse en fréquence est bien connue, ce qui n'est généralement pas le cas d'un dispositif industriel complexe.

L'importance du choix de la bande passante a été confirmée par l'étude faite par Bartnikas sur l'effet du temps de montée d'une impulsion sur la réponse d'un détecteur [66].

Il existe deux montages principaux pour la mesure de décharges partielles: la mesure directe élémentaire et le montage en pont (Figure 1.9).



(a) (b)

Figure 1.9. *Schéma de principe d'un système de détection élémentaire (a) et en pont (b)*

a. Montage élémentaire

Le montage de mesure directe est représenté sur la Figure 1.9a. *V* est la tension délivrée par la source, C_e est la cellule d'étude, *K* est un condensateur dont l'impédance est faible vis-à-vis des courants qui sont de haute fréquence et qui sert à stabiliser la tension appliquée à l'échantillon, *Z* est l'impédance de mesure. *Z* est en série avec la cellule de mesure C_e.

Lorsqu'une décharge partielle se produit, une impulsion rapide de courant (quelques ns), correspondant à une quantité de charge appelée « charge apparente », circule dans le circuit extérieur. Cette impulsion peut être mesurée à l'aide de l'impédance de mesure *Z*, souvent composée d'un circuit *RLC* parallèle. L'inductance *L* atténue fortement les composantes basses fréquences du signal mesuré, la capacité *C* sert à intégrer les impulsions rapides de décharges partielles, et la résistance *R* amortit les oscillations du circuit. Une fois calibré, ce circuit donne donc un signal proportionnel à la « charge apparente » des décharges partielles.

La mesure directe est la plus simple à mettre en œuvre mais comporte l'inconvénient majeur d'être sensible aux perturbations électriques hautes fréquences provenant aussi bien du réseau d'alimentation que de l'environnement (éclairage à tube fluorescent, émetteur

radiophonique…). Par ailleurs, ce système ne fonctionne qu'avec une tension d'alimentation sinusoïdale basse fréquence.

Dans le cas d'une tension d'alimentation impulsionnelle, la présence d'harmoniques élevées sur la tension rend la détection des décharges problématique : le filtre *RLC* classique est inadapté pour dissocier les harmoniques de la source de tension de celles des signaux des décharges partielles situées dans la même gamme de fréquence.

Notons que deux couplages peuvent être réalisés suivant que l'on peut ou non mettre l'objet à la masse (Figure 1.10) [67].

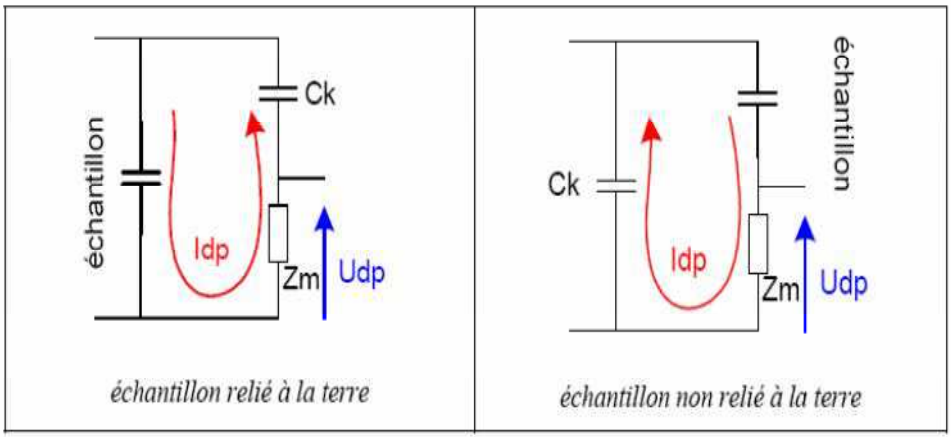


Figure 1.10. *Les deux types de couplages possibles*

b. Montage en pont

La cellule de test C_e, est placée dans l'une des branches du pont (Figure 1.9b). Le condensateur C a la même capacité que la cellule d'étude C_e et est dépourvu de décharges dans la gamme de tension étudiée.

En l'absence de décharges partielles DP, le pont est équilibré en réglant les valeurs des impédances Z_1 et Z_2. Lorsqu'une décharge apparaît, la tension entre les deux branches du pont n'est plus nulle du fait qu'un courant de DP parcourt la branche $C_e - Z_2$. En mesurant la tension de déséquilibre du pont, on peut déterminer la charge apparente correspondante aux DP.

Ce type de montage permet en principe la mesure de décharges partielles dans le cas de formes complexes de tensions appliquées, et possède une très bonne immunité au bruit.

Cependant, en pratique l'équilibrage d'un tel pont à haute fréquence reste difficile à mettre en œuvre.

8.4.2. Procédure d'étalonnage

Pour une mesure pratique de la charge apparente, l'étalonnage du circuit d'essai, représenté sur la Figure 1.9, est effectué. Les impulsions d'étalonnage sont produites par un générateur émettant des échelons de tensions rectangulaires d'amplitude V_1 en série avec une petite capacité connue C_1 (Figure 1. 11). Dans ces conditions, l'impulsion d'étalonnage est équivalente à une décharges d'amplitude $q_1=V_1C_1$, et l'indication de l'instrument de mesure peut, dés lors, être étalonnée en terme de charge apparente. Par cette procédure d'étalonnage, le coefficient de conversion du circuit d'essai k_c est déterminé.

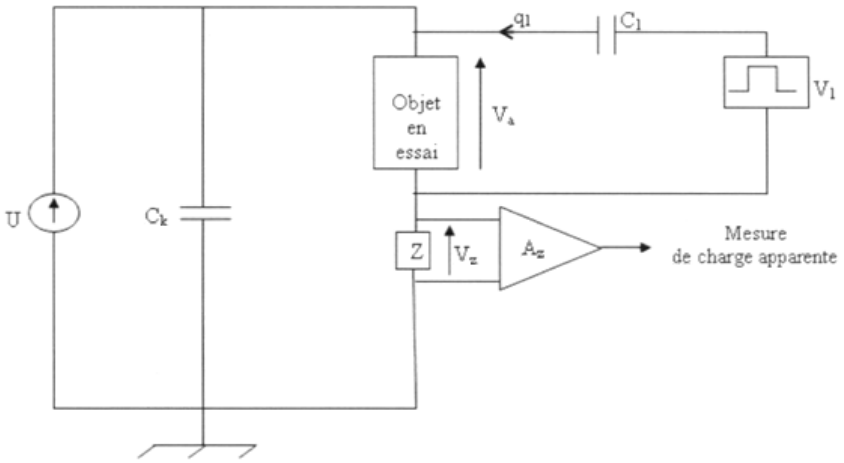


Figure 1. 11. *Circuit d'étalonnage de la mesure de la charge apparente*

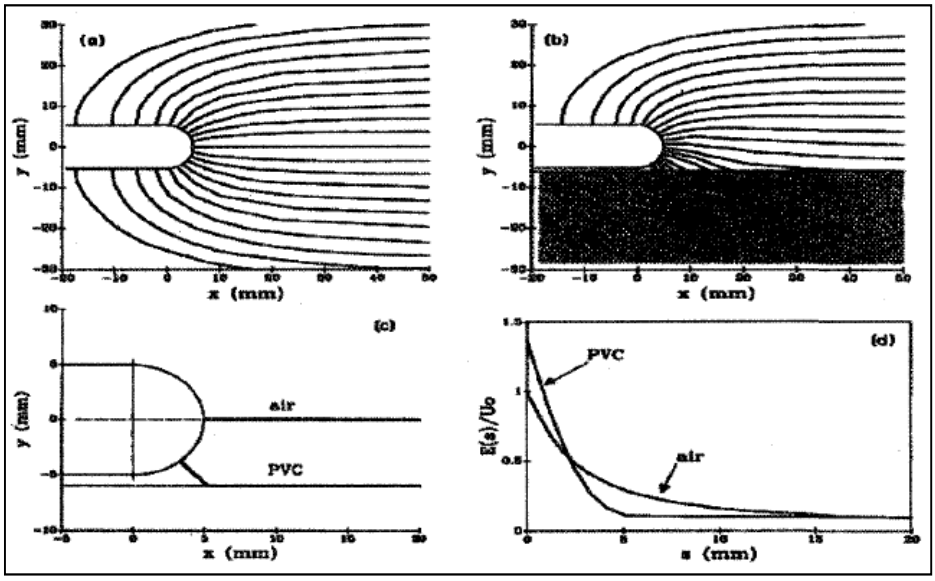
9. Décharges surfaciques aux interfaces solide/gaz

9.1. Physique des décharges surfaciques

Dans les isolations hybrides solide/gaz, la rupture électrique se fait soit par claquage de l'isolant solide ou par contournement de ce dernier. Le contournement est précédé de la génération et de la propagation de décharges surfaciques (glissantes) qui se propagent sur l'isolateur solide. Les processus physiques fondamentaux impliqués dans le développement

des avalanches en présence d'une surface diélectrique sont beaucoup plus complexes que ceux dans les gaz. Plusieurs paramètres peuvent influencer la formation et le développement de ces décharges, à savoir les propriétés du gaz et du diélectrique solide, la forme et la polarité de la tension ainsi que la géométrie des électrodes. Les mécanismes physiques qui se produisent en tête de la décharge (streamer), dans le gaz et le solide ainsi que l'interaction mutuelle entre ces deux phases et la décharge sont très complexes et ne sont jusqu'à maintenant pas entièrement compris. Cependant, plusieurs études ont été consacrées à la description physique de la décharge sur une interface solide/gaz. Parmi les mécanismes proposés, nous pouvons citer:

La distorsion du champ électrique [68] [69]**:** elle est due à l'effet de la permittivité du diélectrique solide qui est plus élevée que celle des gaz. Les résultats de simulation numérique [69] présentés sur la Figure 1.12 illustrent clairement l'influence du diélectrique solide sur la distribution du champ électrique. Cette distorsion favorise la génération des électrons. Autrement dit, la tension requise pour amorcer une couronne de streamers en présence d'une surface diélectrique serait plus grande que celle dans le cas du gaz tout seul.



(a) lignes de champ dans un intervalle d'air
(b) lignes de champ en présence d'une surface de PVC
(c) champ maximum en présence d'une surface de PVC et dans l'air
(d) champ axial dans le cas de l'air et en présence d'une surface de PVC

Figure 1.12. *Comparaison du champ électrique autour de l'électrode HT dans l'air et en présence de surface diélectrique* [69]

Modification des coefficients d'ionisation et d'attachement: la propagation des streamers est fortement liée aux taux d'ionisation et d'attachement, qui sont grandement affectés par la présence du diélectrique [70][69]. Gallimberti et al. [69] ont émis une interprétation théorique à ce phénomène ; selon ces auteurs, la surface diélectrique modifie les coefficients d'ionisation et d'attachement de deux façons comme le montre la Figure 1.13:

- Elle peut émettre des électrons sous l'effet du bombardement des photons. Cet apport supplémentaire contribue à fournir davantage d'électrons germes pour générer des avalanches secondaires et à favoriser davantage l'ionisation par collisions devant la tête du streamer.
- Elle peut aussi attacher les électrons dans des pièges surfaciques et les ions positifs par attraction électrostatique accentuant ainsi l'attachement électronique déjà induit par le gaz formant l'interface.

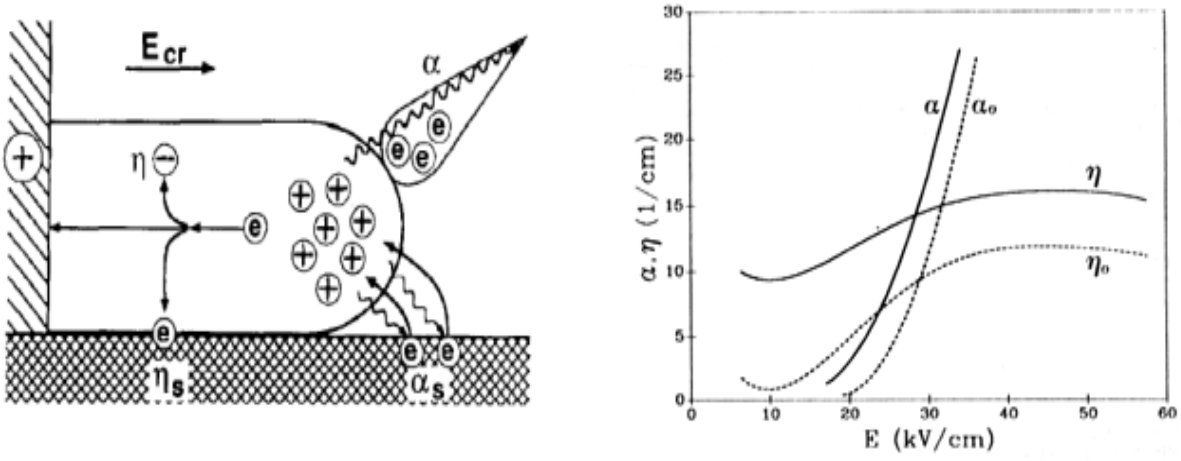


Figure 1.13. *Processus élémentaires contrôlant la propagation du streamer le long de la surface de l'isolant et les coefficients d'ionisation et d'attachement de l'air seul respectivement α_0 et η_0 et ceux en présence d'une surface en PVC (α et η)*

L'accumulation de charges surfaciques: les paramètres d'initiation, de propagation et l'aspect physique de la décharge se propageant sur une interface solide/gaz peuvent être affectés de façon très significative par les charges accumulées sur la surface diélectrique [71][72][73][74][75][76]. Différents mécanismes peuvent être impliqués dans la génération de charges électriques. Cependant, l'émission par effet de champ à partir des électrodes (Figure 1.14) représente la source la plus significative. L'effet majeur de la présence de charges est la modification de la distribution interne du champ électrique.

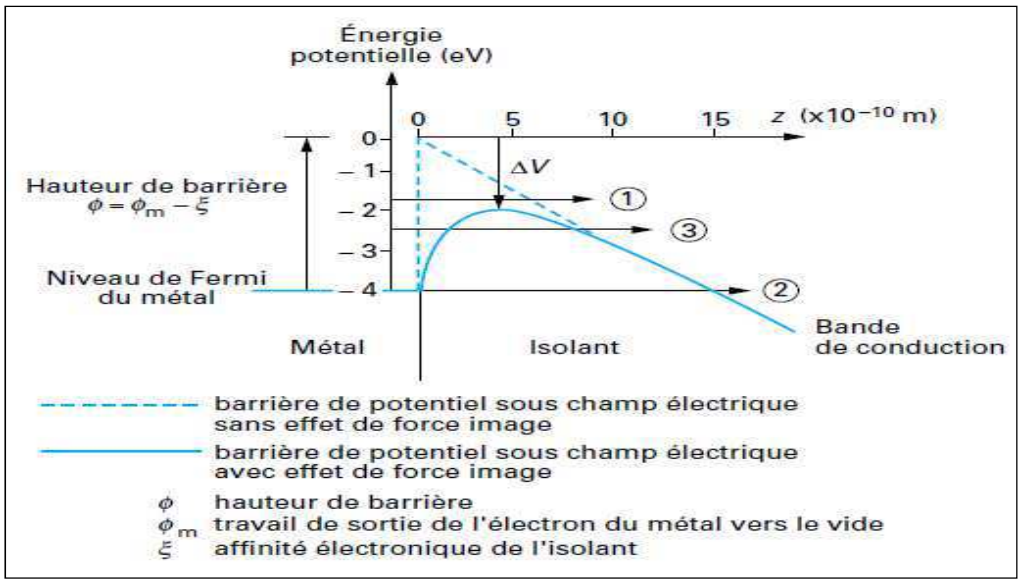


Figure 1.14. *Injection de charges par effet champ à partir des électrodes* [72]

Outre les phénomènes physiques décrits précédemment, l'interaction dynamique entre la surface et la décharge elle-même joue un rôle sur les décharges surfaciques [77][78][79][80].

9.2. Analyse fractale des décharges glissantes

La formation des branches constituant les différents types de décharges peut être gouvernée par une loi universelle faiblement sensible aux détails physiques du phénomène [1]. Ce type d'universalité permet de simplifier la classification et la description du phénomène de la décharge. Avec l'introduction de la géométrie fractale par Mandelbort [81] dans les années 1970, la dimension fractale est considérée comme étant une des meilleures descriptions des décharges. Depuis, plusieurs modèles de propagation des décharges ont été proposés. Parmi ces modèles, on peut citer:

- **Modèle stochastique de Sawada et al** [82]**:** pour décrire les décharges; ces auteurs ont introduit un modèle stochastique. En utilisant la géométrie fractale, ils ont analysé les propriétés fractales d'une structure aléatoire en 2 dimensions obtenue par simulation.

- **Modèle de Niemeyer, Pietronero et Wiesmann appelé aussi NPW** [83]**:** ce modèle utilise la théorie fractale pour élaborer un modèle maillé en treillis des décharges

électriques dans les gaz où la probabilité de propagation des décharges est explicitement liée au champ électrique.

- **Modèle de Wiesmann-Zeller (WZ)** [84]**:** à partir du modèle NPW, ces auteurs ont introduit de nouveaux paramètres du champ électrique et effectué des investigations sur le caractère stochastique des décharges surfaciques (2 dimensions).

Depuis, de nombreux travaux de recherche ont concerné le modèle stochastique et l'analyse fractale des décharges obtenues par simulation [85][86][87][88][89]. Des investigations ont été mené par Kebbabi et Beroual [90] sur des figures de décharges glissantes observées expérimentalement sur une interface solide/liquide. Ils ont montré que ces décharges présentaient une dimension fractale *D*. En utilisant la méthode de quadrillage, ils ont montré que la dimension fractale était fortement liée aux propriétés physiques et géométriques des constituants de l'interface.

10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons rappelé, de façon synthétique, les points essentiels relatifs aux phénomènes de décharges dans les gaz et aux interfaces solide/gaz ; nous avons également présenté les modèles, méthodes et techniques de mesure des décharges partielles. Il ressort de cette analyse bibliographique que:

- Les surfaces diélectriques formant une interface avec un gaz, constituent généralement la partie la plus vulnérable.
- Les mécanismes de décharges surfaciques sont très complexes et la littérature sur le sujet reste pauvre.
- La génération et la propagation des décharges surfaciques dépendent de plusieurs paramètres tels que la géométrie du diélectrique solide et sa permittivité diélectrique, la nature du gaz et sa pression, l'amplitude, la forme, la polarité et le temps d'application de la tension, ainsi que la géométrie des électrodes.

2

TENUE DIELECTRIQUE DES GAZ ET MELANGES

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la mesure de la tension de claquage en tension impulsionnelle (choc de foudre normalisé 1.2/50 μs) de différents gaz et mélanges à des pressions allant au-delà de celles déjà considérées dans un travail antérieur mené par notre groupe [2]; des mesures de cette tension en alternatif et continu ont été déjà menées dans le passé [2][29]. Nous présentons dans un premier temps l'ensemble du dispositif expérimental utilisé dans nos essais ainsi que les différents gaz et mélanges considérés. Nous décrivons dans un deuxième temps la technique de réalisation des mélanges et la procédure d'admission des gaz et leurs mélanges à l'intérieur de la cellule de tests. Par la suite, nous présentons les résultats de mesure de la tension de claquage en champ quasi-uniforme (configuration sphère - plan). Ces résultats seront complétés par des mesures en champ non uniforme (configuration pointe - plan).

2. Dispositif expérimental et méthodologies

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule d'essais contenant le gaz (ou mélange) et les systèmes d'électrodes, de la source de tension et du diviseur associé, d'un système de régulation et de contrôle de l'admission et de la pression des gaz. Le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental utilisé est présenté en Figure 2.1.

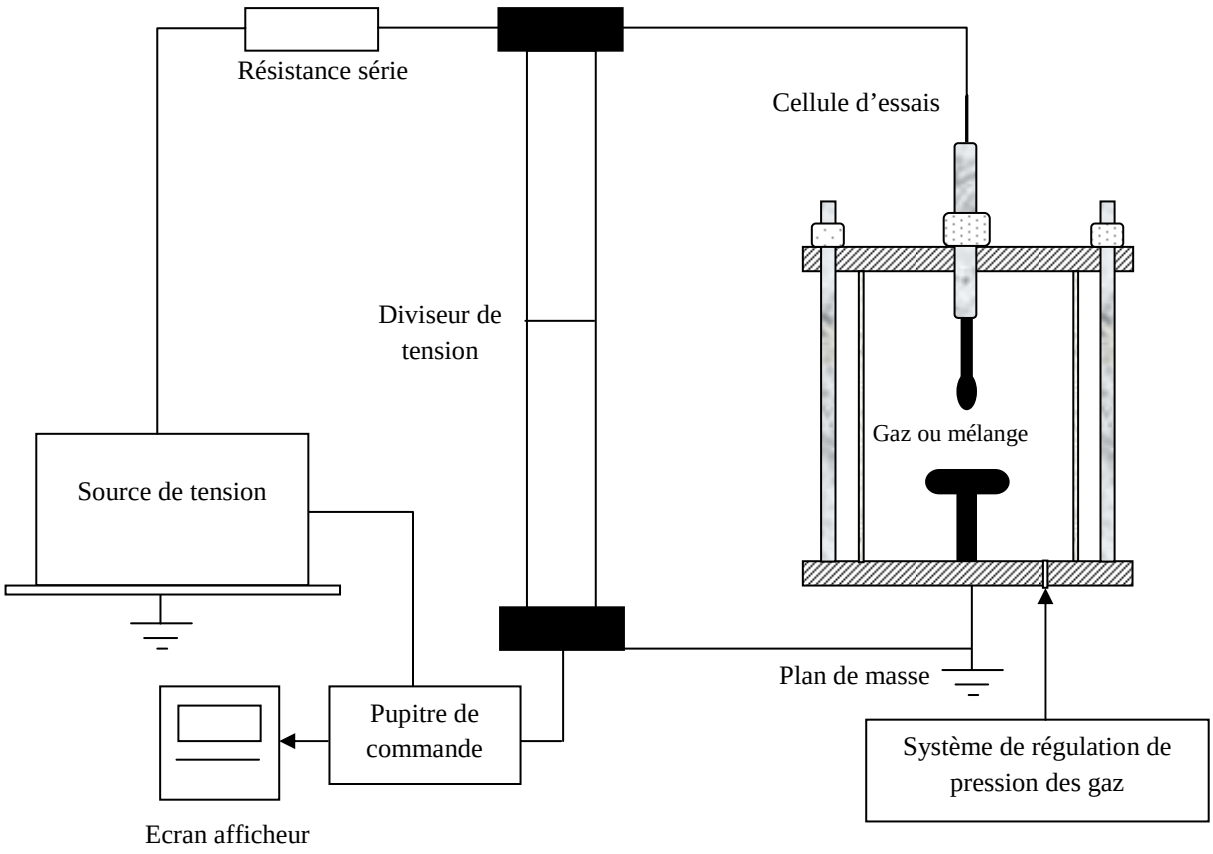
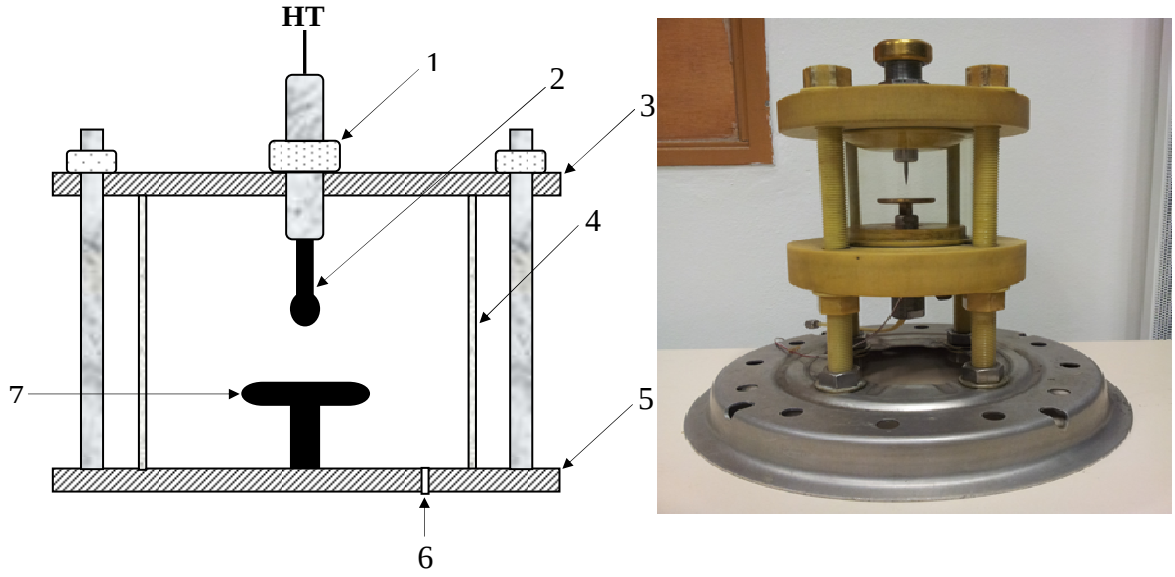


Figure 2.1. *Schéma de l'ensemble du dispositif expérimental*

2.1. Description de la Cellule d'essais

La cellule d'essais contenant le gaz ou mélange et le système d'électrodes, est constituée d'un corps cylindrique de 120 mm de haut et de 112 mm de diamètre intérieur fabriqué en matériau transparent PMMA (poly méthacrylate de méthyle ou plexiglas) (Figure 2.2). Elle contient un système d'électrodes interchangeables dont l'axe est vertical. Le couvercle supérieur est muni d'un mécanisme de réglage de la distance inter-électrodes *d* solidement relié à l'électrode haute tension. Le fond de la cellule comporte un orifice relié à un système de robinets. Ce dernier assurant le contrôle de la pression d'admission/vidange est équipé d'un manomètre numérique relié aux bouteilles de gaz, à la cellule d'essais et à la pompe à vide à l'aide de tuyaux en polyuréthane résistant à des pressions élevées. La cellule est entièrement démontée et nettoyée après chaque série d'essais et les électrodes traitées.



1. Mécanisme de réglage de la distance inter-électrodes 2. Electrode sphère 3. Couvercle supérieure
4. Corps de la cellule en PMMA 5. Couvercle inférieur 6. Admission du gaz
7. Electrode plane

Figure 2.2. *Schéma de la cellule d'essais*

2.2. Configurations d'électrodes

Les configurations d'électrodes utilisées sont les systèmes pointe - plan et sphère - plan (Figure 2.3). L'axe des électrodes dans les deux configurations est vertical.

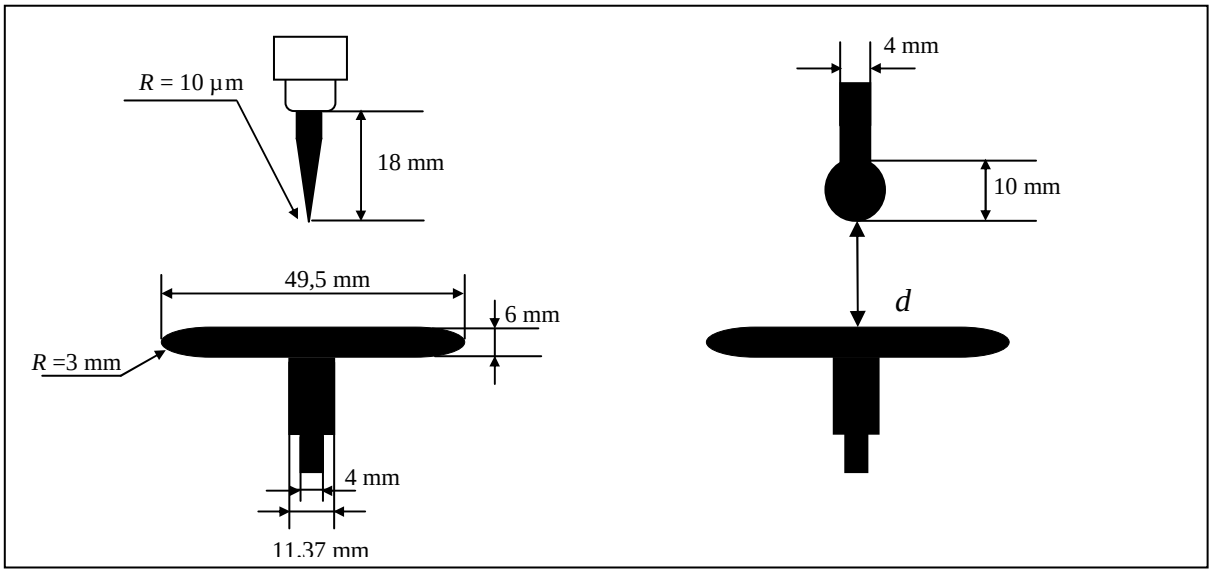


Figure 2.3. *Systèmes d'électrodes utilisés*

La pointe en tungstène thorié a un diamètre de 5 mm avec une extrémité conique de rayon de courbure de 10 µm. Le contrôle et la mesure du rayon de courbure de la pointe sont effectués sous un microscope de type Nikon eclipse LV150. La pointe est remplacée dès que son profil devient différent de celui de départ. L'électrode plane est un disque en laiton avec un diamètre de 49.5 mm et une épaisseur de 6 mm avec un pourtour (bord) de rayon de courbure de 3 mm (Rogowski). Les sphères sont en acier et ont un diamètre de 10 mm.

2.3. Source de tension

Les mesures ont été réalisées sous tension de foudre normalisée (1.2/50 µs) définie par la norme CEI60060-1 (Figure 2.4), fournie par un générateur de chocs de type HAEFELY série E (1 MV - 50 kJ) permettant de générer des ondes de foudre jusqu'à 1 MV. Cette tension impulsionnelle est visualisée sur un écran afficheur connecté à la sortie du pont diviseur 1440 pF/1000 kV. Un oscilloscope est également utilisé pour relever les tensions de claquage et vérifier la concordance des résultats avec ceux de l'écran afficheur.

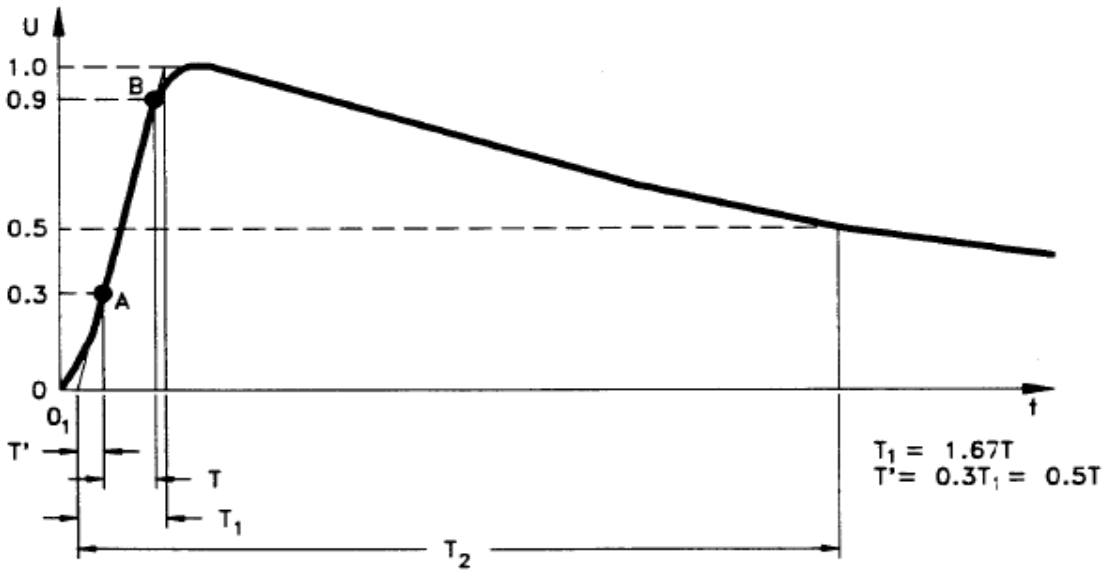


Figure 2.4. *Onde de foudre normalisée* [91]

2.4. Pressions partielles et admission des gaz dans la cellule d'essais

2.4.1. Calcul des Pressions partielles

D'après la loi de Dalton, à température donnée, la pression d'un mélange gazeux est égale à la somme des pressions qu'aurait chacun de ces gaz s'il occupait seul le volume total. Dans un mélange, la pression de chacun de ces gaz p_i est appelée « Pression Partielle ».

$$P_{total} = \sum p_i \tag{2.1}$$

2.4.1.1. Méthode des gaz parfaits

Chaque constituant du mélange est considéré comme gaz parfait et son comportement est traduit par la loi des gaz parfaits:

$$p_i V = n_i RT \tag{2.2}$$

Avec :

p_i : pression du gaz ;

V : volume ;

n_i : nombre de moles ;

R : constante molaire des gaz (R = 8,3144 J.mol^{-1}. K^{-1}) ;

T (K) : température thermodynamique.

La pression totale du mélange :

$$P_{tabs} V = \sum_i^s n_i RT = n_m RT \tag{2.3}$$

Avec :

$$n_m = \sum_i^s n_i \tag{2.4}$$

A partir des relations (2.2) et (2.3), on obtient:

$$p_i = P_{tabs} \times \frac{n_i}{n_m} = P_{tabs} \times t_i \tag{2.5}$$

$$t_i = \frac{n_i}{n_m} \tag{2.6}$$

Avec :

t_i : titre molaire.

Le Tableau 2.1 donne un exemple de calcul des pressions partielles par la méthode des gaz parfaits pour le mélange SF_6 - N_2.

	Pression totale absolue du mélange P_{tabs} = 3 bar	
Mélange	SF_6 - N_2	
Gaz purs	SF_6	N_2
Titre (t_i)	0.9 (90%)	0.1 (10%)
Pressions partielles (bar)	0.9 × 3 = 2.7	0.1 × 3 = 0.3

Tableau 2.1. *Pressions partielles du mélange SF_6 - N_2 obtenues par la méthode des gaz parfaits*

2.4.1.2. Méthode de Dalton

Pour le calcul des pressions partielles des constituants du mélange, contrairement à la méthode des gaz parfaits où les constituants sont assimilés à des gaz parfaits (coefficients de compressibilité $Z = 1$), celle de Dalton prend en compte le coefficient Z des gaz réels [92]. En effet, les gaz utilisés sont des gaz réels surtout aux pressions élevées ; leur comportement est plus complexe que celui qui vient d'être décrit pour les gaz parfaits.

D'une façon générale, on a:

$$pV = ZnRT \tag{2.7}$$

Z étant le coefficient de compressibilité qui est en réalité une fonction de p et de T.

Cette méthode demande la connaissance des fonctions $Z_i\ (p_i,T)$ des constituants; on opère en général par interpolation à partir des valeurs données par l'Encyclopédie des gaz [93].

Les pressions partielles réelles des constituants occupant seuls le volume total:

$$p_iV = Z(p_i,T)n_iRT \tag{2,8}$$

La pression du mélange est la somme de ces pressions partielles:

$$p = \sum_{i=1}^{s} p_i = \frac{RT}{V} \sum_{i=1}^{s} Z_i n_i \qquad (2,9)$$

A l'aide des relations (2.7) et (2.9), on aura:

$$Z_m = \sum_{i=1}^{s} Z_i t_i \qquad (2.10)$$

L'expression de p_i peut être déduite à partir des relations (2.6), (2.7) et (2.8) :

$$p_i = t_i \frac{Z_i(p_i)}{Z_m(p)} p \qquad (2.11)$$

Cette équation (2.11) nous permet de calculer les pressions partielles par itération ; on prend comme valeur approchée de départ les pressions partielles $p_i = p\ t_i$. On détermine alors les valeurs de Z_i (p_i) et on évalue, en utilisant la relation (2.10), une première valeur de Z_m ; on recalcule les pressions p_i à l'aide de la relation (2.11) pour définir les nouvelles valeurs de Z_i (p_i) et un nouveau coefficient Z_m. On applique alternativement les équations (2.10) et (2.11) jusqu'à l'obtention de la convergence désirée.

Le Tableau 2.2 donne les caractéristiques des mélanges SF_6 (10%) - N_2, SF_6 (10%) - CO_2 et SF_6 (10%) - air sec pour une pression totale absolue de 3 bar calculées par la méthode de Dalton. La convergence est obtenue après juste deux itérations.

	Pression totale absolue du mélange P_{tabs} = 3 bar					
Mélanges	SF_6 - N_2		SF_6 - CO_2		SF_6 - air sec	
Gaz purs	SF_6	N_2	SF_6	CO_2	SF_6	Air sec
Titre t_i	0.1	0.9	0.1	0.9	0.1	0.9
Pressions partielles (bar)	0.297	2.703	0.298	2.702	0.297	2.703

Tableau 2.2. *Pressions partielles des mélanges SF_6 - N_2, SF_6 - CO_2 et SF_6 - air sec obtenues par la méthode de Dalton*

Les deux méthodes indiquées ci-dessus donnent pratiquement les mêmes valeurs de pressions partielles des gaz.

2.4.2. Le remplissage de la cellule d'essais

La Figure 2.5 représente le circuit qui est raccordé à la cellule d'essais et permettant son remplissage avec les différents gaz et mélanges.

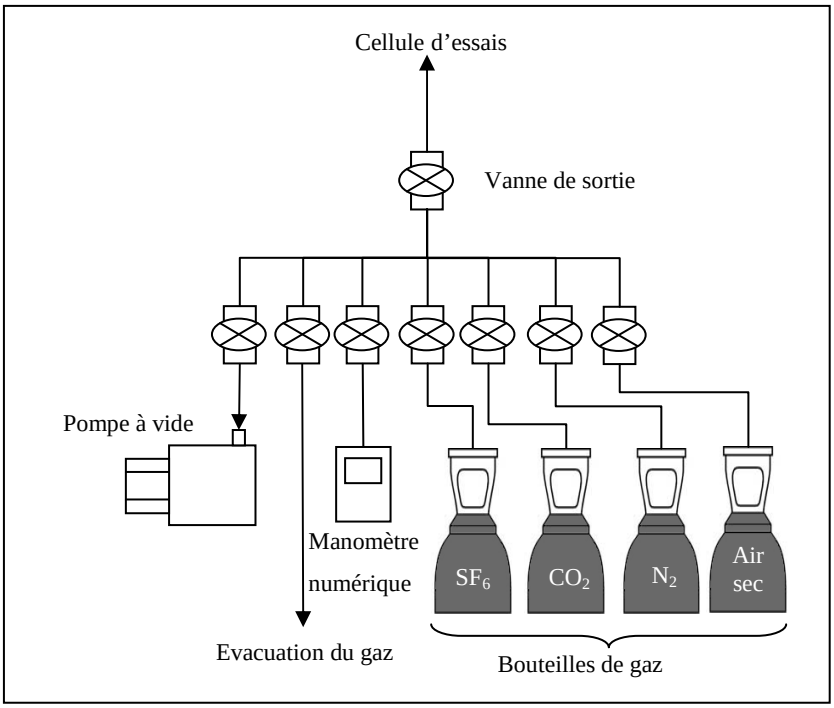


Figure 2.5. *Schéma du circuit de remplissage de la cellule*

Pour les gaz purs, après avoir réalisé le vide dans la cellule à l'aide d'une pompe à vide, nous effectuons un rinçage complet de l'enceinte d'essais avec le gaz à tester. Le gaz est ensuite introduit dans la cellule à la pression finale souhaitée. Pour les mélanges de gaz, le remplissage commence par le gaz minoritaire jusqu'à sa pression partielle P_1, ensuite nous complétons jusqu'à la pression finale désirée P avec le gaz caractérisé par la plus grande pression partielle P_2. Nous effectuons une pause d'une demi-heure après chaque remplissage afin d'avoir une bonne homogénéité des gaz et mélanges.

2.5. Procédure d'essais pour la mesure de la tenue diélectrique

La tenue diélectrique d'un système électrique a un caractère aléatoire. Il n'existe pas de valeur exacte de la tension au-dessus ou en dessous de laquelle on aura la certitude d'amorcer

ou de tenir la contrainte mais toute une plage de tensions où le système aura une probabilité d'amorçage *p*.

Pour calculer la tension de claquage en tension impulsionnelle (1.2/50 μs), on applique la méthode de montée et descente (*up and down*). La Figure 2.6 explique la procédure générale de cette méthode. Une tension U_k est choisie, laquelle est considérée comme approximativement égale au niveau de décharge disruptive à 50% et être sûr quelle ne provoque pas un claquage du gaz ou mélange. Un intervalle de tension ΔU, approximativement égal à 3% de U_k, est également choisi. On applique un choc d'amplitude U_k, et s'il ne produit pas de décharge disruptive, le choc suivant aura pour amplitude $U_k + \Delta U$. S'il y a décharge disruptive au niveau U_k, le choc suivant aura l'amplitude $U_k - \Delta U$.

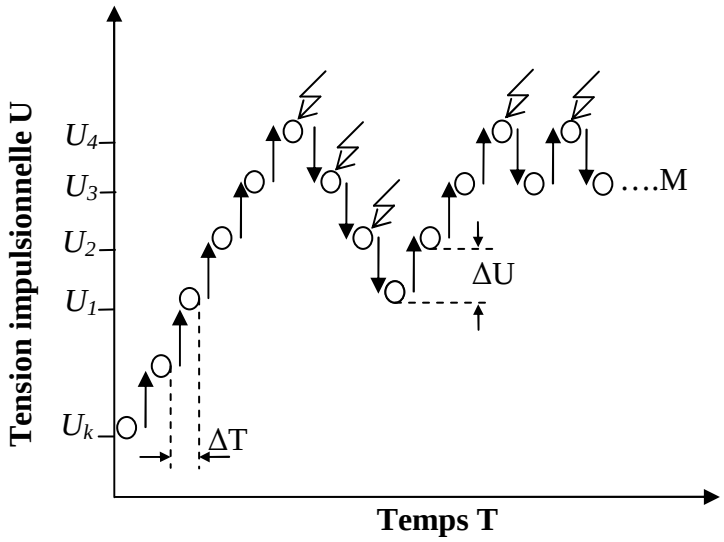


Figure 2.6. *Méthode de montée et descente (up and down)*

Ces modalités sont répétées, l'amplitude de chaque choc étant déterminée par le résultat du choc précédent jusqu'à ce qu'un nombre suffisant d'observations ait été enregistré. Le premier niveau U_1 pris en compte étant l'un de ceux pour lesquels deux chocs ou plus ont été enregistrés. Ceci évite toute erreur significative si U_k est choisie trop grand ou trop faible. *M* représente le nombre de chocs utiles qui regroupe l'ensemble des essais enregistrés après le premier niveau de tension ; ce nombre doit être supérieur à 20. Dans notre cas $M = 30$ chocs. Le nombre de chocs n_v appliqués à chaque niveau U_v et compté ; et la tension à 50% de décharge disruptive est calculée par la formule:

$$U_{50} = \frac{1}{M}\sum_{v=1}^{n} n_v U_v \qquad (2.12)$$

Avec :

v : le niveau de tensions appliquées ;

n_v : le nombre de chocs appliqués à un niveau de tension v ;

U_v : l'amplitude de la tension de niveau v ;

M : le nombre d'essais utiles.

2.6. Coefficient de non uniformité du champ électrique

2.6.1. Pointe – plan (champ non uniforme)

La configuration pointe - plan est utilisée pour se placer dans les conditions de champs non uniformes. Ce champ E_x axial peut être calculé en utilisant l'approximation hyperboloïdale, l'électrode pointe étant assimilée à un hyperboloïde de révolution (Figure 2.7).

En l'absence de charges d'espace, l'expression donnant le champ électrique sur l'axe du système pointe – plan est donnée par [94]:

$$E_x = \frac{2dU}{(2dx - x^2 + dr - xr)\ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \tag{2.13}$$

Avec :

U : tension appliquée aux électrodes ;

d : distance inter-électrodes ;

r : rayon de courbure de la pointe.

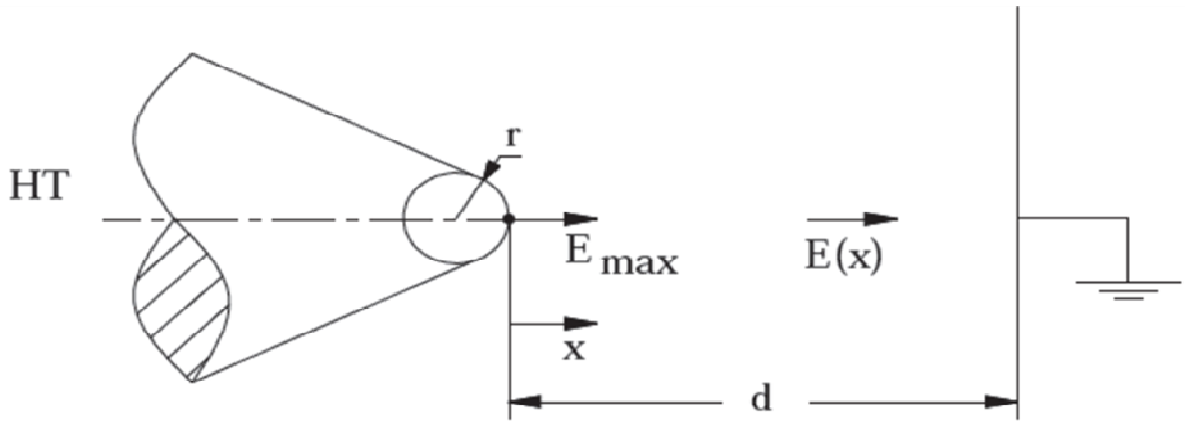


Figure 2.7. *Système d'électrodes pointe - plan*

Au sommet de la pointe, pour *x = 0*, on trouve la valeur maximale du champ E_{max} égale à :

$$E_{\max} = \frac{2U}{r \ln\left(\frac{4d}{r}\right)} \tag{2.14}$$

Plus r est faible, plus le champ local à la pointe E_{max} est élevé et sa distribution inhomogène. Cette inhomogénéité est caractérisée par le facteur de non uniformité β ou son inverse appelé «facteur d'utilisation du champ» et noté η ; ce dernier est défini comme étant le rapport entre le champ moyen dans l'espace inter-électrodes et le champ maximal $E_{\max}$.

$$\eta = \frac{E_{moy}}{E_{\max}} = \frac{U/d}{E_{\max}} = \frac{U}{E_{\max} d} \text{ , et } \beta = \frac{1}{\eta} \tag{2.15}$$

η est compris entre 0 et 1. Plus η est proche de 1, plus le champ sera uniforme. η est aussi appelé facteur de forme de Schwaiger.

En substituant (2.14) dans (2.15), il vient:

$$\eta = \frac{r}{2d} \ln\left(\frac{4d}{r}\right) \tag{2.16}$$

2.6.2. Sphère - plan (champ quasi-uniforme)

Dans un système d'électrodes sphère - plan, le calcul du facteur d'utilisation du champ η se déduit à partir du facteur p en utilisant des abaques (Figure 2.8):

$$p = \frac{d + r}{r} \tag{2.17}$$

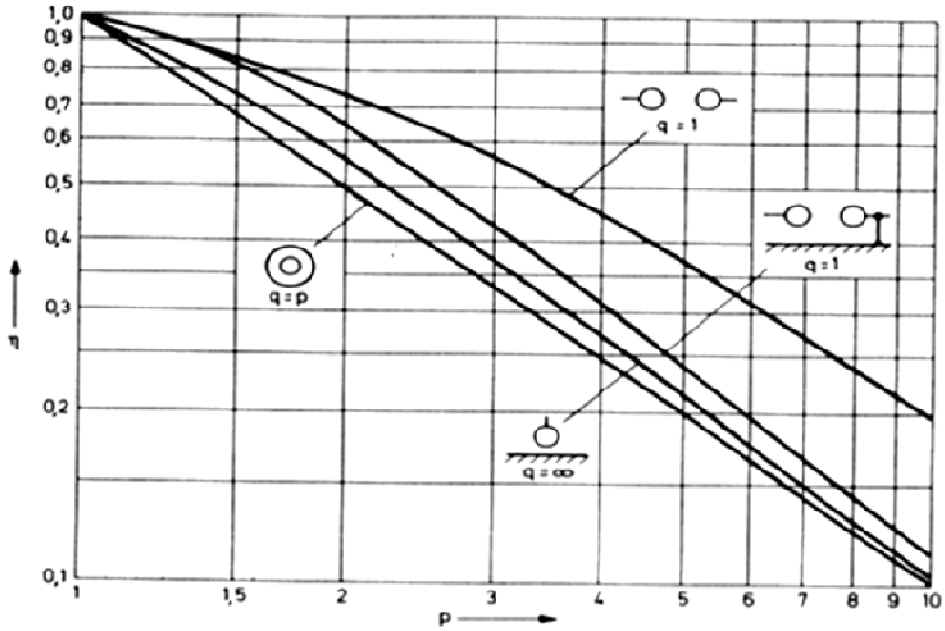


Figure 2.8. *Facteur d'utilisation pour différentes configurations en fonction de p et q* [95]

Les valeurs du coefficient d'utilisation et de non uniformité du champ électrique pour les deux configurations utilisées sont regroupées dans le Tableau 2.3.

Pointe - plan			**Sphère – plan**			
d	η	β	d	p	η	β
5 mm	0,0076	131,5633	5 mm	2	0.55	1.82
10 mm	0,0041	241,1367	10 mm	3	0.37	2.70
20 mm	0,0022	445,0776	20 mm	5	0.22	4.55

Tableau 2.3. *Coefficients d'utilisation du champ électrique pour les configurations sphère - plan et pointe - plan*

3. Résultats de mesure de la tenue diélectrique

La rigidité diélectrique d'un isolant gazeux est plus grande dans une configuration d'électrodes produisant un champ électrique uniforme. Cependant, dans la plupart des applications pratiques, ce n'est toujours pas le cas. On est souvent dans des configurations de champ non uniforme. Dans ce cas de figure, les propriétés diélectriques, en particulier la tension de claquage dépendent de plusieurs facteurs à savoir la forme et la polarité de la

tension appliquée, la nature et la pression du gaz, les dimensions des électrodes ainsi que la distance entre ces dernières.

3.1. Résultats en champs quasi-uniforme (sphère – plan)

Les Figures 2.9 à 2.12 représentent la tension de claquage des gaz N_2, CO_2, air sec et SF_6 sous tension impulsionnelle en fonction de la pression des gaz et de la polarité de la tension appliquée pour une configuration sphère - plan, pour deux distances inter-électrodes *d* (soient 5 et 10 mm). Les coefficients de non uniformité β du champ électrique sont $\beta_1 = 1.82$ et $\beta_2 = 2.7$ correspondant respectivement à $d_1 = 5$ mm et $d_2 = 10$ mm.

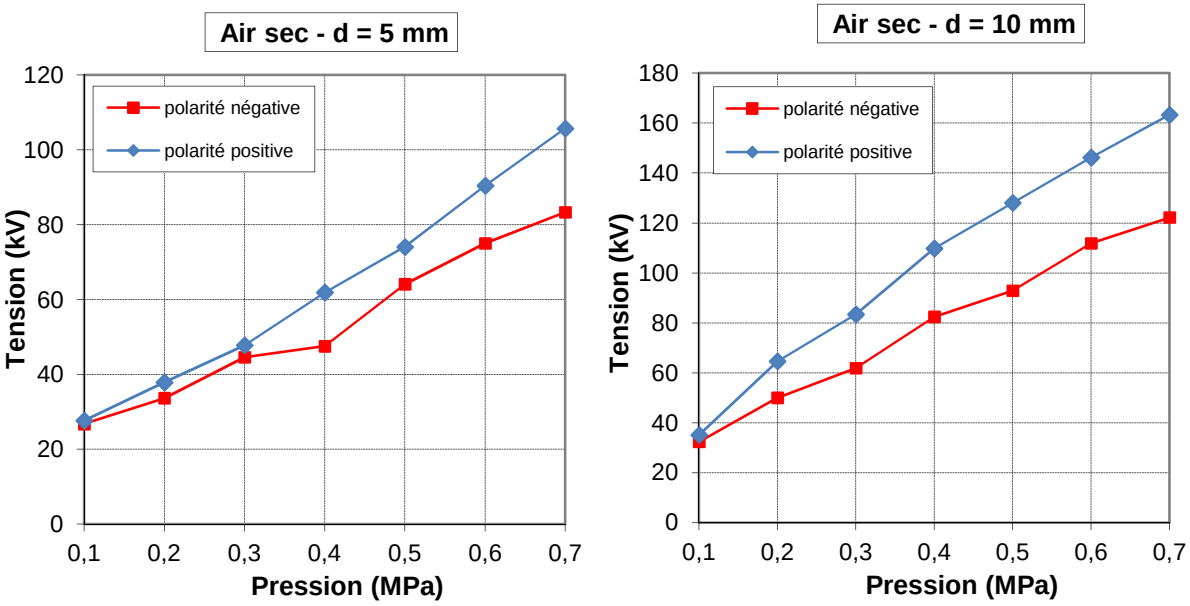


Figure 2.9. *Tenue diélectrique de l'air sec en champ quasi-uniforme (sphère - plan) pour deux distances inter-électrodes 5 et 10 mm, sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

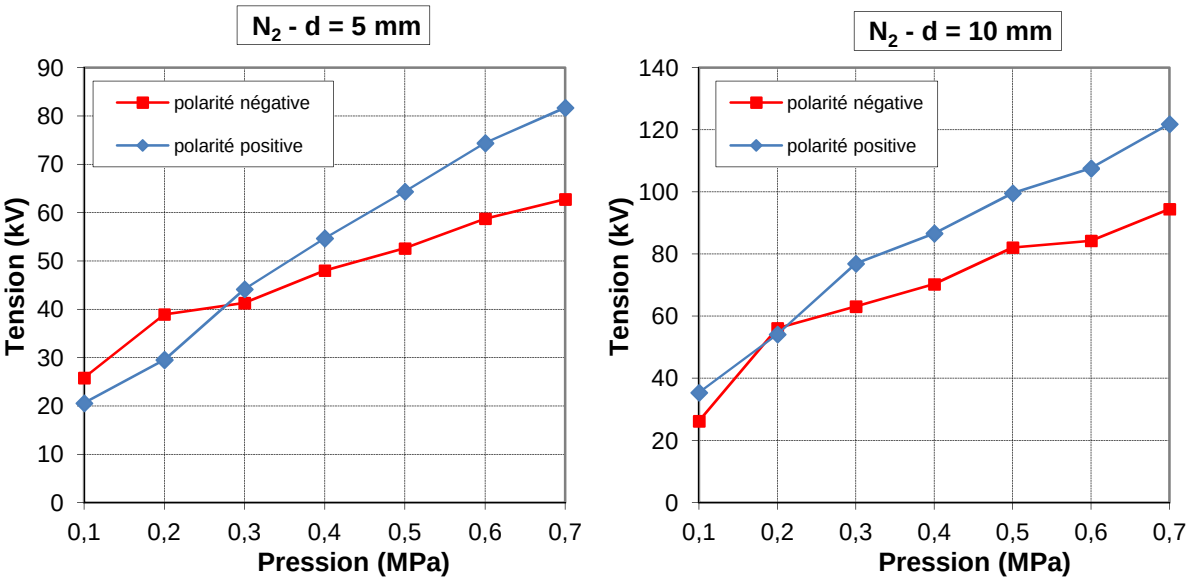


Figure 2.10. *Tenue diélectrique du N_2 en champ quasi-uniforme (sphère - plan) pour deux distances inter-électrodes 5 et 10 mm, sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

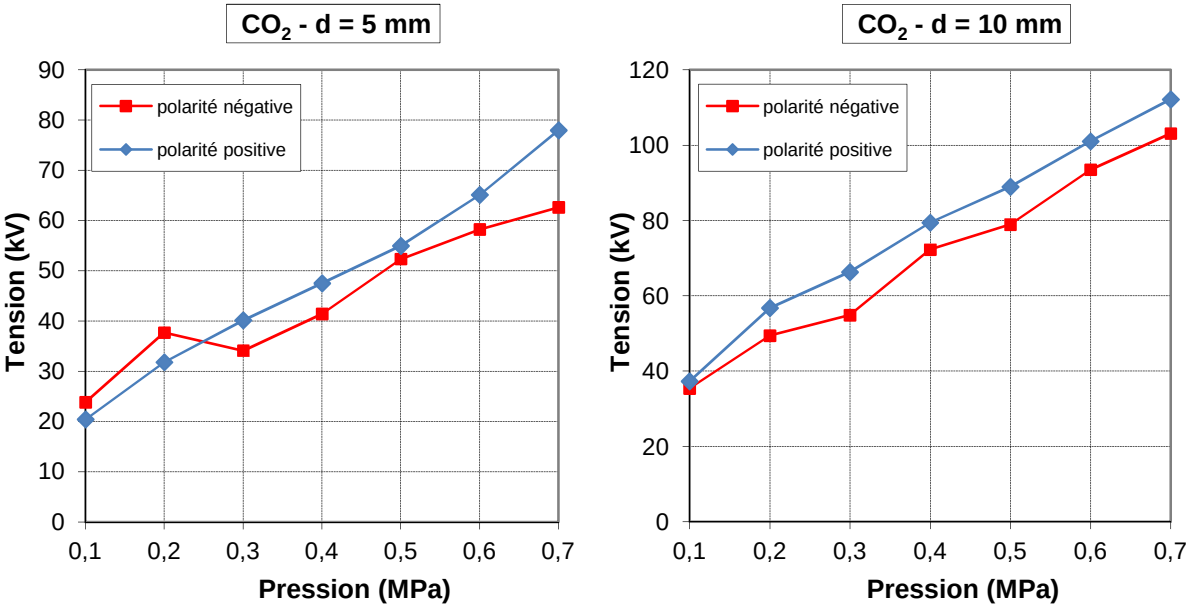


Figure 2.11. *Tenue diélectrique du CO_2 en champ quasi-uniforme (sphère - plan) pour deux distances inter-électrodes 5 et 10 mm, sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

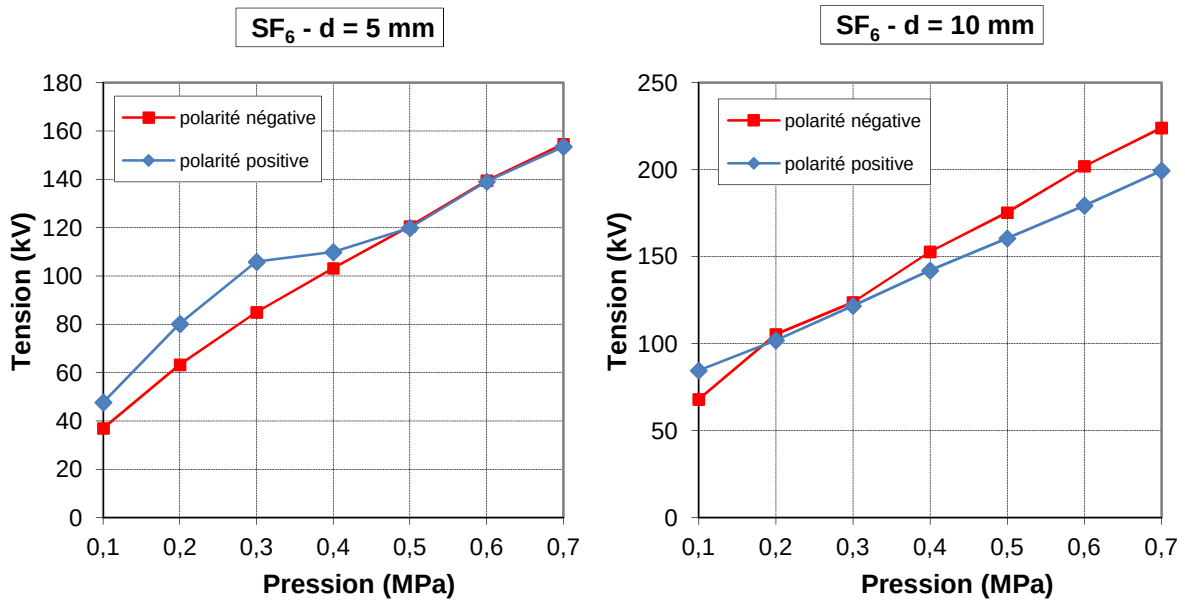


Figure 2.12. *Tenue diélectrique du SF_6 en champ quasi-uniforme (sphère - plan) pour deux distances inter-électrodes 5 et 10 mm, sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

Les résultats obtenus montrent que la tension de claquage en polarité positive V_{cp} de l'air sec est toujours supérieure à celle en polarité négative $V_{cn,}$ quelle que soit la valeur de la pression et ce pour les deux distances inter-électrodes (Figure 2.9).

Pour le N_2 avec un β_1 = 1.82, V_{cn} est supérieure à V_{cp} pour des pressions allant jusqu'à 0.3 MPa et puis c'est l'inverse (Figure 2.10). Pour β_2 = 2.7, V_{cp} est supérieure à V_{cn} sauf pour une pression de 0.2 MPa où elle est légèrement plus faible.

Les résultats obtenus avec le CO_2 sont similaires à ceux obtenus avec le N_2, mais l'inversion est observée pour β_1 = 1.82 à 0.25 MPa (Figure 2.11). Par contre, aucune inversion n'est observée avec β_2 = 2.7 et la tension de claquage en polarité positive est toujours plus élevée qu'en polarité négative.

En ce qui concerne le SF_6, V_{cp} est supérieure à V_{cn} jusqu'à 0.5 MPa avec β_1 = 1.82 (Figure 2.12), puis elles sont pratiquement identiques jusqu'à 0.7 MPa (pression maximale utilisée). Avec β_2 = 2.7, V_{cn} est supérieure à V_{cp} sauf pour des pressions inférieures à 0.3 MPa où elle est légèrement plus faible.

3.2. Résultats en champ non uniforme (pointe - plan)

3.2.1. Gaz purs

Pour étudier le comportement de ces gaz et illustrer l'influence de la polarité de la tension en champ divergent, nous avons utilisé la configuration d'électrodes pointe - plan avec une distance inter-électrodes fixée à 20 mm. Pour cette configuration, nous avons considéré quatre gaz purs (N_2, SF_6, l'air sec, CO_2) à des pressions allant de 0.1 à 0.5 MPa (valeur absolue). Les résultats de mesure de la tenue diélectrique des gaz sont donnés en Figure 2.13.

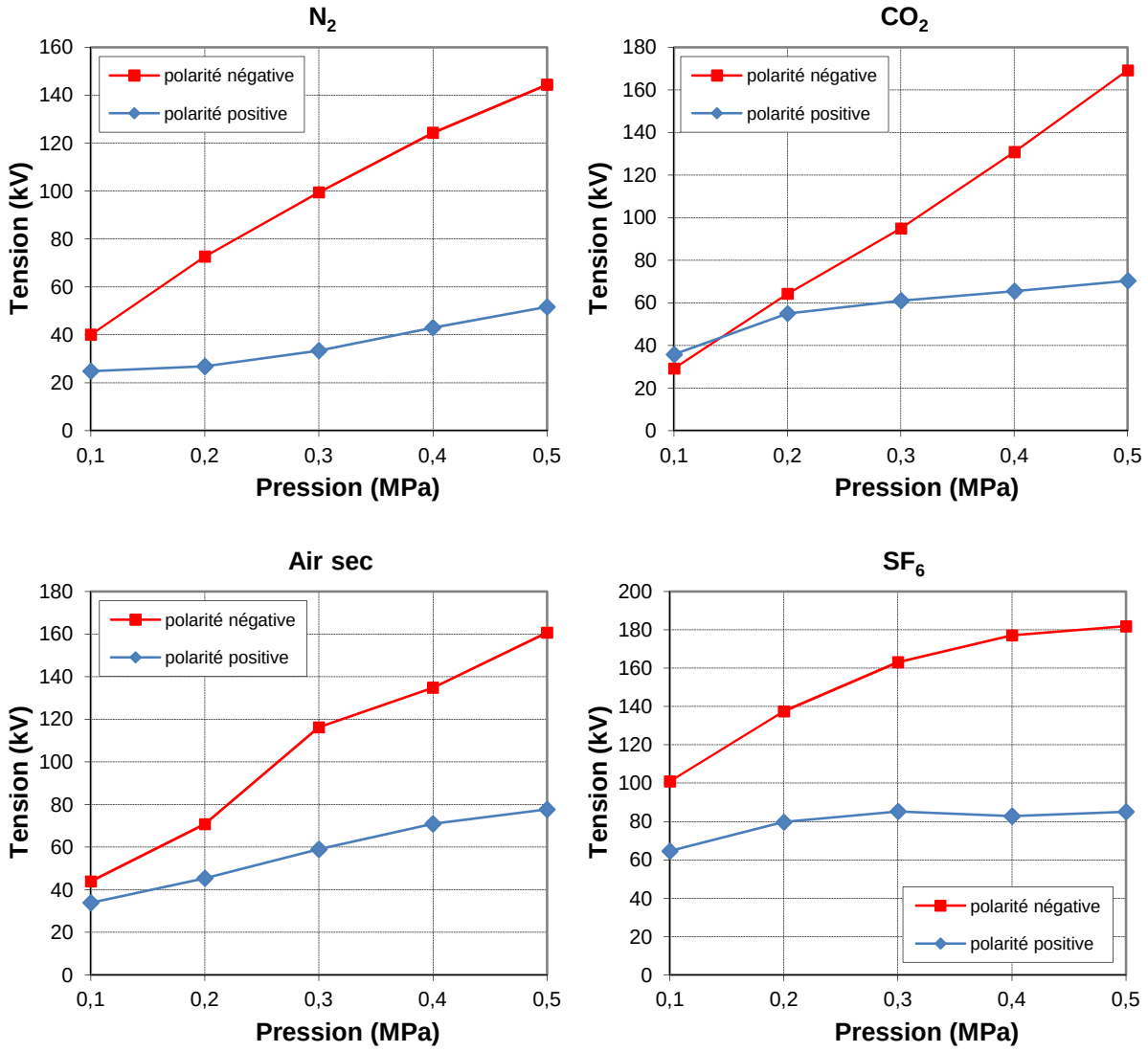


Figure 2.13. *Tenue diélectrique des gaz en champ non uniforme (pointe - plan) pour une distance inter-électrodes de 20 mm sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

Pour tous les gaz purs étudiés, on remarque que la tenue diélectrique en polarité négative est beaucoup plus élevée que celle en polarité positive quelle que soit la pression. Ce qui indique qu'en pointe - plan, la polarité positive est la polarité la plus contraignante.

Ce phénomène, souvent observé dans les gaz en configuration pointe - plan, est dû à la présence de la charge d'espace qui influence différemment le mécanisme de claquage selon la polarité de la tension appliquée à la pointe.

En polarité positive les électrons créés au niveau de la pointe seront absorbés immédiatement par l'anode du fait de leur grande mobilité comparée à celle des ions. Il en résulte l'apparition d'une charge d'espace positive induisant un renforcement local du champ électrique lequel devient supérieur au champ électrique externe comme le montre la Figure 2.14. Ce champ élevé au niveau du front de la décharge, facilite sa propagation vers la cathode.

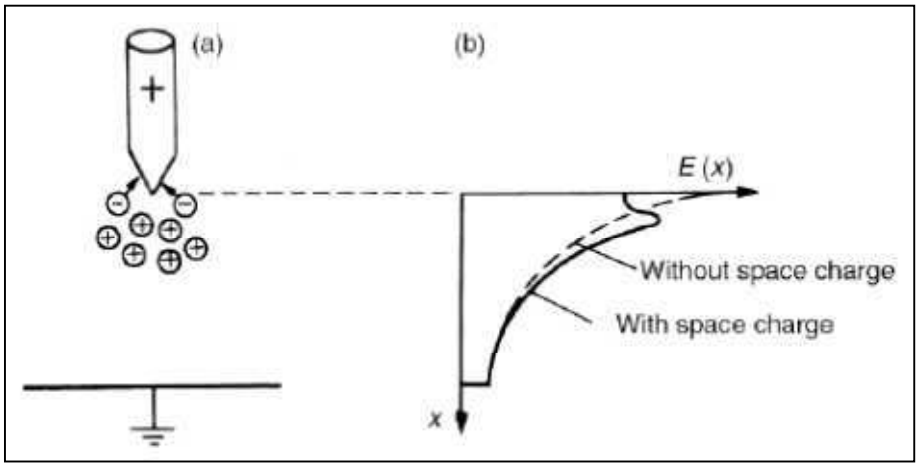


Figure 2.14. *Influence de la charge d'espace sur la distribution du champ électrique inter-électrodes en polarité positive* [96]

En polarité négative, les électrons se déplacent vers le plan (région où le champ est faible) en laissant une charge d'espace positive autour de la pointe. Le champ est toujours renforcé vers la pointe mais sur une zone plus réduite qu'en polarité positive (Figure 2.15). La condition de propagation de la décharge est plus difficile à atteindre et il faut continuer à augmenter la tension pour que le processus se développe. Ainsi, en champ non homogène, la tension de claquage en polarité négative est souvent plus élevée que celle en polarité positive

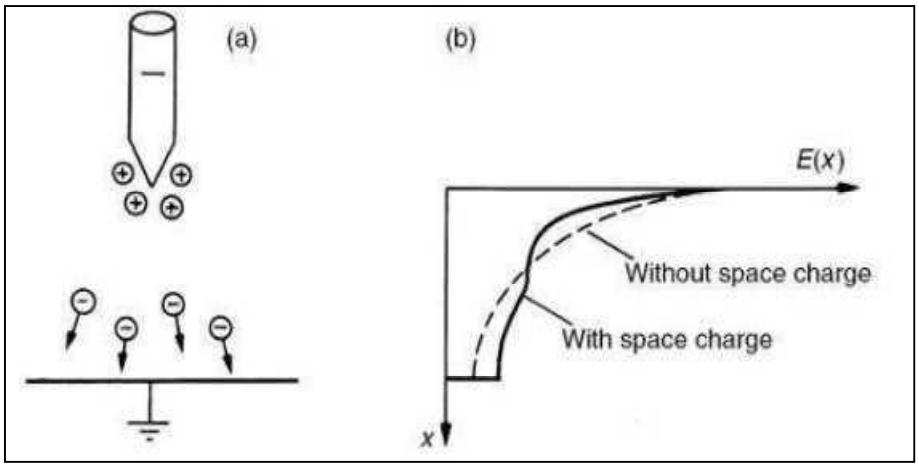
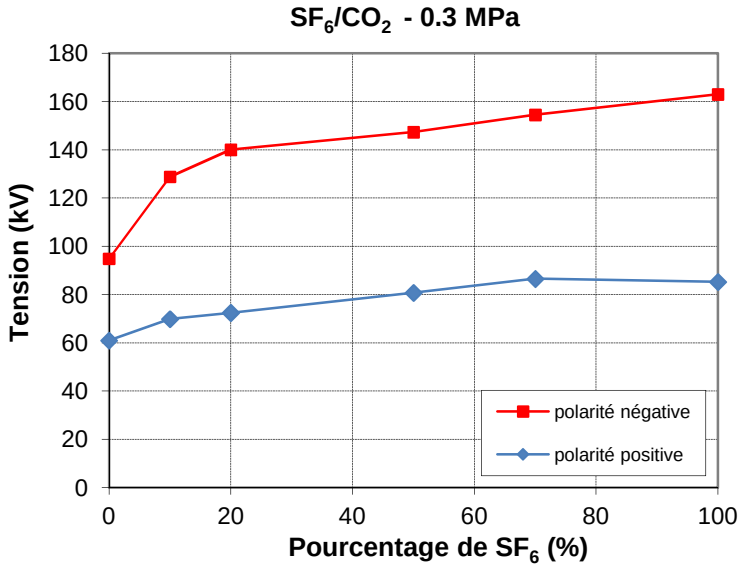


Figure 2.15. *Influence de la charge d'espace sur la distribution du champ électrique inter-électrodes en polarité négative* [96]

3.2.2. Mélanges de gaz

Pour les mélanges de gaz, les essais sont également réalisés sous tension impulsionnelle (choc de foudre) pour les deux polarités, en géométrie pointe - plan avec une distance inter-électrodes de 20 mm. Pour les trois types de mélange, plusieurs concentrations de SF_6 ont été utilisées à savoir 10%, 20%, 50% et 70% de SF_6 dans les gaz purs (N_2, CO_2 et air sec). Les tensions de claquage des mélanges SF_6 - N_2, SF_6 - CO_2 et SF_6 - air sec, en fonction du pourcentage de SF_6 à une pression absolue de 0.3 MPa sont présentées sur la Figure 2.16.



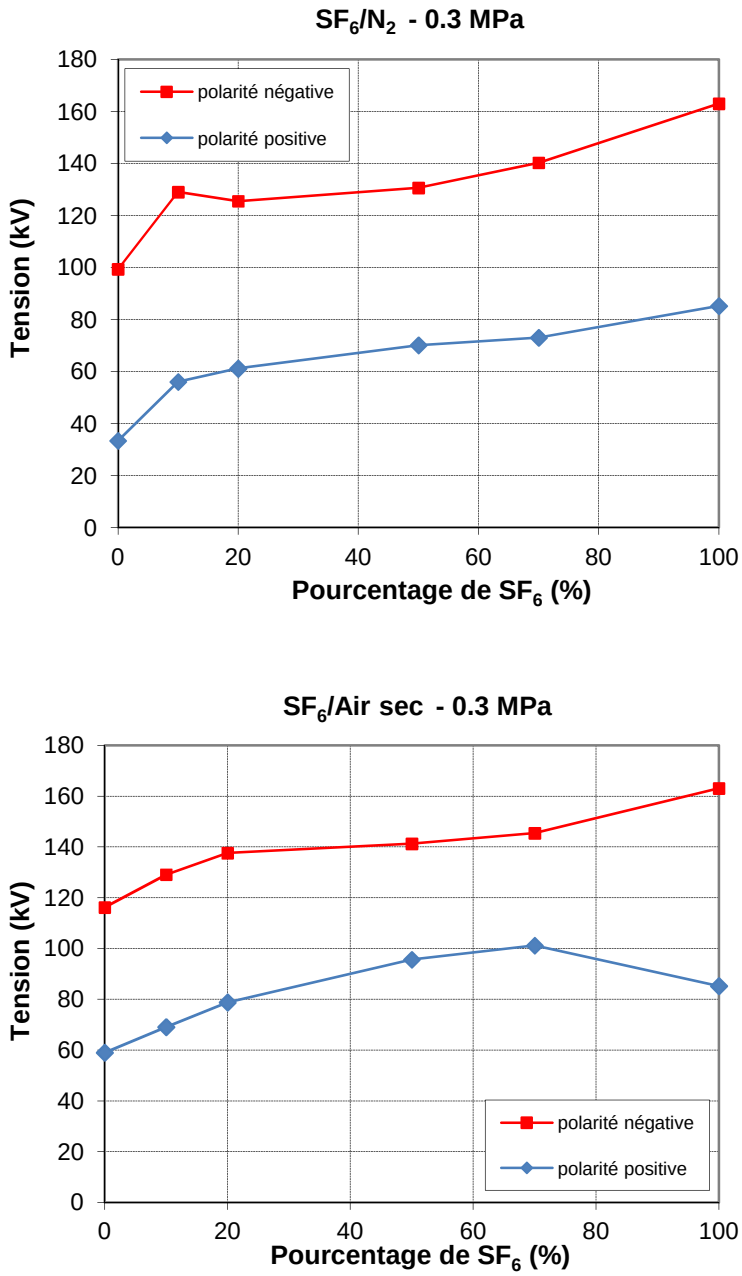


Figure 2.16. *Tenue diélectrique des mélanges de gaz en fonction du pourcentage de SF_6, en champ non uniforme (pointe - plan) pour une distance inter-électrodes de 20 mm sous tension impulsionnelle (polarité positive et négative)*

D'après ces caractéristiques, la tension de claquage V_c de tous les mélanges étudiés, est largement supérieure en polarité négative qu'en polarité positive, comme c'était le cas pour les gaz purs.

Pour les deux polarités de tension, l'addition d'une quantité de SF_6 dans les gaz (CO_2, N_2 et air sec) engendre une augmentation de V_c. L'évolution de la tenue diélectrique en fonction de la concentration de SF_6 augmente rapidement pour des pourcentages inférieurs à 10%, puis lentement, à des concentrations plus élevées. Des résultats identiques ont été rapportés par N. H. Malik et *al* [51].

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mesuré la tension de claquage de différents gaz et mélanges sous tension impulsionnelle. Deux systèmes d'électrodes ont été étudiés (sphère - plan et pointe - plan) dans le but de mieux comprendre le comportement de ces gaz dans des configurations de champs quasi-uniforme et divergent. Afin d'illustrer l'effet de la polarité sur la tenue diélectrique des gaz testés, les essais ont été effectués dans les deux polarités positive et négative.

Les résultats obtenus en champ non uniforme (pointe - plan) ont montré que pour les gaz purs, la tension de claquage est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive et cela quelle que soit la pression. Ce qui n'est pas le cas pour le système sphère - plan où l'effet de la polarité dépend de la distance inter-électrodes *d*, du type et de la pression des gaz.

Pour les mélanges de gaz, la tenue diélectrique en champ non uniforme est toujours supérieure en polarité négative qu'en polarité positive quelle que soit la teneur en SF_6. L'ajout d'une faible quantité de SF_6 permet d'améliorer les performances diélectriques des gaz purs. Cette synergie est meilleure pour les faibles concentrations de SF_6 (inférieures à 10%).

3

DECHARGES PARTIELLES SOUS TENSION ALTERNATIVE

1. Introduction

Les décharges partielles apparaissent au niveau du point triple, point de jonction entre l'isolant solide, le gaz et le métal (électrode), à partir d'une certaine tension dite « tension seuil ». Si ces décharges ne conduisent pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elles sont toutefois préjudiciables par leurs effets. Elles engendrent une dégradation du matériau diélectrique et donc une diminution de la durée de vie du système.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'analyse de ces décharges partielles sous tension alternative (50 Hz) dans une structure isolante mixte solide/gaz. Nous présentons d'abord les différents éléments du dispositif expérimental utilisé dans nos essais ainsi que les caractéristiques des échantillons solides et gaz isolants considérés. Par la suite, nous analysons la distribution des impulsions de décharges partielles en fonction de la phase et de l'amplitude de la tension appliquée. Nous terminons par l'étude de la charge apparente maximale pour cette isolation mixte solide/gaz en fonction de différents paramètres tels que la polarité et l'amplitude de la tension, la nature et l'épaisseur de l'isolateur solide, la pression et le type du gaz isolant.

2. Dispositif de mesure et procédures expérimentales

Le dispositif expérimental est constitué d'une cellule d'essais, de la source de tension, d'un système de mesures de décharges partielles et d'un système de régulateurs (robinets) identique à celui de la précédente installation permettant de remplir la cellule d'essais et de gérer la pression des gaz (mélanges). La Figure 3.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental utilisé.

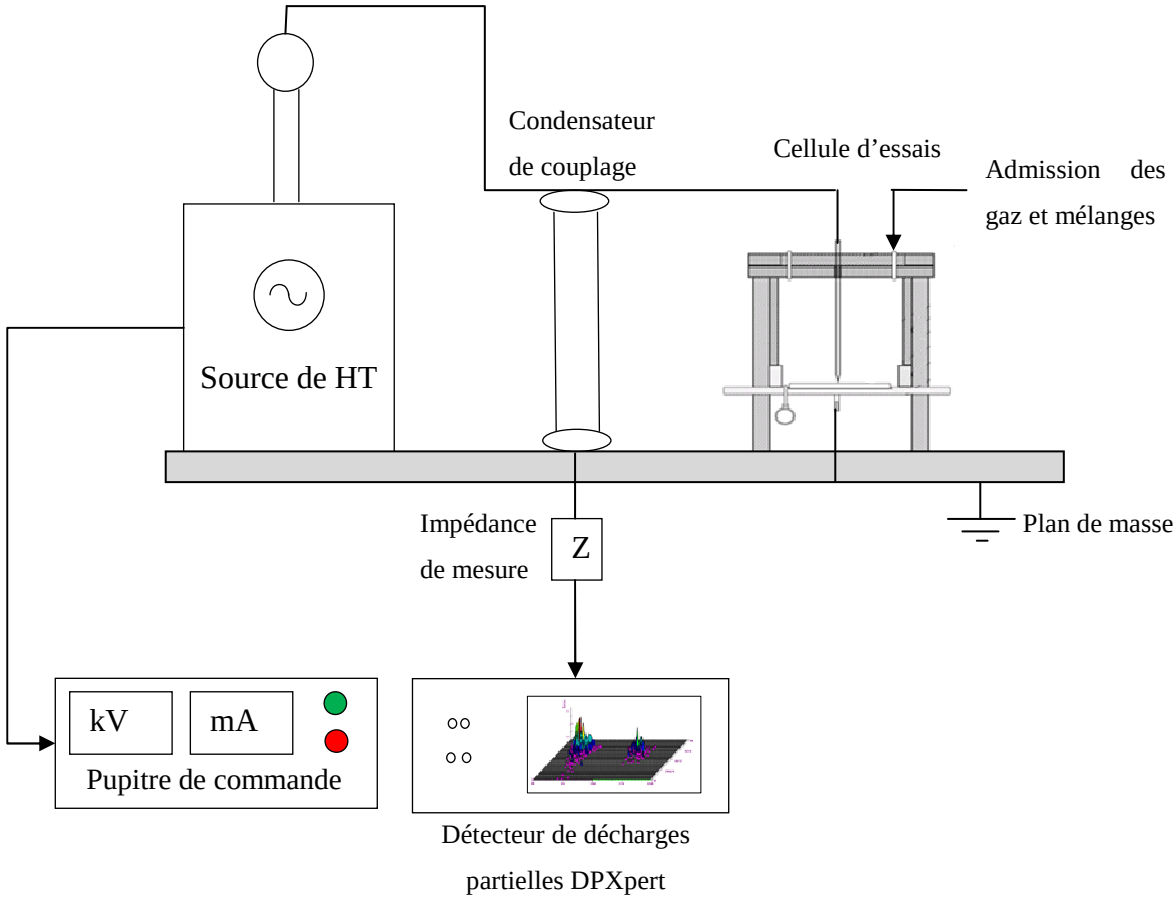
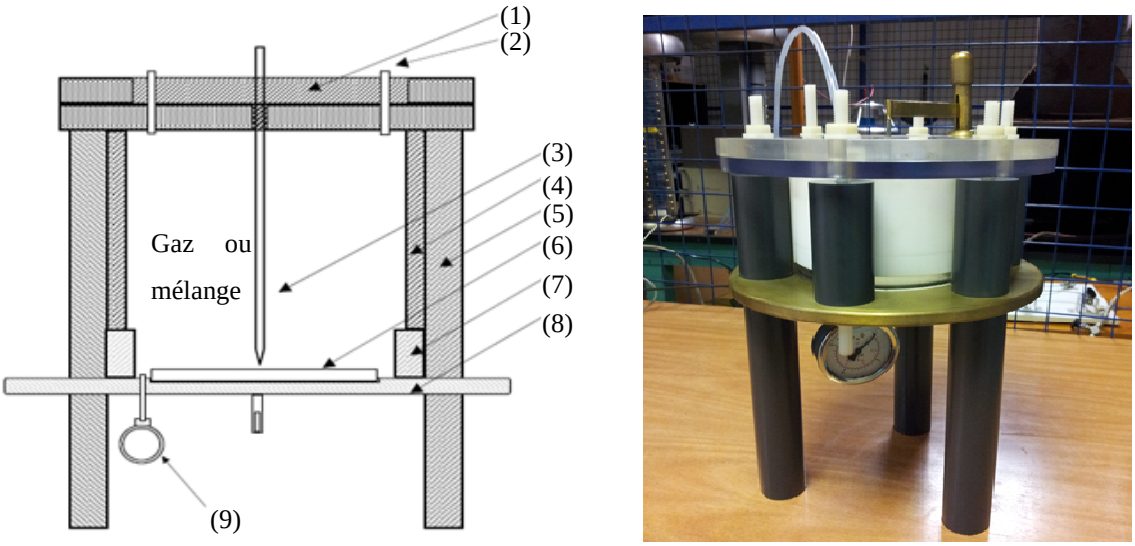


Figure 3.1. *Schéma de l'ensemble du dispositif expérimental*

2.1. Cellule d'essais

La cellule d'essais, contenant la structure isolante solide/gaz étudiée et le système d'électrodes pointe - plan, est constituée d'un corps cylindrique de 90 mm de hauteur et 110 mm de diamètre interne (Figure 3.2); elle est munie de deux couvercles circulaires. Le couvercle supérieur est en Plexiglas (transparent) servant à la visualisation des décharges et à la fixation de l'électrode pointe, connectée à la source haute tension. Le couvercle inférieur constituant également l'électrode de mise à la terre est une plaque mince de laiton de 15 mm d'épaisseur et de 250 mm de diamètre. Le corps cylindrique est lui-même constitué de deux parties : la partie supérieure de 70 mm de hauteur est en téflon et la partie inférieure est en Plexiglas de 20 mm de hauteur. Cette partie transparente permet le contrôle du contact de l'électrode pointe avec l'isolant solide. L'électrode pointe, dont le rayon de courbure est de 10 µm est réalisée dans du tungstène thorié à 2%. L'utilisation du tungstène (point de fusion est d'environ 3460°C) permet d'effectuer un très grand nombre d'essais sans trop éroder la tête

de la pointe et d'avoir un champ local de génération de décharges relativement constant. La pointe est contrôlée au cours des essais ; elle est remplacée dès que son profil devient différent de celui de départ. La cellule est entièrement démontée et nettoyée après chaque série d'essais.



1. Couvercle en plexiglas
2. Admission gaz/mélange
3. Electrode pointe
4. Corps cylindrique en Téflon
5. Tige en PVC
6. Echantillon solide
7. Cylindre en plexiglas
8. Electrode plane en laiton
9. Manomètre

Figure 3.2. *Schéma de la cellule d'essais avec la structure isolante et vue réelle de la cellule*

2.2. Gaz et diélectriques solides utilisés

La structure isolante étudiée est constituée d'échantillons solides insérés entre les deux électrodes en présence des gaz ou mélanges. Les isolants solides utilisés sont des disques de 100 mm de diamètre et d'épaisseur variant de 2 à 10 mm. Les matériaux utilisés sont le verre et la résine époxy dont les constantes diélectriques sont 5 et 3.5 respectivement. Les gaz considérés sont le SF_6, N_2 et CO_2 et leurs mélanges (SF_6 - CO_2 et SF_6 - N_2). Les différents taux de mélange sont calculés suivant la loi des pressions partielles de Dalton de la même manière que dans le chapitre précédent.

2.3. Source de tension

Les essais sont effectués sous tension alternative sinusoïdale fournie par un transformateur (HT) d'essais à fréquence industrielle de 50 Hz, réglable de 0 à 50 kV à l'aide d'un boîtier de commande. La tension est appliquée progressivement et maintenue à sa nouvelle valeur pendant la durée de l'enregistrement.

2.4. Dispositif de mesure et détection des décharges partielles

Le système de mesure de décharges partielles comporte :

- Une impédance de détection.
- Un calibrateur portable.
- Un mesureur de décharges partielles relié à un ordinateur intégré de type PC-Pentium.

2.4.1. Impédance de détection – ZDP 10

La ZDP10 est une impédance de détection pour les signaux de décharges partielles. Elle se présente dans un boîtier blindé. Le signal sortant du condensateur de couplage est constitué par des impulsions des décharges partielles est une résiduelle de 50 Hz de l'alimentation HT. La quasi-totalité de la résiduelle du 50 Hz est filtrée par la ZDP.

2.4.2. Calibrateur portable (ETL-X)

ETL-X est un calibrateur portable à pile. Il est adapté pour l'étalonnage d'un grand nombre de circuits de tests en décharges partielles. Il délivre des séries d'impulsions dont le temps de montée est inférieur à 20 ns. Le taux de répétition de 2, 4, 8 ou 16 impulsions par périodes de 50 Hz, est réglable par l'intermédiaire d'un commutateur.

2.4.3. Le mesureur de décharges partielles

La détection des décharges est effectuée grâce au détecteur de décharges partielles de type (DPXpert), connecté en parallèle avec la cellule d'essais à travers un condensateur de

couplage de type CK-150, d'une valeur de 1092 pF. Un soin particulier doit être apporté aux connexions haute tension afin d'éviter qu'elles ne soient le siège de décharges. Le dispositif de mesure est installé à l'intérieur d'une cage de Faraday permettant ainsi d'atténuer le niveau de bruit dû aux parasites ; les appareils d'enregistrement et de mesure sont placés à l'extérieur.

Ce système nous permet l'acquisition simultanée de l'amplitude d'un signal de "décharges partielles" proportionnelle à la charge apparente et de sa position par rapport à la phase de la tension. Il est muni d'un logiciel d'acquisition qui nous permet de fixer certains paramètres de l'expérience : la gamme de fréquence, la calibration, la durée d'acquisition, le niveau de l'amplification. Le logiciel permet aussi de calculer pour chaque polarité, les grandeurs caractérisant les décharges partielles (Charge apparente maximale, phase, nombre de décharges...).

L'utilisation de cet appareil de mesure est précédée des opérations suivantes:

- Un calibrage préalable est nécessaire avant chaque utilisation. Cela est effectué en employant une technique standard qui consiste à injecter des impulsions dont la charge est connue et de mesurer le signal de sortie enregistré sur le détecteur de décharges partielles. Le calibrateur doit être relié en parallèle avec la cellule d'essais contenant la structure isolante à tester. Le calibrage de l'appareil de détection est en fonction des paramètres diélectriques de l'objet ; il est nécessaire de le calibrer à chaque changement d'objet.
- Positionner les impulsions de décharges partielles par rapport à l'onde sinusoïdale de la tension. Cette opération est vérifiée en faisant des essais préliminaires sur un type bien connu de décharges partielles. Dans notre cas, nous avons utilisé une configuration d'un objet métallique à potentiel flottant dans l'air. Il s'agissait d'une configuration où la distribution des décharges partielles en polarité positive sont centrées à 90° et celles en polarité négative à 270°.

3. Résultats expérimentaux

Les résultats de mesure de décharges partielles sous tension alternative sont analysés en utilisant la matrice ($\phi\ q\ n$) (phase, charge, nombre) qui donne une représentation visuelle des décharges et de l'amplitude de leur charge apparente en fonction de la phase de tension. Ces décharges sont étudiées en fonction des différents paramètres susceptibles d'influencer leur activité à savoir l'amplitude et la polarité de la tension appliquée, le type et la pression du gaz, la nature et l'épaisseur de l'isolant solide ainsi que la quantité de SF_6 dans les mélanges.

3.1. Activité et localisation des décharges partielles

La distribution des décharges partielles en fonction de la phase de la tension alternative est présentée sur les Figures 3.3 à 3.8. L'enregistrement est effectué pendant 500 cycles de tension (10 s) sur un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 sous une tension alternative de valeur efficace de 6, 8 et 10 kV. On remarque que l'activité des décharges partielles et leur charge apparente augmentent en fonction de la tension appliquée. Le nombre total des décharges passe de 400 à 700 lorsque la tension varie de 6 à 10 kV. Concernant la charge apparente maximale, elle est de 0.3, 1.3 et 5 nC respectivement pour 6, 8 et 10 kV. D'autre part, l'allure des distributions montre l'existence de décharges de plus grande amplitude en polarité positive.

Les décharges partielles sous une tension de 6 kV se situent entre l'intervalle allant de 30° à 130° et 205° à 285°. Lorsque la tension augmente à 10 kV, les décharges se décalent de 20° vers l'arrière ; elles sont centrées à 60° et 240°.

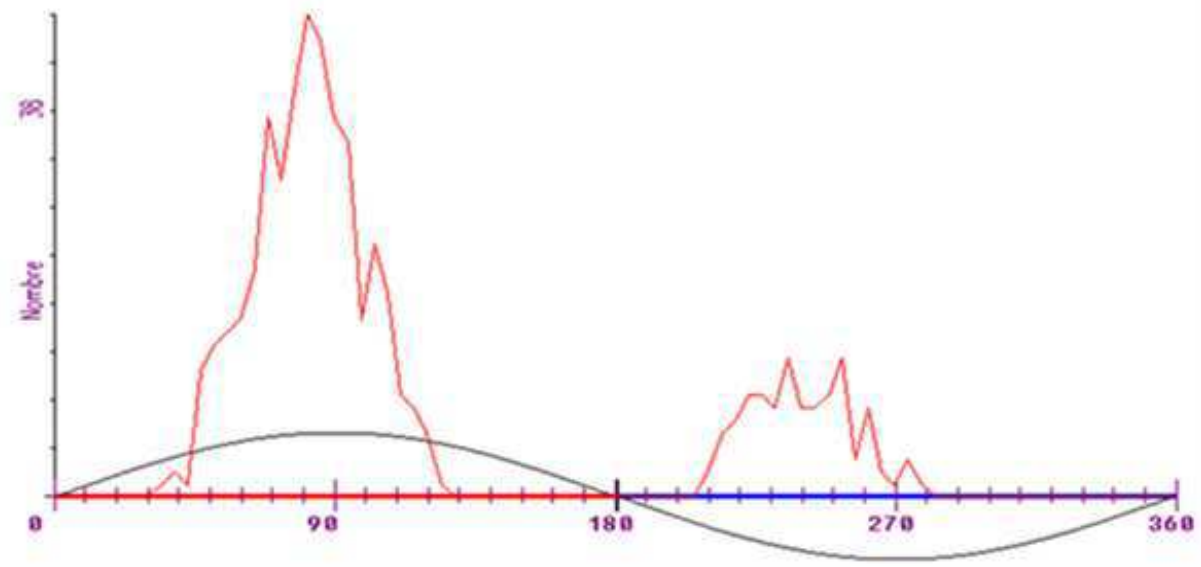


Figure 3.3. *Répartition du nombre de décharges partielles par phase obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression, sous tension alternative de 6 kV*

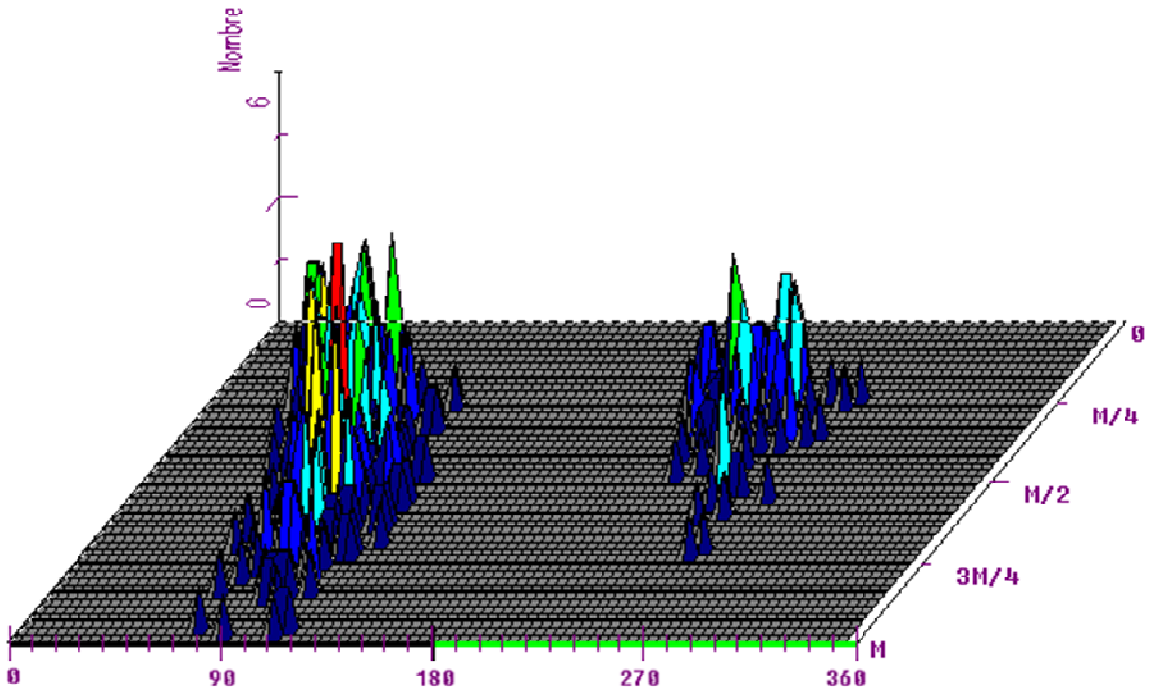


Figure 3.4. *Représentation de la matrice ϕ q n pour un enregistrement de 500 cycles de tension obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression, sous tension alternative de 6 kV. La charge apparente maximale M = 0.3 nC*

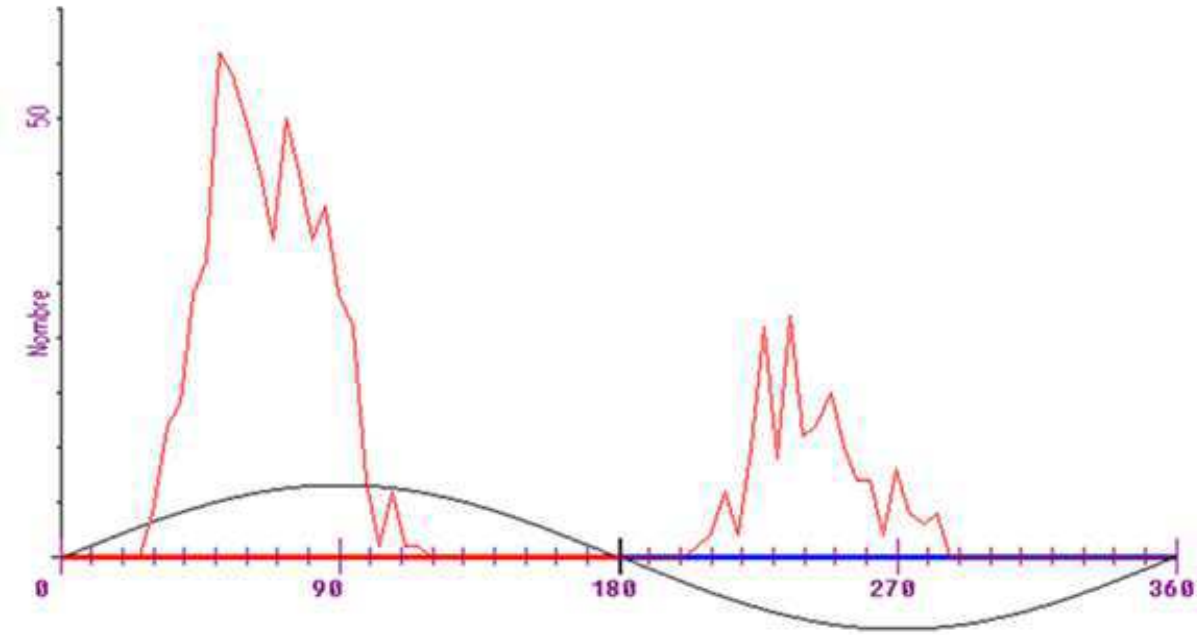


Figure 3.5. *Répartition du nombre de décharges partielles par phase obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression, sous tension alternative de 8 kV*

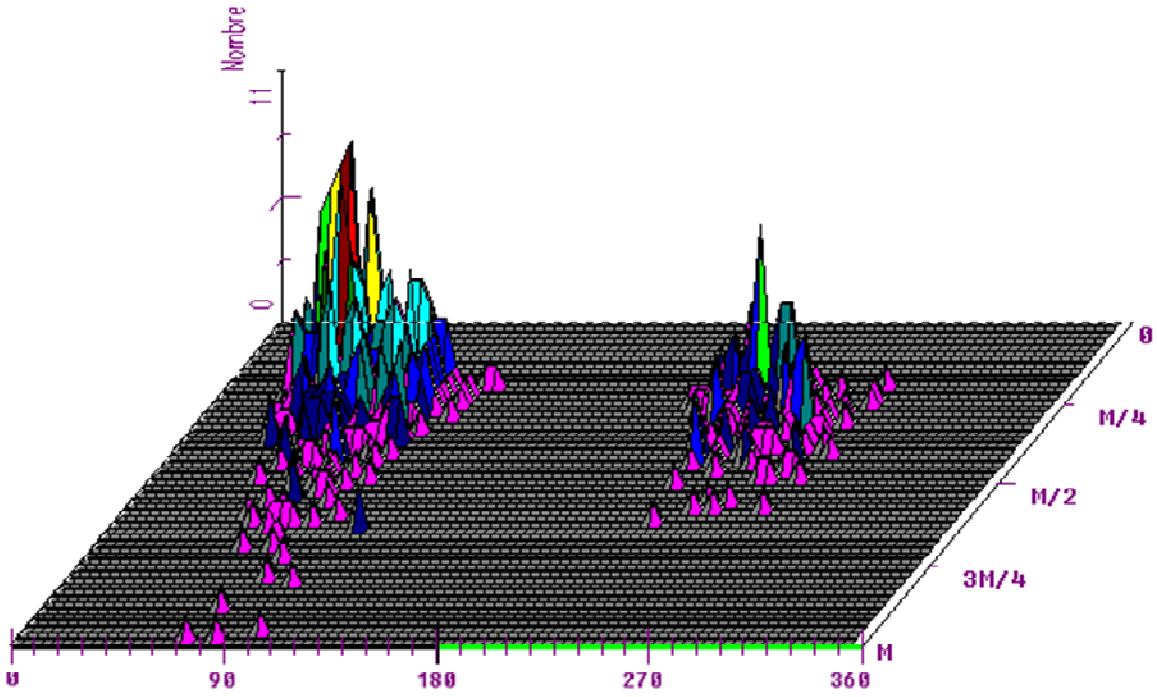


Figure 3.6. *Représentation de la matrice ϕ q n pour un enregistrement de 500 cycles de tension obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression, sous tension alternative de 8 kV. La charge apparente maximale M = 1.3 nC*

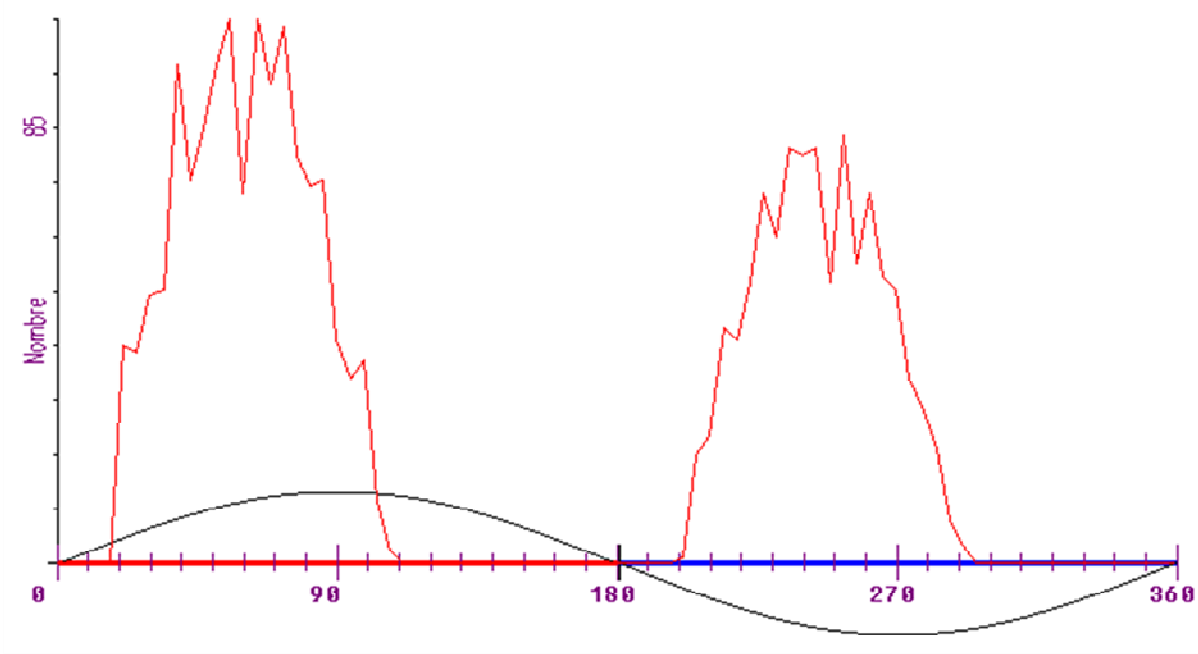


Figure 3.7. *Répartition du nombre de décharges partielles par phase obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression sous tension alternative de 10 kV*

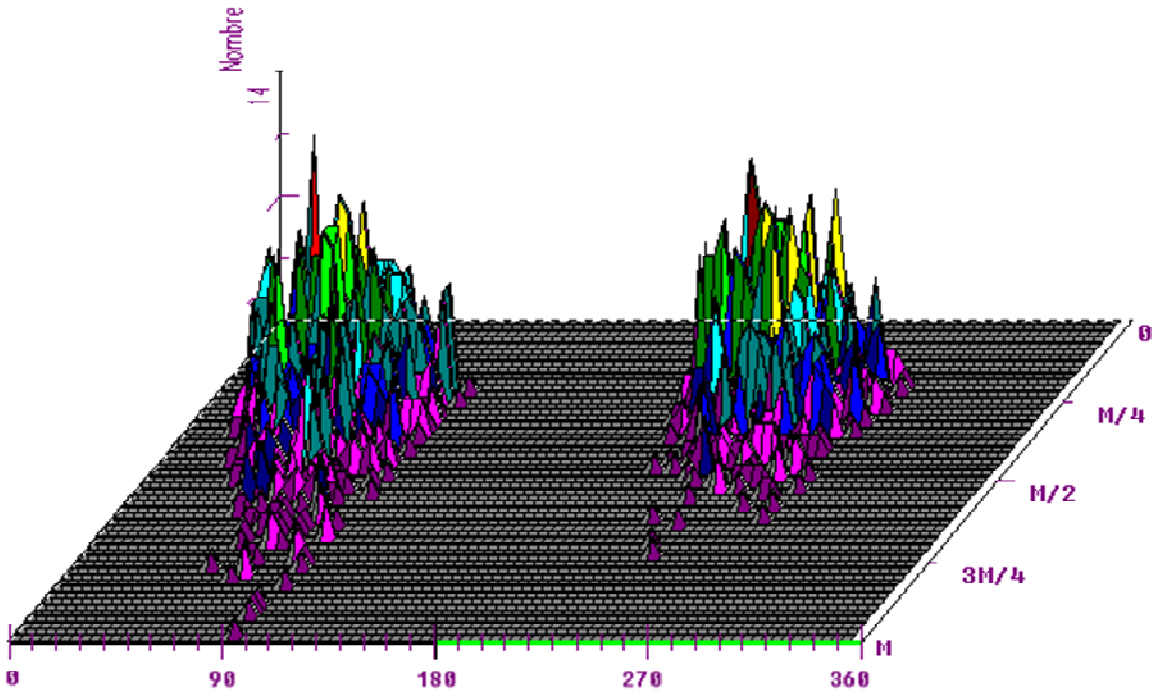


Figure 3.8. *Représentation de la matrice ϕ q n pour un enregistrement de 500 cycles de tension obtenue avec un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.2 MPa de pression, sous tension alternative de 10 kV. La charge apparente maximale M = 5 nC*

3.2. Charge apparente maximale

Dans le but de quantifier l'activité des décharges partielles et de suivre leur évolution en fonction de plusieurs paramètres expérimentaux, nous nous sommes intéressés à la mesure de la charge apparente (valeur maximale), caractéristique principale de ces décharges.

3.2.1. Influence de l'amplitude de la tension, de la nature et de la pression du gaz

La Figure 3.9 montre l'évolution de la charge apparente maximale q_{max} en fonction de l'amplitude de la tension appliquée, obtenue avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur en présence des trois gaz SF_6, N_2 et CO_2 pour différentes valeurs de pression. Chaque valeur de q_{max} représente la moyenne d'une dizaine de mesures réalisées dans les mêmes conditions expérimentales. Pour une meilleur visibilité des résultats, surtout ceux obtenus sous de faibles tensions, nous avons utilisé une présentation en échelle logarithmique qui est la mieux adaptée pour représenter un ensemble de données comportant des valeurs très faibles et d'autres très élevées. Nous remarquons que q_{max} augmente rapidement avec l'amplitude de la tension appliquée quelles que soient la nature et la pression du gaz. Elle diminue lorsque la pression du gaz augmente. Notons aussi que pour une tension et une pression données, les valeurs de q_{max} obtenues avec le gaz SF_6 sont nettement inférieures à celles obtenues avec les gaz N_2 et CO_2. Par exemple, pour le gaz SF_6 à 0.2 MPa de pression et soumis à une tension de 8 kV, les plus grandes décharges sont d'environ 1.4 nC, comparées à environ 14 et 16 nC dans le CO_2 et le N_2 respectivement.

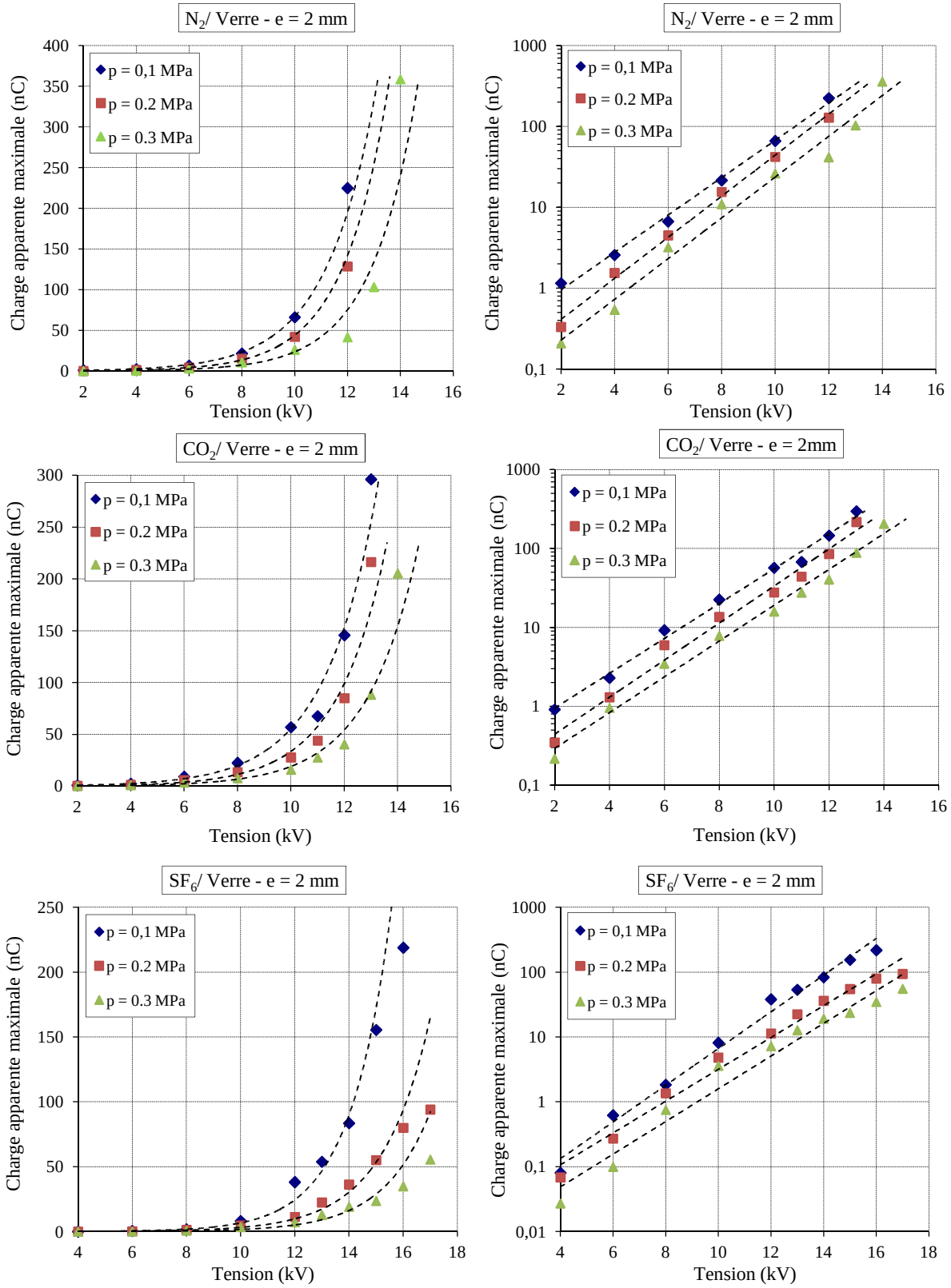
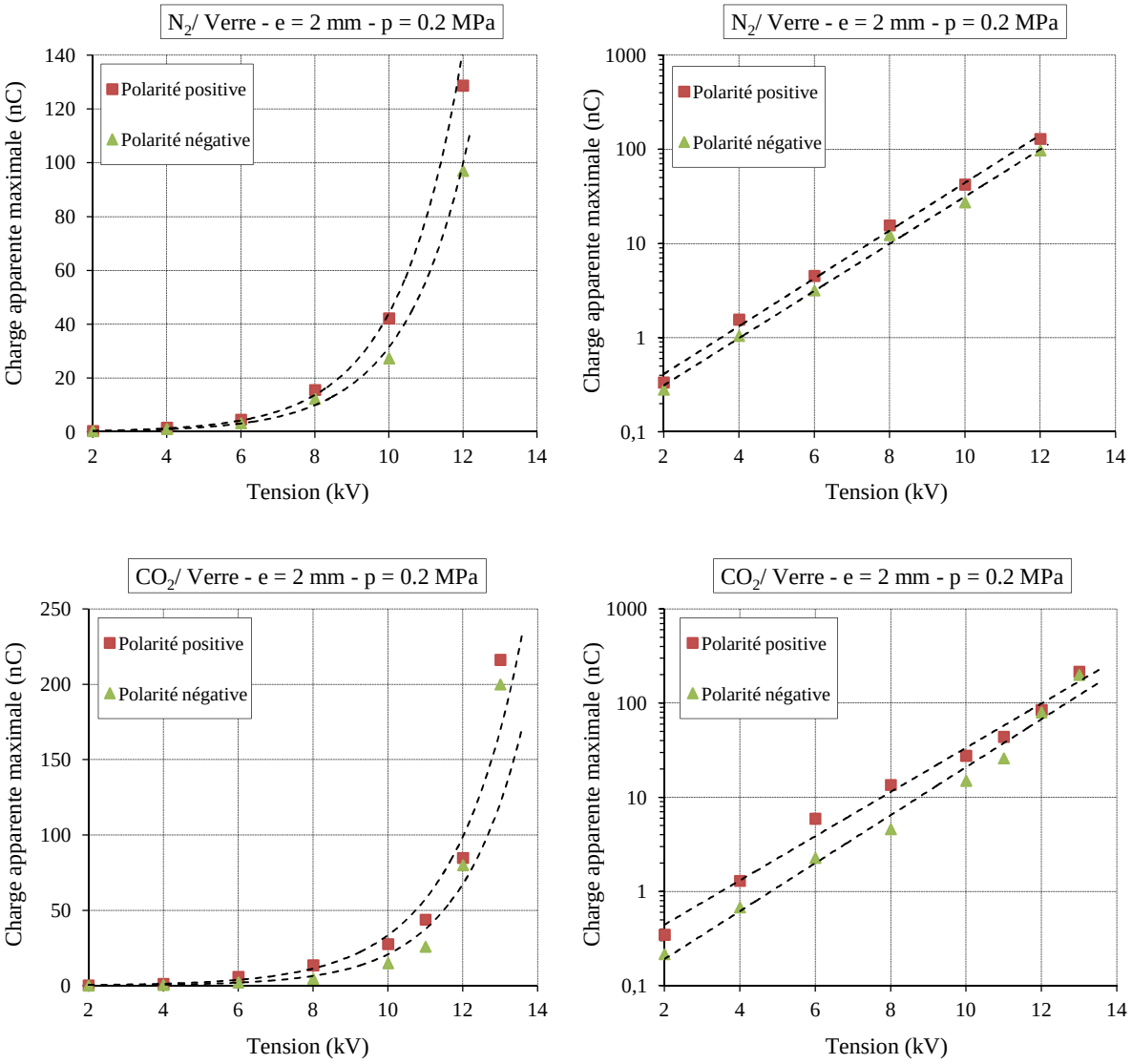


Figure 3.9. *Evolution de la charge apparente maximale des décharges partielles en fonction de la tension appliquée obtenue avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur en présence des trois gaz (N_2, CO_2 et SF_6), sous différentes pressions*

3.2.2. Influence de la polarité de la tension

Une comparaison de l'amplitude des décharges partielles sur les deux alternances positive et négative est illustrée sur la Figure 3.10. Pour les trois gaz étudiés (N_2, CO_2 et SF_6), on remarque que quelle que soit la valeur de la tension appliquée, la charge apparente maximale est plus élevée en alternance positive qu'en alternance négative.



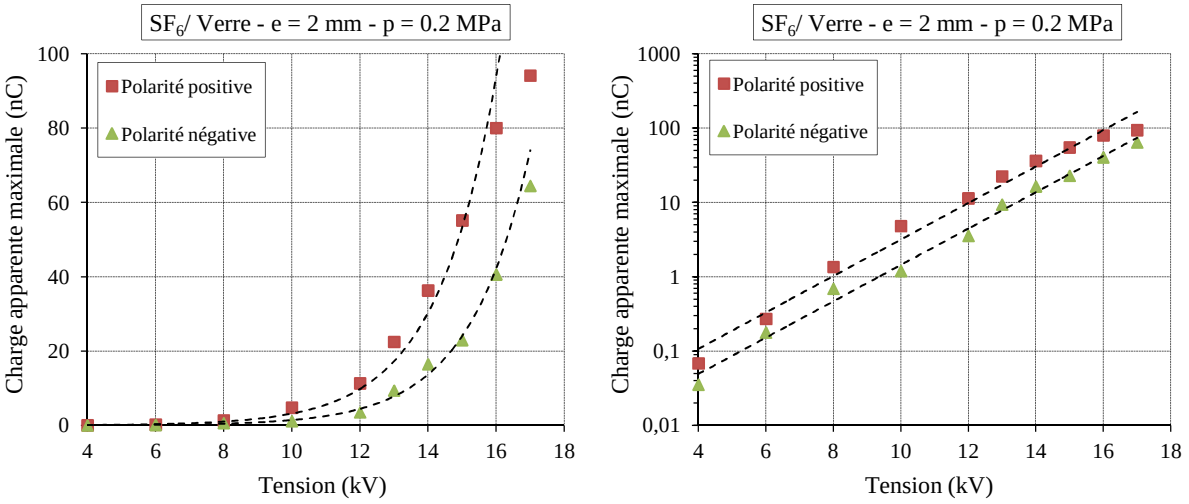


Figure 3.10. *Evolution de la charge apparente maximale des décharges partielles en fonction de l'amplitude et de la polarité de la tension appliquée, obtenue avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur en présence des trois gaz (N_2, CO_2 et SF_6) sous une pression de 0.2 MPa*

3.2.3. Influence du pourcentage de SF_6 dans les mélanges

L'addition du SF_6 dans les gaz purs N_2 et CO_2 provoque une diminution de l'activité des décharges partielles et de leurs charges apparentes maximales q_{max} (Figures 3.11 et 3.12). Cette diminution est proportionnel à la quantité de SF_6 dans les mélanges, plus cette quantité est grande plus la charge générée est faible.

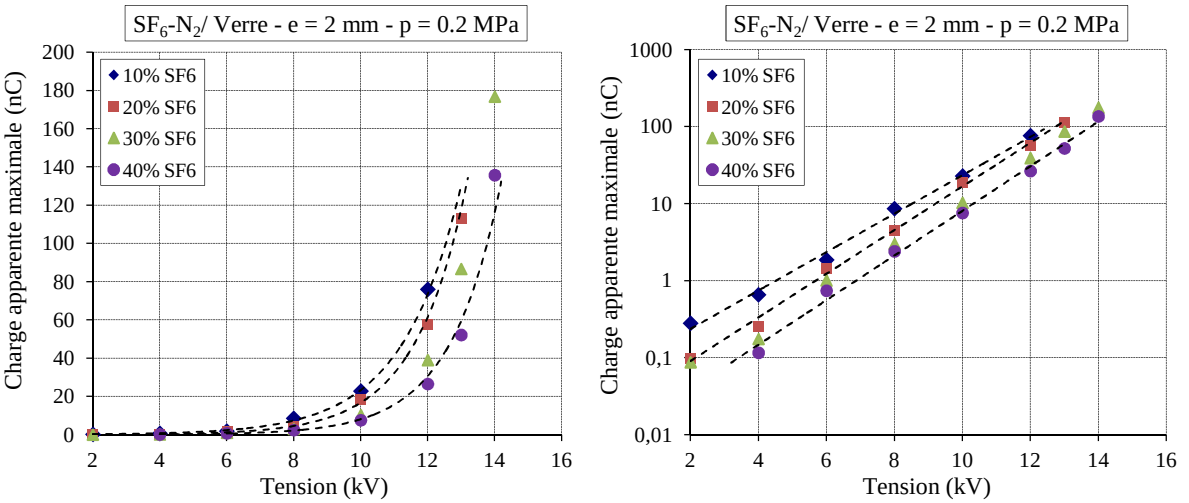


Figure 3.11. *Evolution de la charge apparente maximale des décharges partielles en fonction de la tension appliquée et du pourcentage de SF_6 dans le N_2, obtenue avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur, sous une pression de 0.2 MPa*

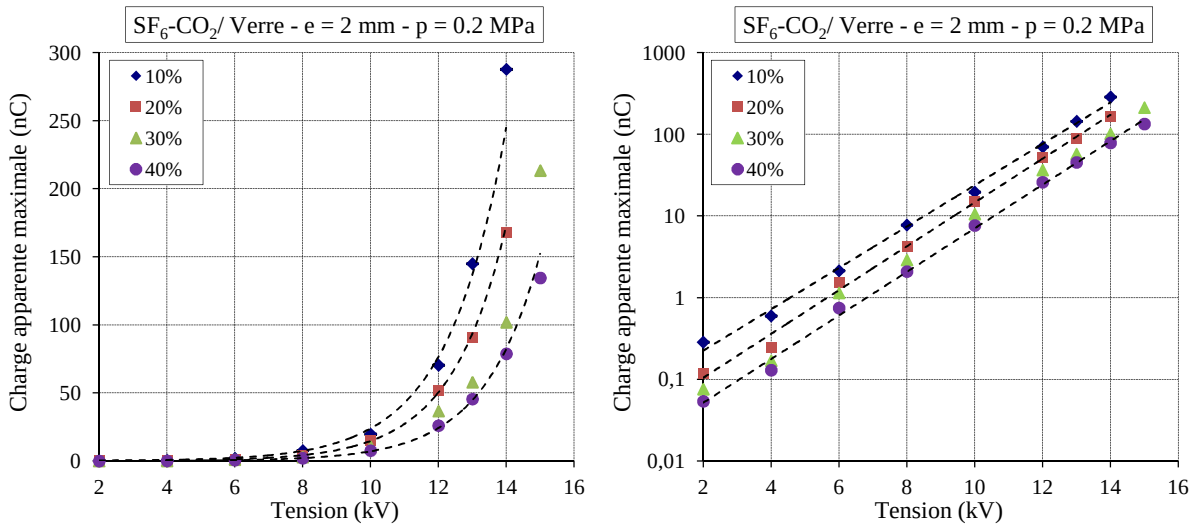


Figure 3.12. *Evolution de la charge apparente maximale des décharges partielles en fonction de la tension appliquée et du pourcentage de SF_6 dans le CO_2, obtenue avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur, sous une pression de 0.2 MPa*

3.2.4. Influence de l'épaisseur du solide

La Figure 3.13 montre les résultats de mesure de la charge apparente maximale q_{max} en fonction de la tension appliquée pour l'échantillon solide en verre de différentes épaisseurs (e = 2, 4 et 6 mm) en présence des gaz sous une pression de 0.2 MPa. Nous remarquons que pour une tension et un type de gaz donnés, l'activité des décharges partielles et la charge de celle-ci diminuent lorsque l'épaisseur augmente. Par exemple, pour le gaz SF_6 à 0.2 MPa soumis à une tension de 12 kV, q_{max} est de 11.4 nC et 3.8 nC obtenue pour des épaisseurs de 2 et 6 mm respectivement.

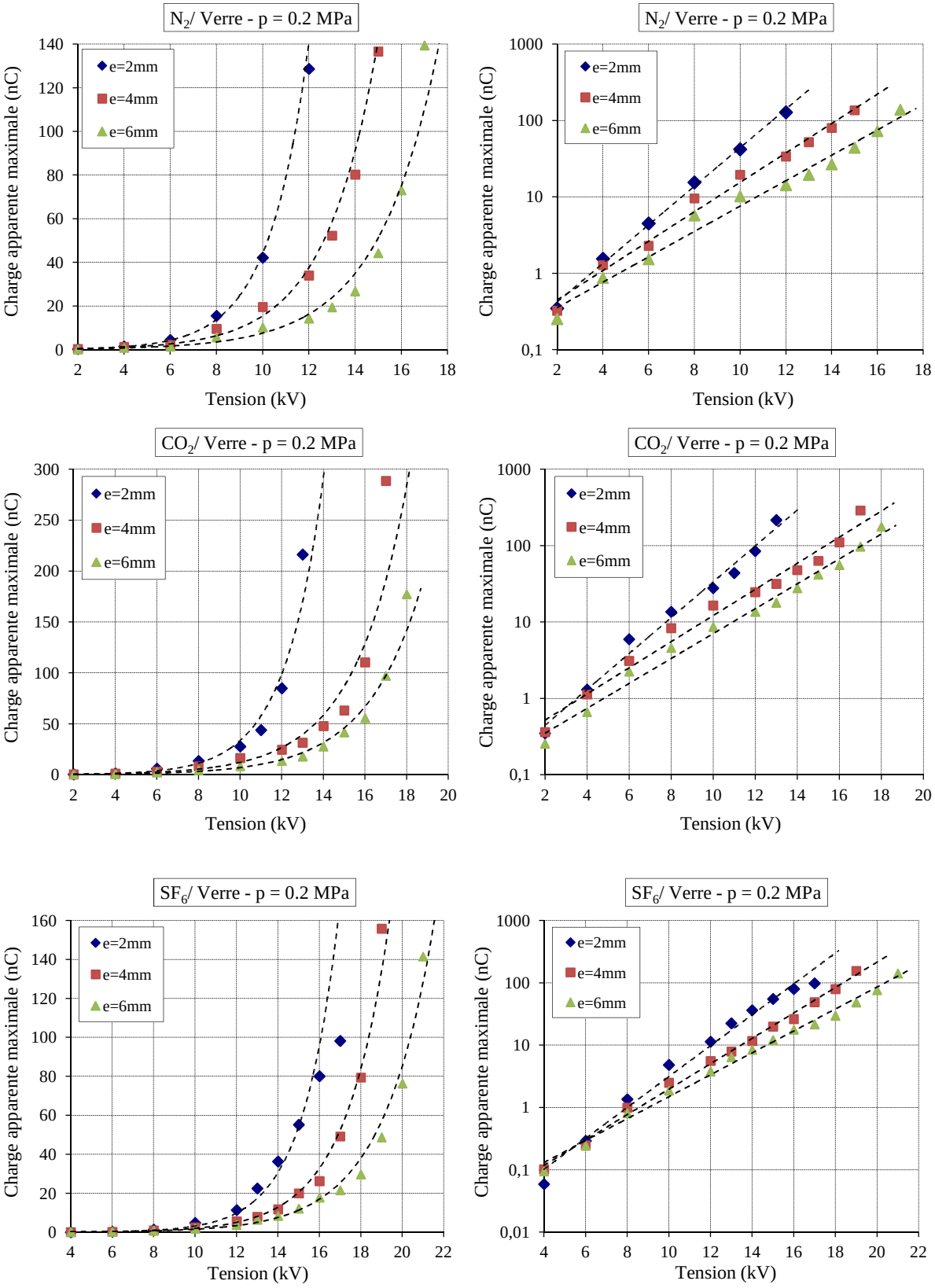
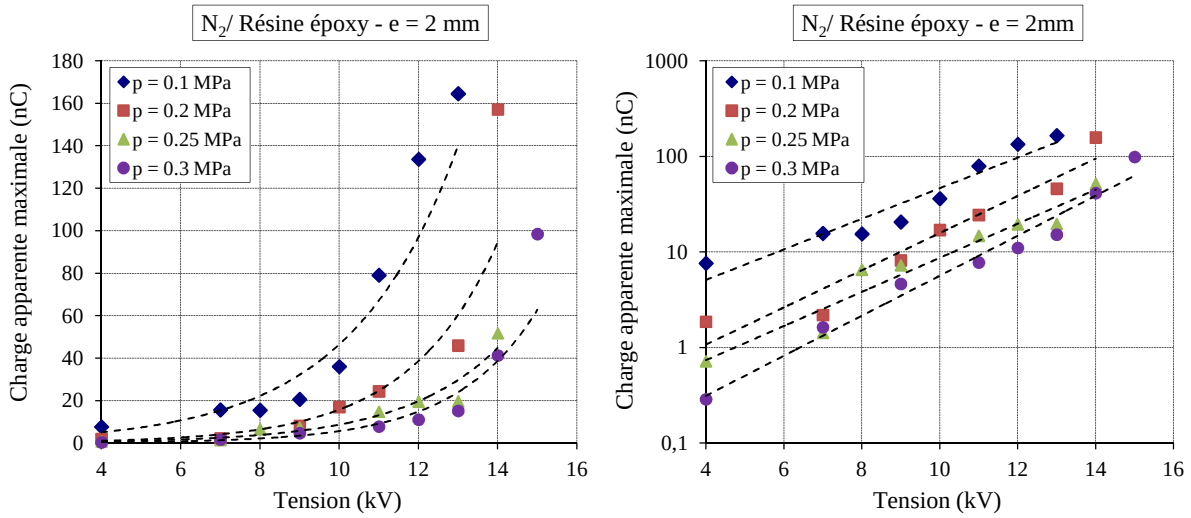


Figure 3.13. *Evolution de la charge maximale des décharges partielles en fonction de la tension appliquée obtenue pour les gaz N_2, CO_2 et SF_6 et avec des échantillons solides en verre de 2, 4 et 6 mm d'épaisseur*

3.2.5. Influence de la nature de l'échantillon solide

Le type du matériau solide influence considérablement la tension d'initiation des décharges partielles, leurs charges apparentes et le nombre total des impulsions. Pour bien illustrer cette influence, nous avons effectué des essais supplémentaires avec un autre type de solide en l'occurrence la résine époxy ; cette dernière est caractérisée par une permittivité (constante diélectrique ε_r) relativement faible (ε_r = 3.5). La Figure 3.14 regroupe les résultats obtenus avec l'échantillon en résine époxy pour les différents gaz et mélanges. Comme dans le cas du verre, la charge apparente maximale q_{max} augmente rapidement avec la tension et diminue lorsque la pression augmente. D'autre part, l'addition d'une faible quantité de SF_6 dans le N_2 conduit à une diminution de $q_{max.}$ La tension seuil d'apparition des premières décharges partielles U_{sdp} est plus importante dans le cas du solide en résine époxy que dans le cas du verre. Par exemple, pour le gaz SF_6 sous une pression de 0.2 MPa, U_{sdp} = 2.3 et 4.5 kV pour le verre et la résine époxy respectivement. Aussi, les amplitudes des décharges partielles sont plus faibles en présence d'un isolateur en résine époxy ; la valeur de q_{max} mesurée pour une interface SF_6/verre sous une pression de 0.2 MPa, soumis à une tension de 10 kV est de 5 nC approximativement ; elle est uniquement que de 0.9 nC pour les mêmes conditions de mesure avec le solide en résine époxy.



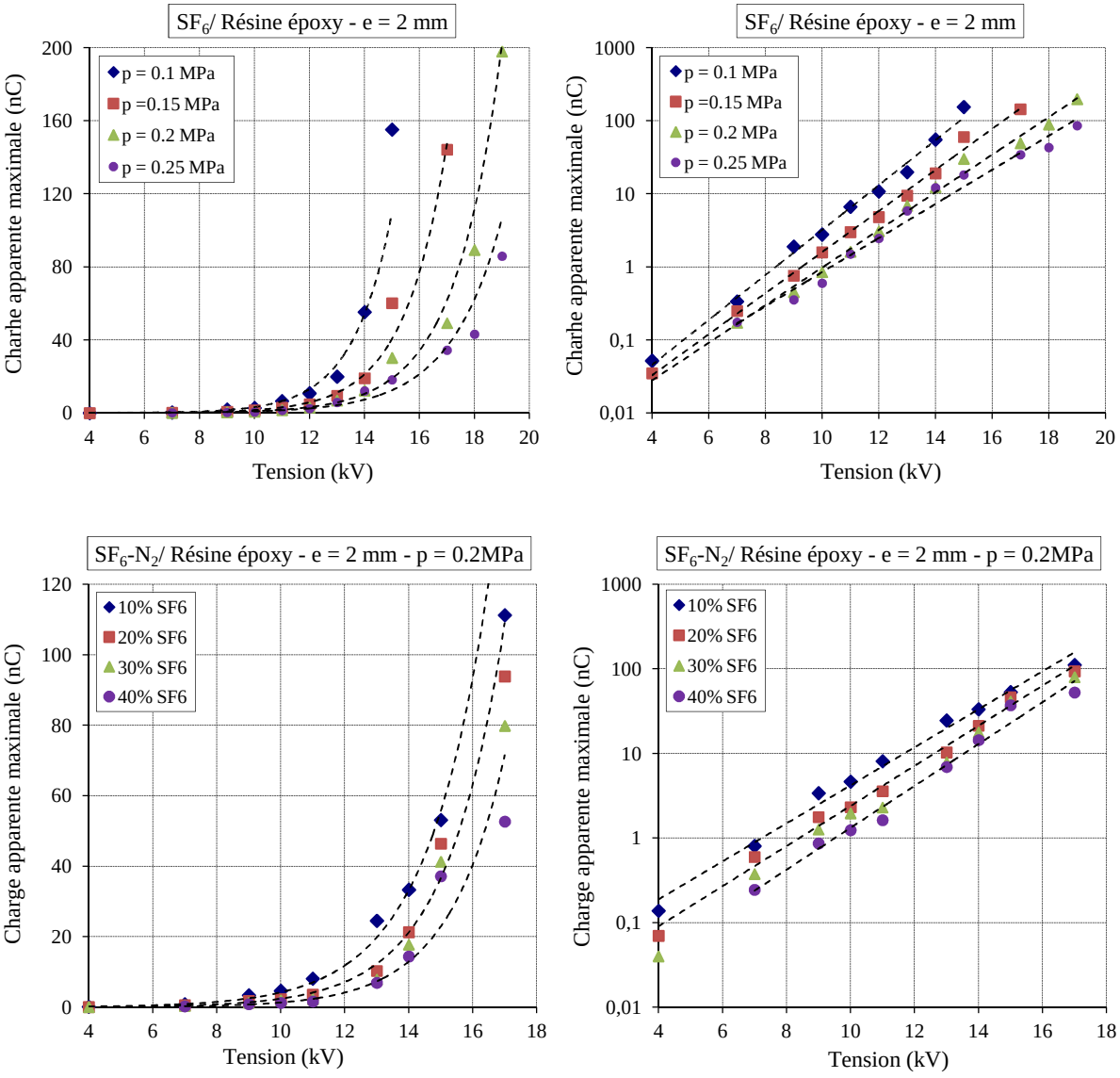


Figure 3.14. *Evolution de la charge maximale en fonction de la tension appliquée obtenue avec des échantillons en résine époxy de 2 mm d'épaisseur en présence des gaz N_2, SF_6 et SF_6/N_2*

4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que les décharges partielles qui apparaissent dans une isolation mixte solide/gaz dépendent de plusieurs paramètres comme l'amplitude de la tension appliquée, la pression et la nature du gaz, le type et l'épaisseur du solide. La répartition de ces décharges en fonction de la phase de la tension pour différents types d'isolateurs et niveaux de tension a été présentée. L'activité des décharges partielles augmente

en fonction de la tension. Autrement dit, le nombre des impulsions, la bande d'apparition de ces décharges et la charge apparente, augmentent avec l'amplitude de la tension. La charge apparente maximale q_{max} augmente rapidement avec la tension et diminue lorsque la pression augmente. q_{max} diminue lorsque l'épaisseur du matériau solide augmente. Par ailleurs, pour une tension donnée, plus la permittivité de l'isolant solide est élevée, plus q_{max} est grande.

4

DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION ALTERNATIVE

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons aux décharges glissantes qui apparaissent sur la surface d'isolateur sous tension alternative. Nous étudions en particulier la morphologie des décharges glissantes et leur longueur finale (ou d'arrêt) dans une configuration d'électrodes pointe - plan. Nous décrivons d'abord les différents éléments et dispositifs expérimentaux utilisés. Nous présentons par la suite les différentes figures de décharges qui peuvent être observées ainsi que les paramètres ayant une influence sur leurs formes et leurs longueurs finales.

2. Dispositif et procédures expérimentaux

Le dispositif expérimental est constitué de la même cellule d'essais que celle utilisée dans le chapitre précédent (chapitre 3), de la source de tension, des systèmes de visualisation des décharges et de mesure des signaux électriques et optiques qui les accompagnent. La Figure 4.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental et la structure isolante utilisés. Les gaz étudiés sont le SF_6, N_2 et CO_2 et leurs mélanges (SF_6 - CO_2 et SF_6 - N_2). Trois types d'isolants solides sont considérés : le verre, la Bakélite et la résine époxy dont les constantes diélectriques sont 5, 4.8 et 3.5 respectivement. Chaque fois que l'on change d'interface, on effectue un rinçage complet (remplissage suivi de la vidange avec le gaz à tester) de l'enceinte d'essais. Notons que l'échantillon solide est remplacé après chaque essai.

Les essais sont réalisés en tension alternative, en utilisant un transformateur capable de nous fournir une tension allant jusqu'à 50 kV (50 Hz).

L'observation optique des décharges est basée sur l'intégration des images obtenues grâce à une caméra reliée à une carte d'acquisition vidéo haute performance pilotée par un logiciel MATROX Inspector 8.5. La caméra est une CCD monochrome de type «SONY XC-RH58» de haute résolution (767x580 Pixels) dont la capture d'images est contrôlée par ordinateur à une vitesse de 50 images/seconde.

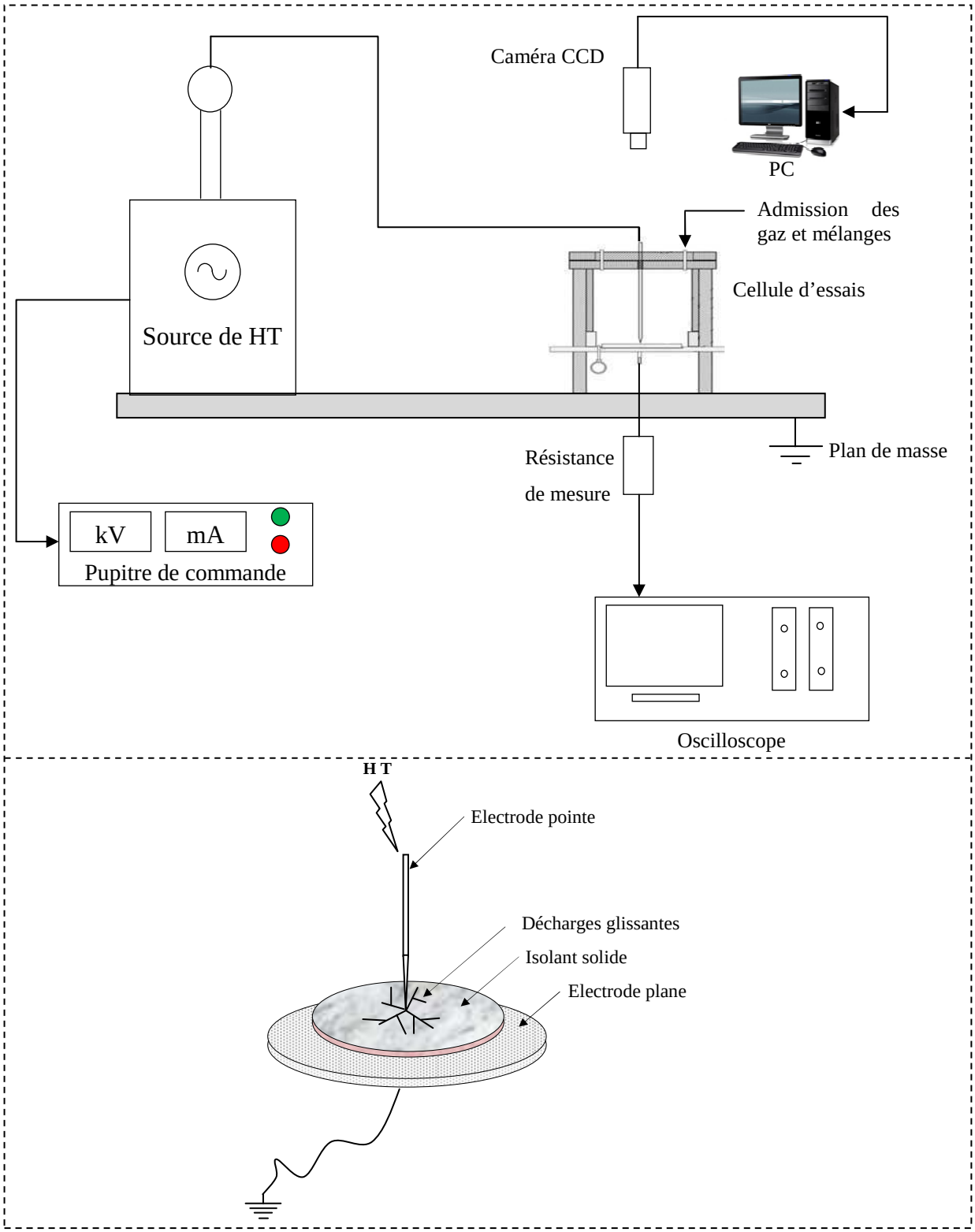


Figure 4.1. *Schéma de l'ensemble du dispositif expérimental sous tension alternative et de la structure isolante*

2.1. Mesure de la longueur finale des décharges

La mesure des longueurs finales L_f des décharges surfaciques (glissantes) sous tension alternative est basée sur les enregistrements obtenus grâce à la chaîne d'acquisition optique. Avant le début de chaque série, on effectue un vide complet dans la cellule au moyen d'une pompe à vide. On procède au remplissage avec du gaz ou mélange à la pression désirée. La tension est ensuite appliquée progressivement et maintenue à la valeur désirée pour une durée de 500 cycles de tension, soit 10 secondes. La caméra est préalablement programmée pour effectuer la capture d'images d'une durée de 10 secondes, à une vitesse de 50 images/s. Le début d'enregistrement de la caméra est contrôlé par le PC de contrôle et coïncide avec le moment où la tension atteint la valeur désirée. Nous obtenons ainsi une succession d'images de décharges. Grâce au logiciel «Matrox Inspector 8.5» fournie avec la carte d'acquisition vidéo (Météore-II/multicanal), nous pouvons mesurer l'extension maximale des branches (longueur finale ou d'arrêt) constituant la décharge directement sur l'écran de l'ordinateur. Pour chaque essai, nous retenons la valeur maximale de L_f indépendamment de la polarité de la tension appliquée. Pour une tension donnée, la valeur considérée de L_f représente la moyenne d'une dizaine d'essais.

3. Morphologie et longueur finale des décharges

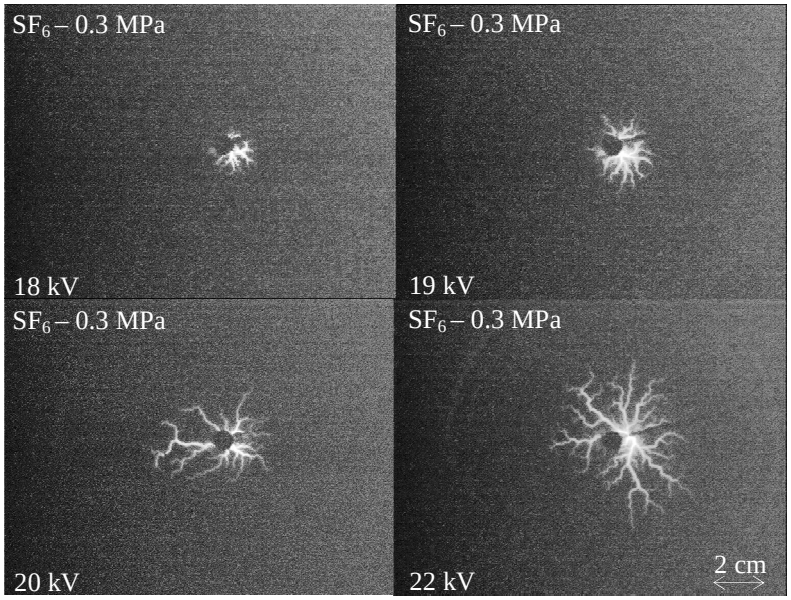
3.1. Verre

3.1.1. Morphologie des décharges

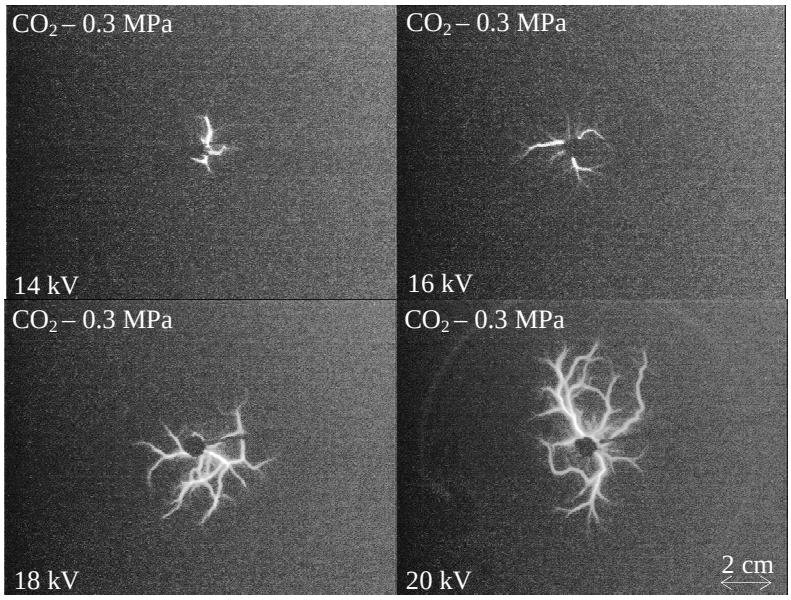
Les décharges glissantes obtenues avec l'échantillon solide en verre sous tension alternative sont généralement non-radiales. Nous remarquons que leur forme dépendent de plusieurs paramètres tels que l'amplitude de la tension appliquée, l'épaisseur de l'échantillon solide, la nature et la pression du gaz (ou du mélange gazeux), ainsi que la concentration des différents constituants des mélanges.

Les Figures 4.2 et 4.3 montrent l'influence de l'amplitude de la tension et de la pression du gaz sur la morphologie des décharges se propageant sur un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur en présence des gaz SF_6 et CO_2. Nous remarquons que quelles que soient la nature

et la pression du gaz, l'augmentation de l'amplitude de la tension appliquée est accompagnée d'une augmentation de la longueur des décharges et de la luminosité des canaux de décharges. Il est à noter que les branches des décharges décrivent des trajectoires circulaires qui semblent tourner autour de la pointe. Pour une tension donnée, la longueur et la densité des décharges diminuent lorsque la pression est augmentée.

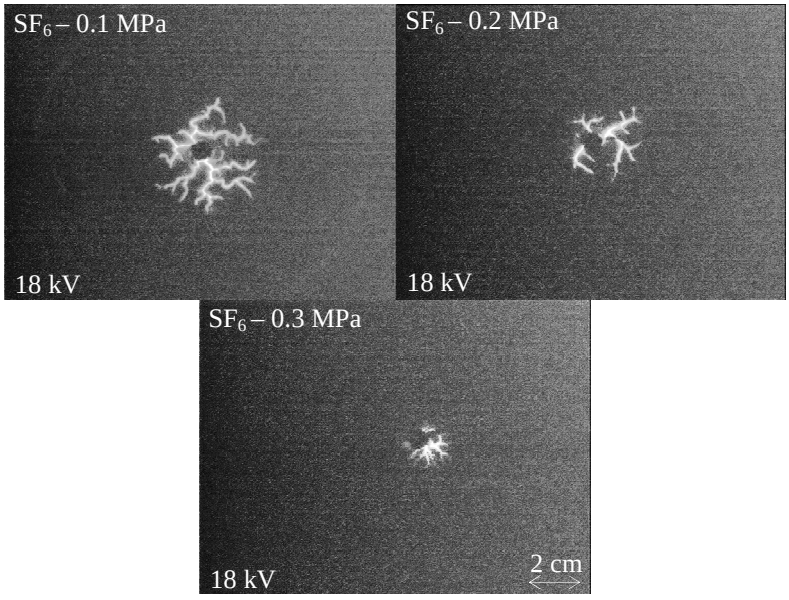


(a)

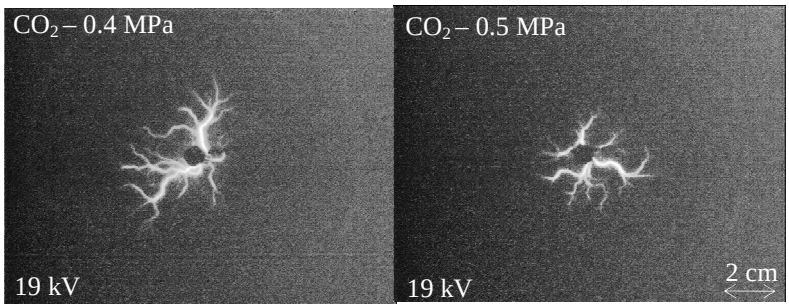


(b)

Figure 4.2. *Influence de l'amplitude de la tension sur les décharges glissantes obtenues sous tension alternative avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur: a) SF_6, b) CO_2*



(a)



(b)

Figure 4.3. *Influence de la pression du gaz sur les décharges glissantes obtenues sous tension alternative avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur: a) SF_6, b) CO_2*

Les Figures 4.4 et 4.5 montrent que l'adition d'une faible quantité de SF_6 dans les gaz purs N_2 et CO_2 permet de réduire considérablement la longueur des décharges et par conséquent les tensions de contournement des structures isolantes correspondantes sont améliorées. La présence de SF_6 dans les mélanges freinerait le développement et la propagation de la décharge.

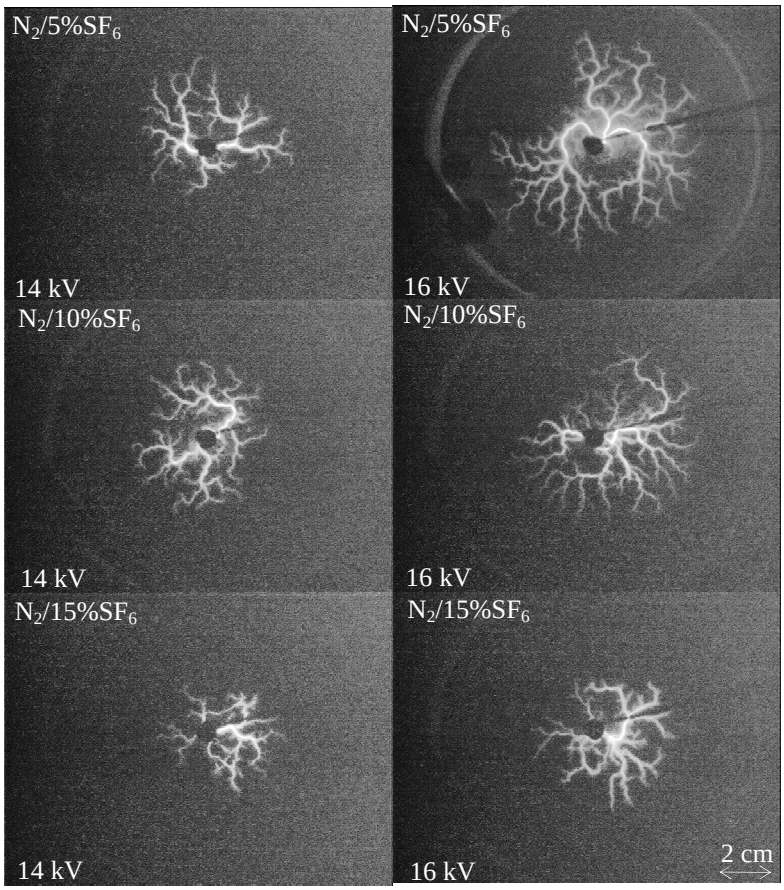


Figure 4.4. *Influence de la teneur en SF_6 sur les décharges glissantes obtenues sous tension alternative avec une interface SF_6 - N_2/Verre (e = 2 mm)*

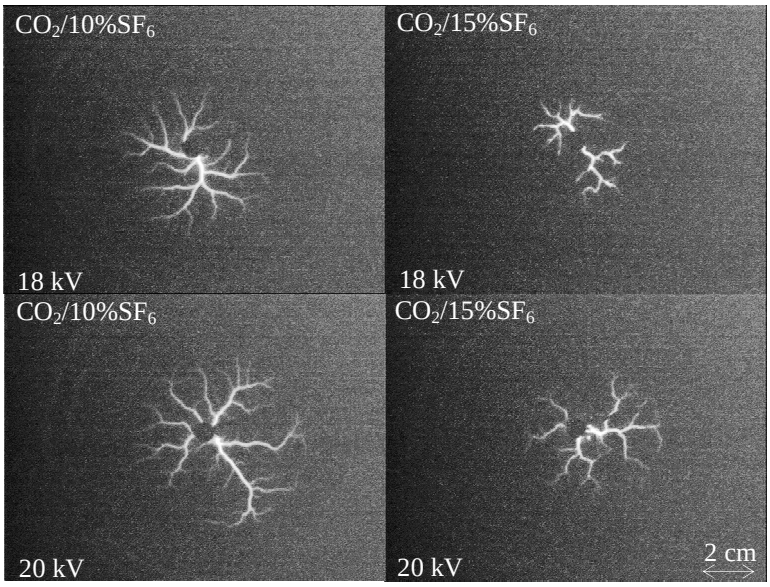


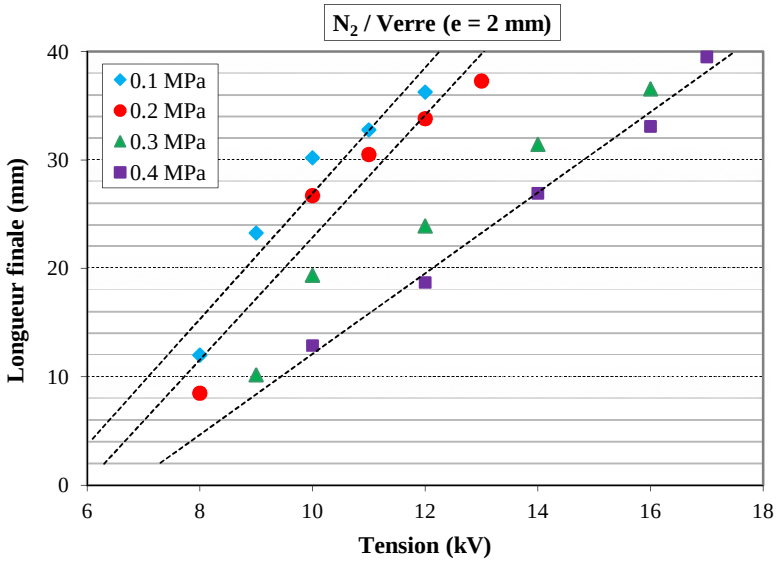
Figure 4.5. *Influence de la teneur en SF_6 sur les décharges glissantes obtenues sous tension alternative avec une interface SF_6 - CO_2/Verre (e = 2 mm)*

3.1.2. Longueur finale des décharges

La Figure 4.6 montre l'évolution de la longueur finale L_f des décharges glissantes sur un échantillon solide en verre de 2 mm d'épaisseur en fonction de l'amplitude de la tension appliquée pour les trois gaz SF_6, N_2 et CO_2. Nous remarquons que L_f augmente quasi-linéairement avec la tension et ce jusqu'au contournement quelles que soit la nature et la pression du gaz.

Pour une tension donnée, L_f diminue lorsque la pression du gaz augmente. Les caractéristiques $L_f = f(U)$ sont des droites dont la pente dépend de la pression : plus la pression augmente plus la pente est faible.

La longueur d'arrêt des décharges est nettement plus élevée avec le CO_2 et le N_2 qu'avec le SF_6. Cela est dû aux propriétés diélectriques du SF_6 qui sont nettement meilleures que celles du CO_2 et du N_2. Des résultats similaires ont été obtenus sous tension impulsionnelle [97]. Cependant, au vu des résultats obtenus, les décharges sous tension alternative sont plus longues que celles obtenues sous tension impulsionnelle.



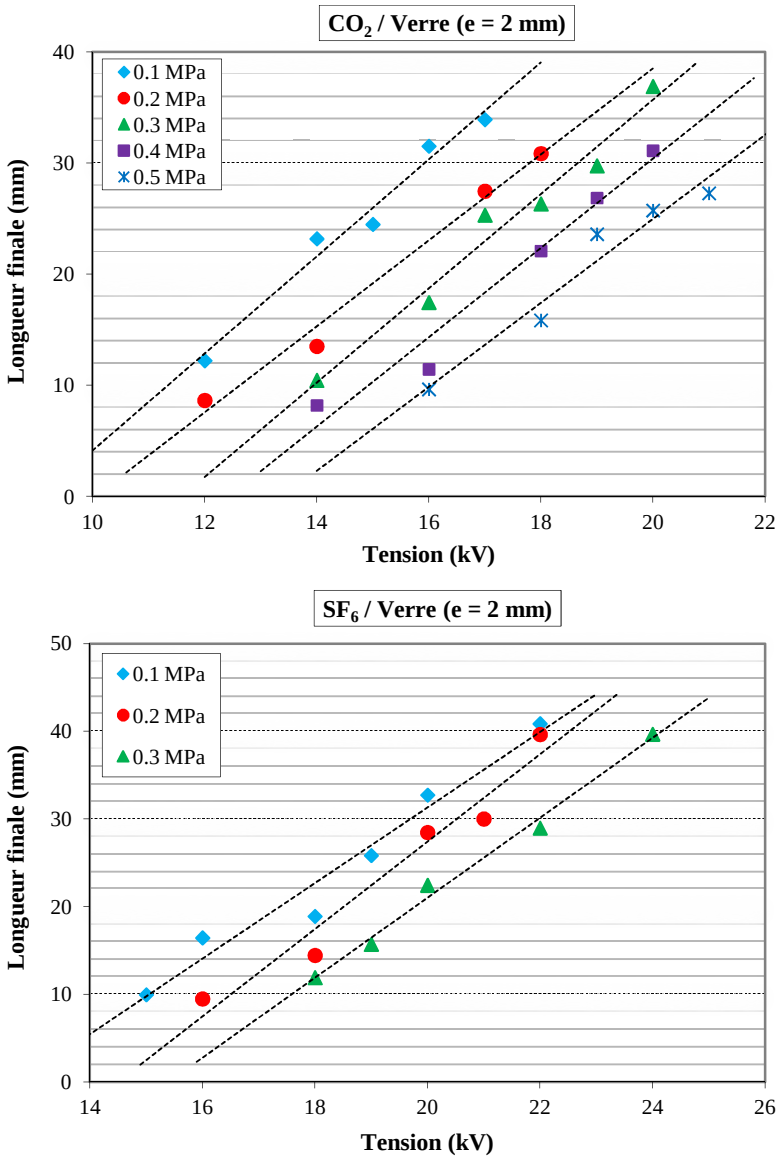


Figure 4.6. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction de la tension pour des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur dans les gaz N_2, CO_2 et SF_6 à différentes pressions, sous tension alternative*

Les résultats de la longueur finale L_f des décharges obtenues avec les mélanges de gaz SF_6 - N_2 et SF_6 - CO_2 sont illustrés sur la Figure 4.7. Nous remarquons que l'augmentation de la concentration de SF_6 dans les mélanges conduit à une diminution de L_f. L'effet de synergie est plus prononcé dans le mélange SF_6 - N_2. Pour le mélange SF_6 - CO_2, les caractéristiques $L_f = f(U)$ pour 10% et 15% de SF_6 sont très proches. Ceci pourrait être dû à l'existence d'une concentration optimale de SF_6 au-dessus de laquelle l'effet de la pression devient insignifiant.

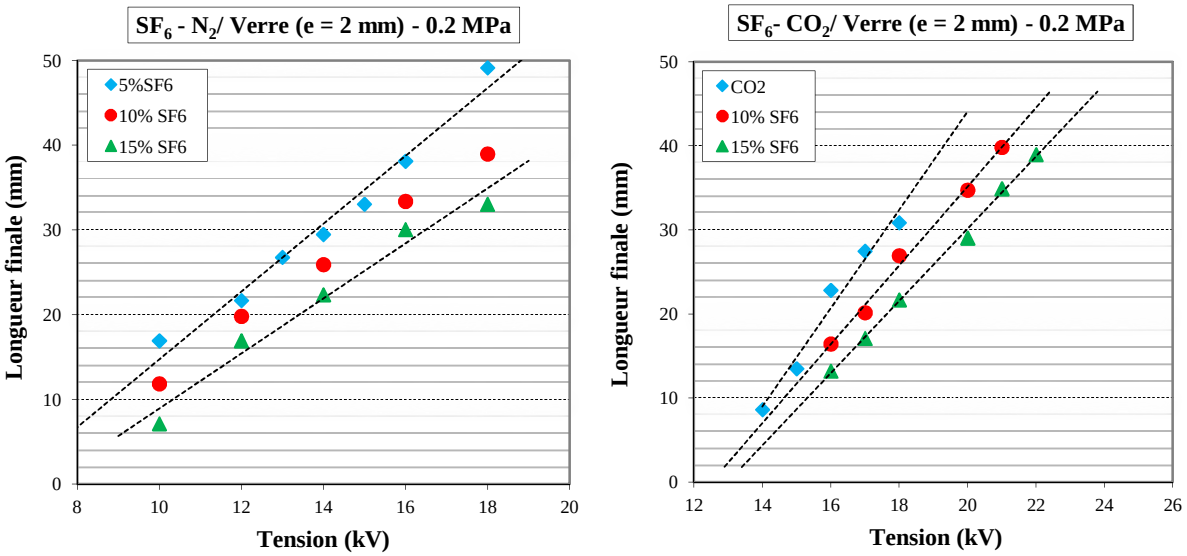


Figure 4.7. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction du pourcentage de SF_6 pour des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur dans les mélanges SF_6 - N_2 et SF_6 - CO_2, sous tension alternative*

3.1.3. Influence de l'épaisseur du solide

Les Figures 4.8 et 4.9 donnent quelques exemples de décharges observées sur un échantillon solide en verre de 2 à 10 mm d'épaisseur, en présence de CO_2 et de SF_6. Pour une tension et une pression données, on remarque que la longueur et la densité des branches diminuent lorsque l'épaisseur du solide augmente quelque soit la nature du gaz. Ce résultat indiquerait l'implication d'effets capacitifs. En effet, Lorsque l'épaisseur du solide augmente, la capacité du condensateur constitué par l'isolateur inséré entre les électrodes diminue. Ce phénomène a été aussi observé sur des interfaces liquide/solide [98][99][100].

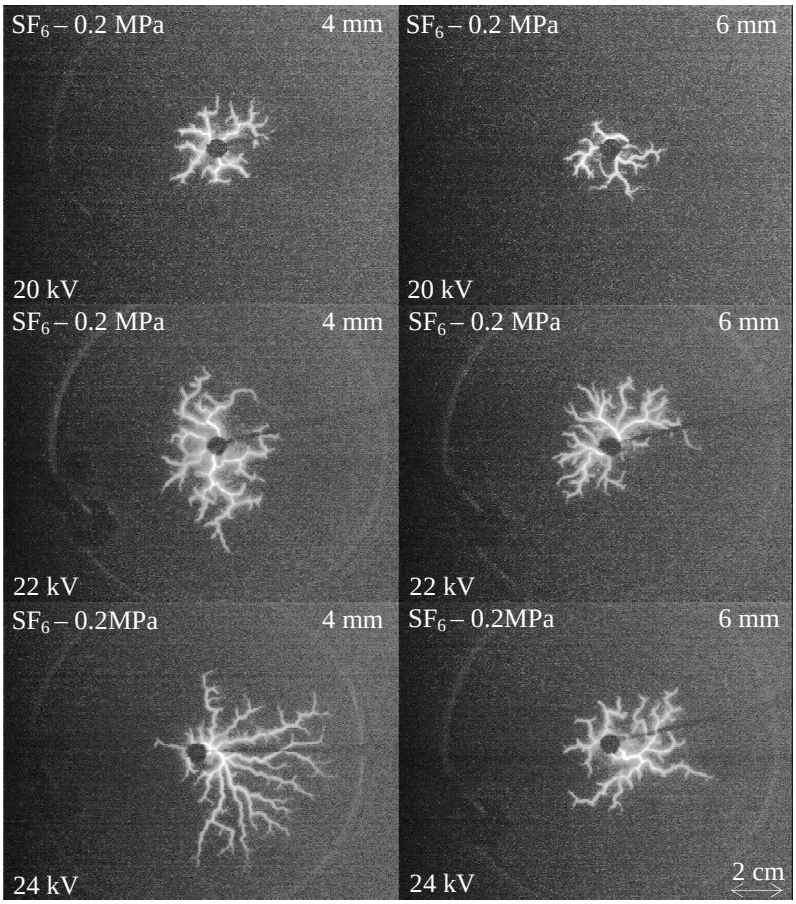


Figure 4.8. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes pour une interface SF_6/Verre, sous tension alternative*

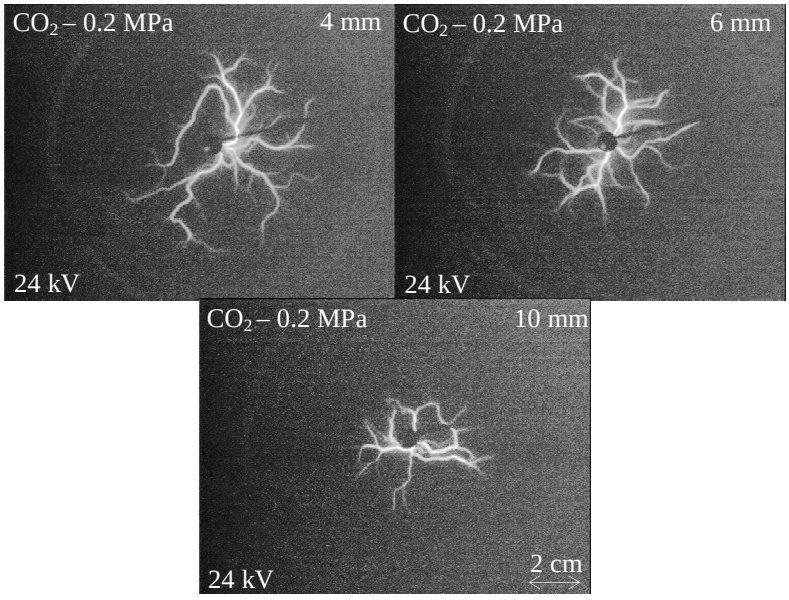
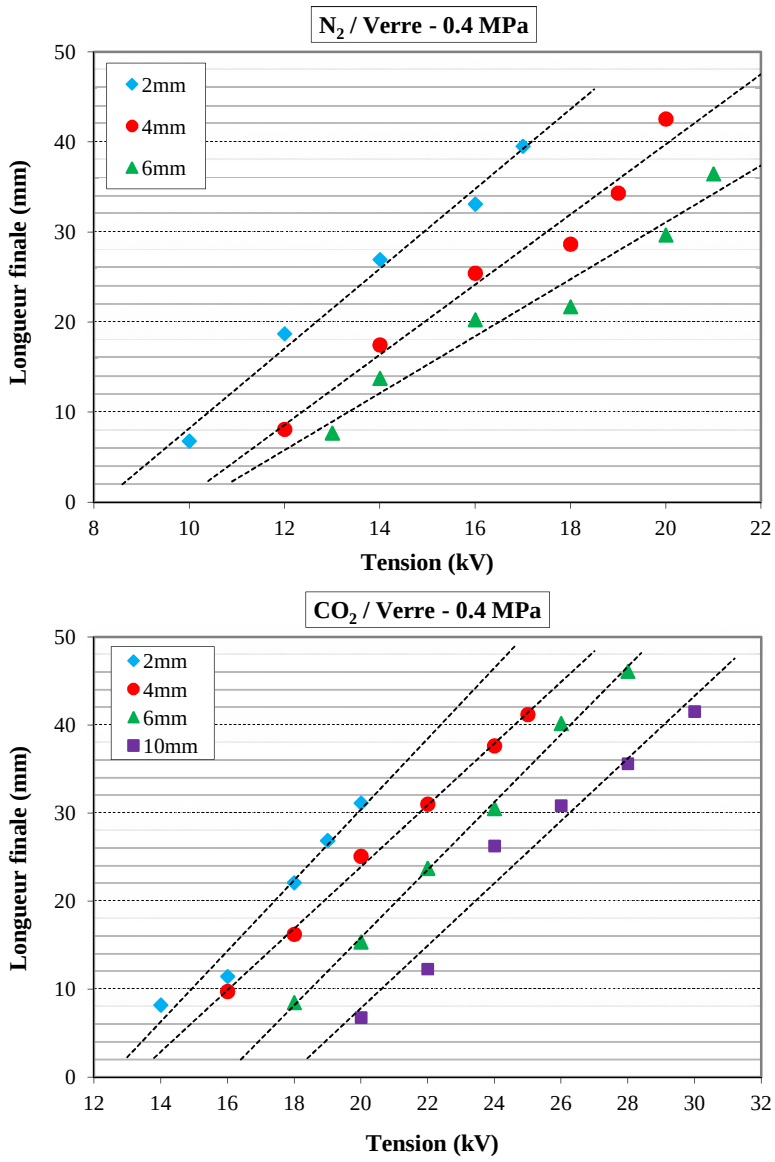


Figure 4.9. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes pour une interface CO_2/Verre, sous tension alternative*

La Figure 4.10 donne les variations $L_f = f(U)$ pour des échantillons solides en verre de différentes épaisseurs e (2, 4, 6 et 10 mm). Nous remarquons que l'évolution de la longueur finale des décharges est quasi-linéaire quelles que soit la nature du gaz et l'épaisseur du solide. Pour un type de gaz donné, la longueur finale des décharges diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente.



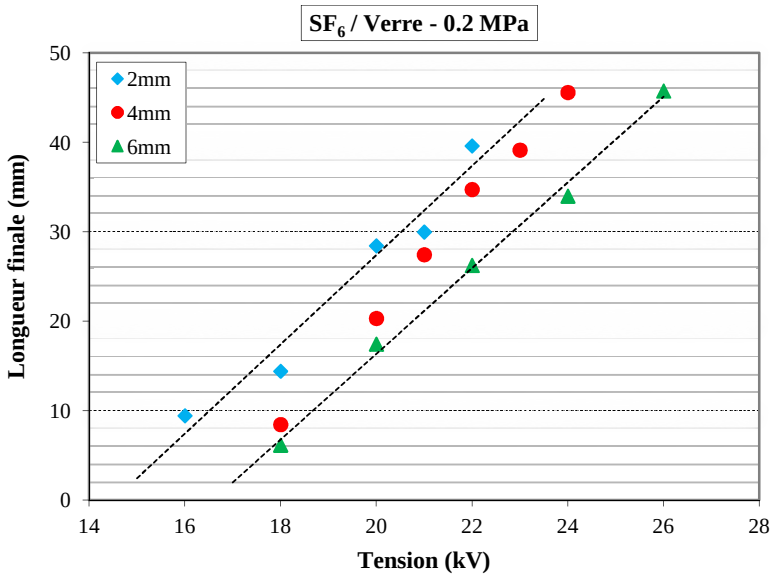


Figure 4.10. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction de l'épaisseur du solide en verre dans les gaz: N_2, CO_2 et SF_6, sous tensions alternative*

3.2. Bakélite et résine époxy

3.2.1. Morphologie et longueur finales des décharges

Pour étudier l'influence du matériau solide sur la morphologie et la longueur finale des décharges glissantes, nous avons mené une série d'essais sur d'autres types d'isolants solides. A savoir la Bakélite, matériau dont la constante diélectrique (ε_r = 4.8) est proche de celle du verre et la résine époxy qui a une permittivité plus petite (ε_r = 3.5).

Les décharges glissantes observées sur les échantillons solides en Bakélite et en résine époxy sous tension alternative se distinguent généralement par un aspect non radial ; elles sont similaires à celles obtenues avec du verre. Ces décharges comportent un nombre aléatoire de branches principales ou pieds de décharges dont le nombre varie d'une décharge à l'autre. Toutefois, la forme de ces décharges semble dépendre de la nature du solide isolant. Le nombre de ramifications est plus élevé dans le cas des échantillons en verre et en Bakélite que dans le cas des échantillons en résine époxy.

Les Figures 4.11 à 4.14 montrent l'influence de l'amplitude de la tension appliquée et de la pression des gaz sur la morphologie des décharges se propageant sur des échantillons en résine époxy et en Bakélite de 2 mm d'épaisseur. Comme dans le cas du solide en verre, la

longueur des branches et leur luminosité augmentent lorsque la tension est augmentée. Les décharges deviennent plus longues et plus ramifiées en diminuant la pression des gaz.

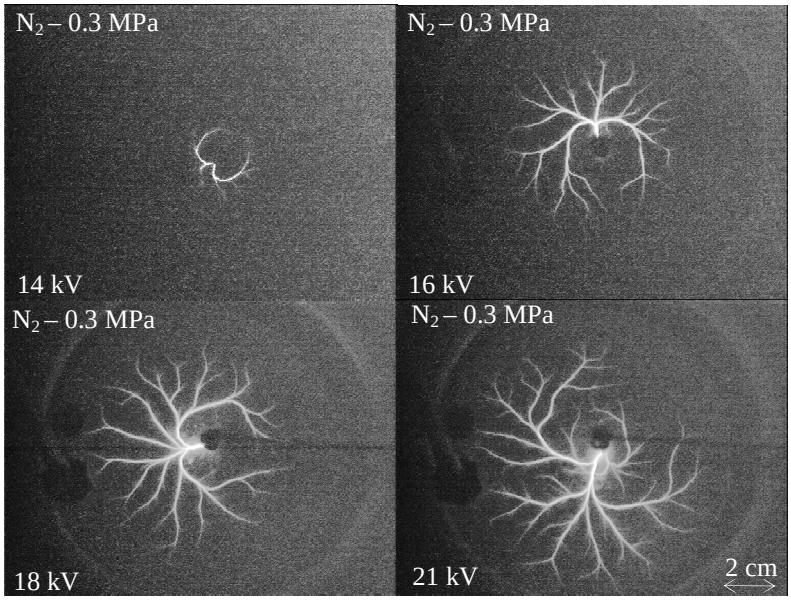


Figure 4.11. *Influence de l'amplitude de la tension sur les décharges glissantes sous tension alternative avec une interface N_2/Résine époxy (e = 2 mm)*

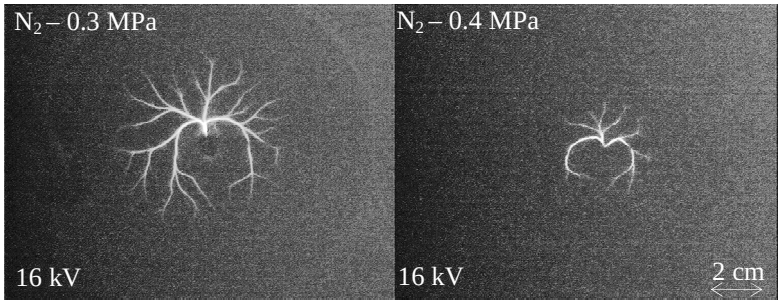


Figure 4.12. *Influence de la pression sur les décharges glissantes sous tension alternative avec une interface N_2/Résine époxy (e = 2 mm)*

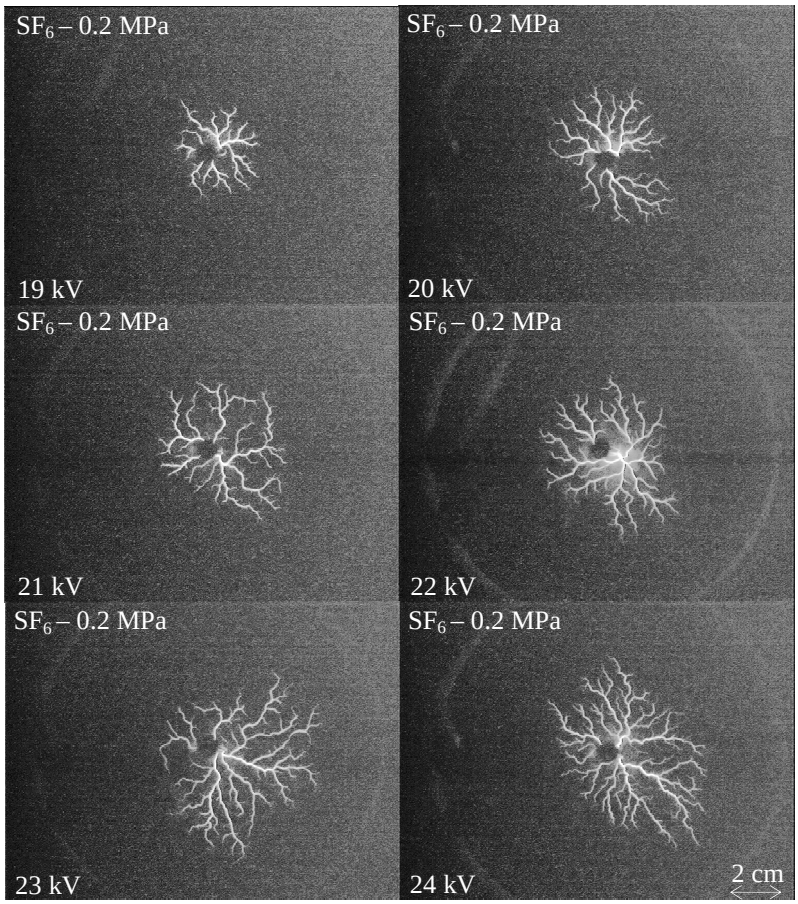


Figure 4.13. *Influence de l'amplitude de la tension sur les décharges glissantes sous tension alternative avec une interface SF_6/Bakélite (e =2 mm)*

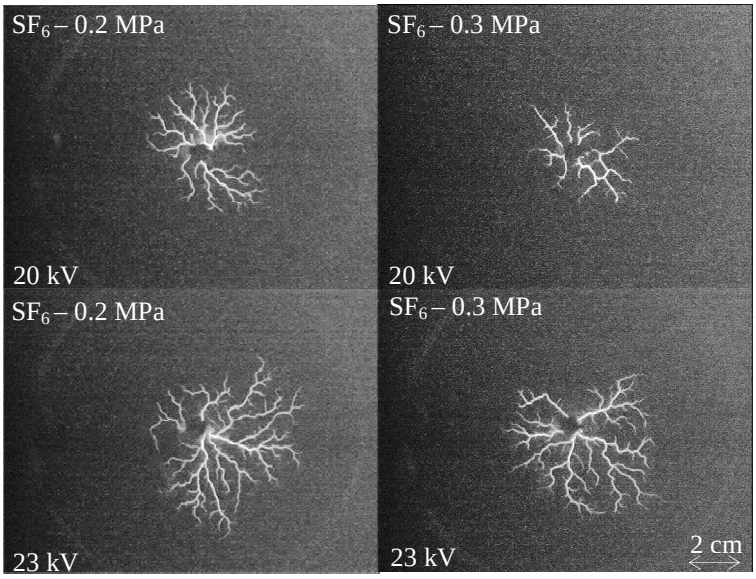
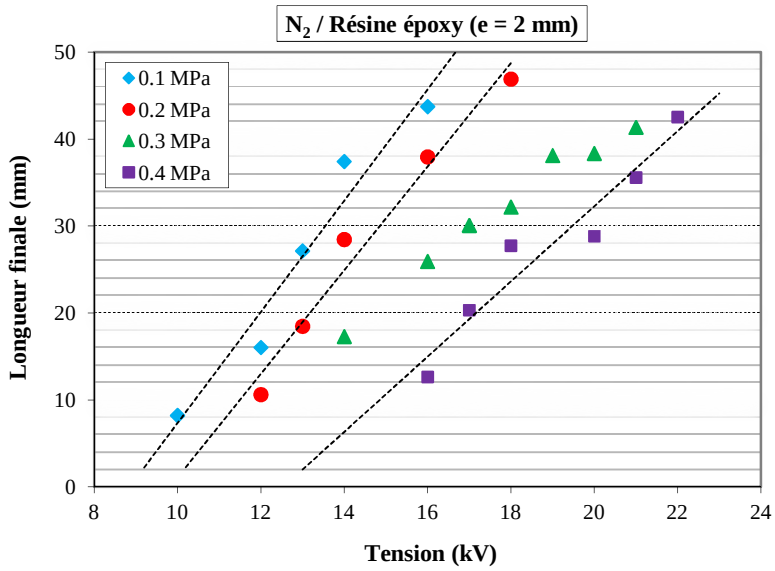


Figure 4.14. *Influence de la pression sur les décharges glissantes sous tension alternative avec une interface SF_6/Bakélite (e =2 mm)*

L'évolution de la longueur finale des décharges L_f en fonction de la tension pour différentes valeurs de pression obtenues avec des échantillons en résine époxy et en Bakélite respectivement est illustrée sur les Figures 4.15 et 4.16. Pour les deux types de solides étudiés, nous remarquons que L_f augmente quasi-linéairement avec la tension et diminue quand la pression augmente. Pour une pression donnée, L_f (N_2) > L_f (CO_2) > L_f (SF_6) donnant lieu à des tensions de contournement plus élevées avec le SF_6 qu'avec le CO_2 et le N_2. Cependant, les valeurs de L_f obtenues avec des échantillons en verre (ε_r = 5) sont proches que celles obtenues avec la Bakélite (ε_r = 4.8) et nettement supérieures à celles obtenues avec la résine époxy (ε_r = 3.5) dans les mêmes conditions de pression. Cette différence est due au fait que le renforcement du champ au voisinage de l'électrode pointe est d'autant plus élevé que la différence entre les permittivités diélectriques du solide et du gaz (ε_r = 1) est élevée. L'influence de la permittivité diélectrique sur les phénomènes de décharges surfaciques est observée auparavant dans les gaz sous tension impulsionnelle [101] et pour une interface solide/liquide [1][86].



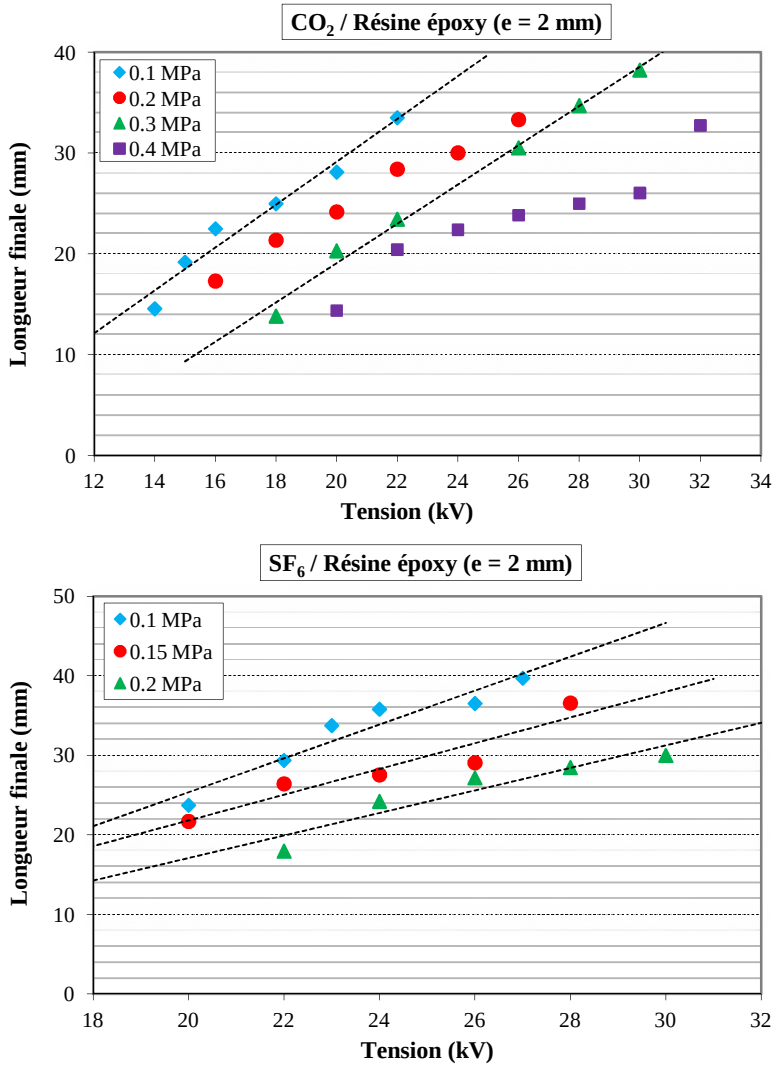
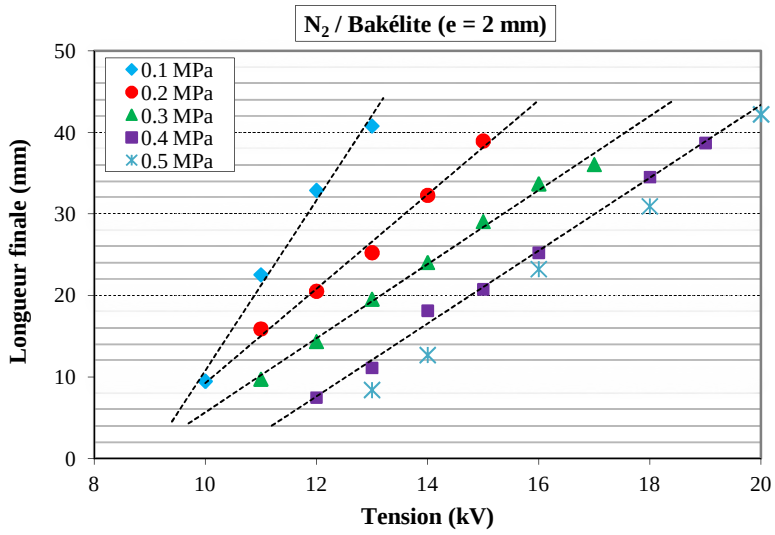


Figure 4.15. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction de la tension pour des échantillons en résine époxy de 2 mm d'épaisseur dans les gaz N_2, CO_2 et SF_6 à différentes pressions, sous tension alternative*



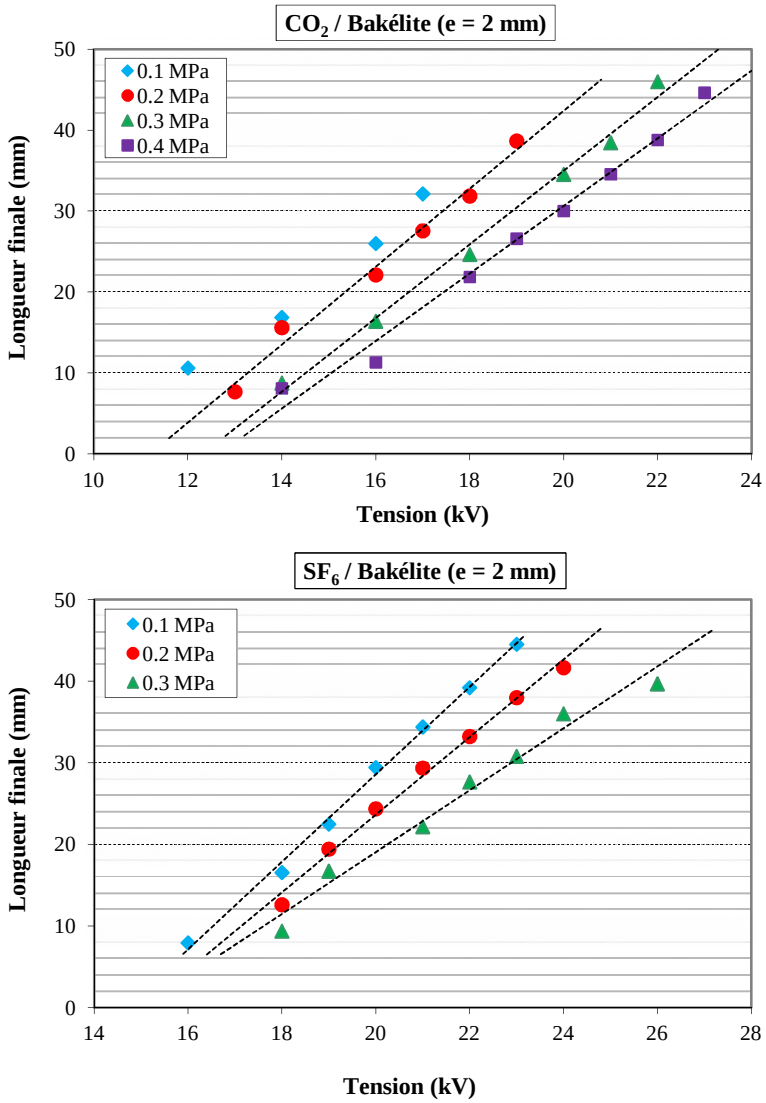


Figure 4.16. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction de la tension pour des échantillons en Bakélite de 2 mm d'épaisseur dans les gaz N_2, CO_2 et SF_6 à différentes pressions, sous tension alternative*

Comme indiqué sur la Figure 4.17, l'addition d'une faible quantité de SF_6 dans ces mélanges permet de réduire la longueur finale des décharges, et par conséquent d'améliorer la tenue de la structure isolante.

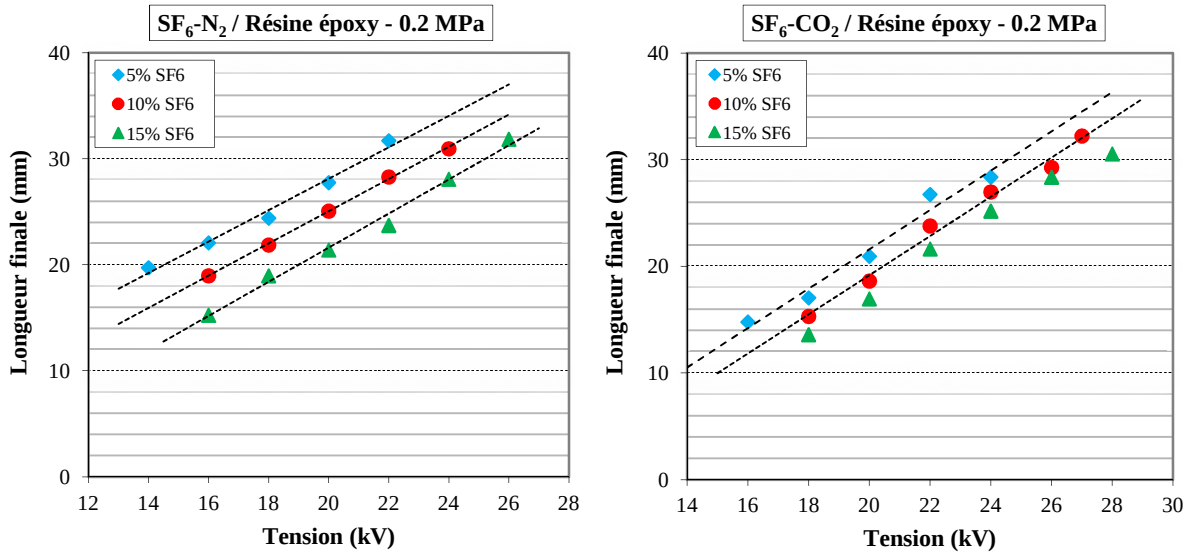


Figure 4.17. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction du pourcentage de SF_6 pour des échantillons en résine époxy de 2 mm d'épaisseur dans les mélanges SF_6 - N_2 et SF_6 - CO_2, sous tension alternative*

La longueur finale diminue lorsque l'épaisseur de l'échantillon solide augmente comme dans le cas du verre (Figures 4.18 à 4.20).

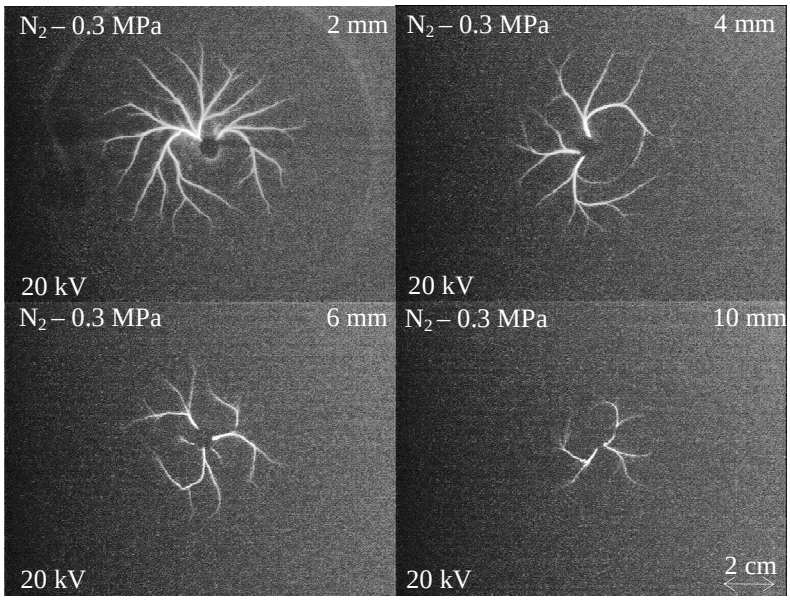


Figure 4.18. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes pour une interface N_2/Résine époxy, sous tension alternative*

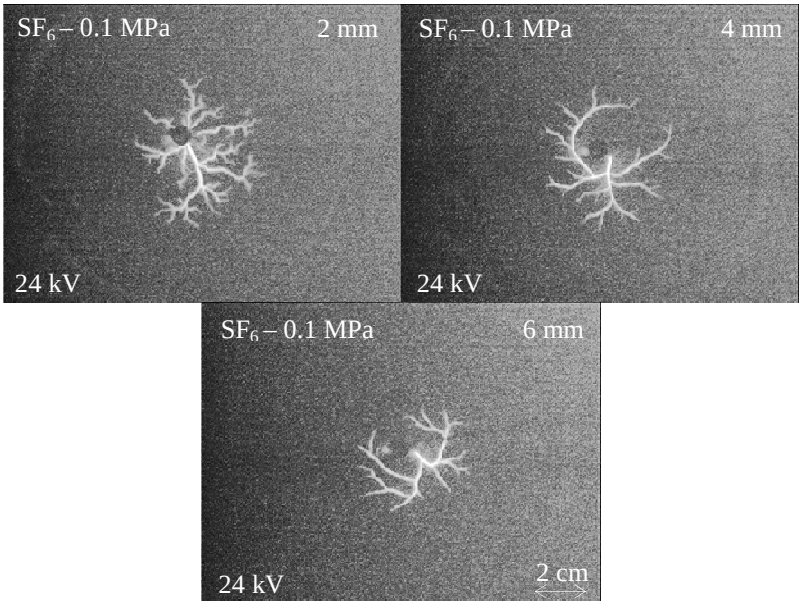


Figure 4.19. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes pour une interface SF_6/Résine époxy, sous tension alternative*

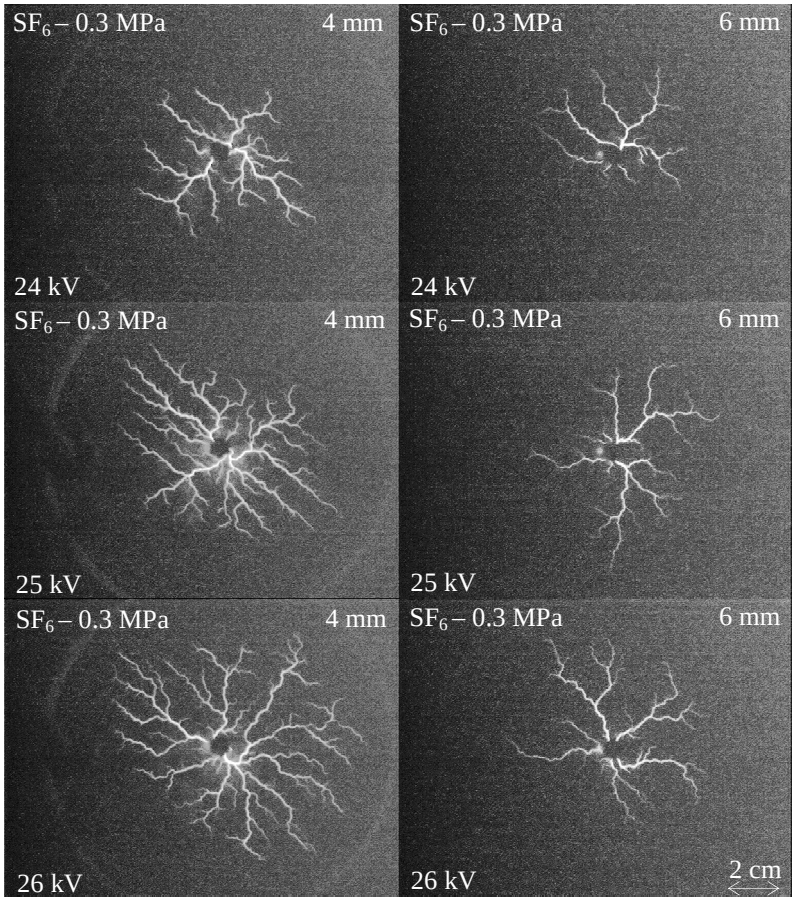


Figure 4.20. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes pour une interface SF_6/Bakélite, sous tension alternative*

Les Figures 4.21 à 4.24 donnent les variations de $L_f = f(U)$ pour des échantillons solides de différentes épaisseurs (e = 2, 4, 6 et 10 mm) dans les différents gaz. Pour le CO_2 et le N_2, l'étude est faite pour deux valeurs de pression, soient 0.2 et 0.3 MPa. Nous constatons que l'épaisseur de l'isolateur e influe fortement sur la longueur finale L_f des décharges glissantes. En augmentant l'épaisseur, L_f diminue.

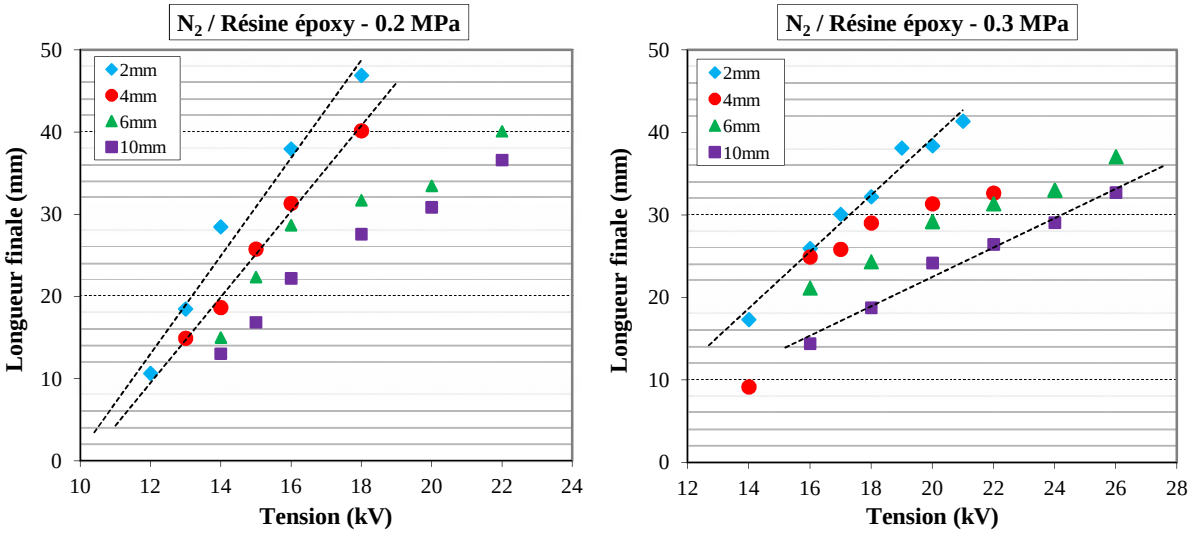


Figure 4.21. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction de l'épaisseur de l'isolant solide en résine époxy dans le N_2, sous tensions alternative*

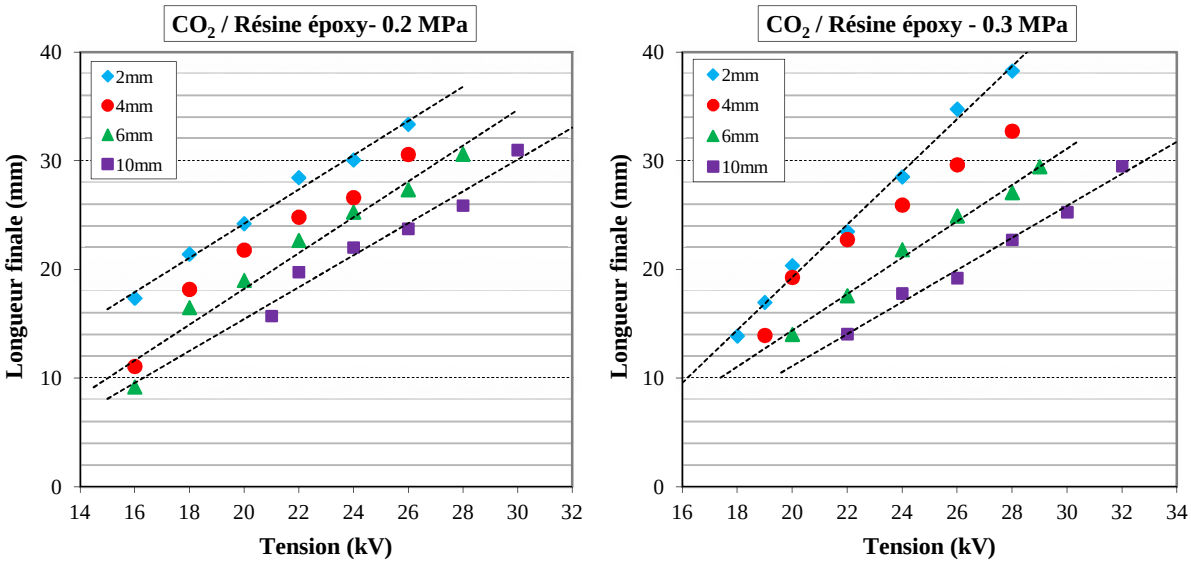


Figure 4.22. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction de l'épaisseur de l'isolant solide en résine époxy dans le CO_2, sous tensions alternative*

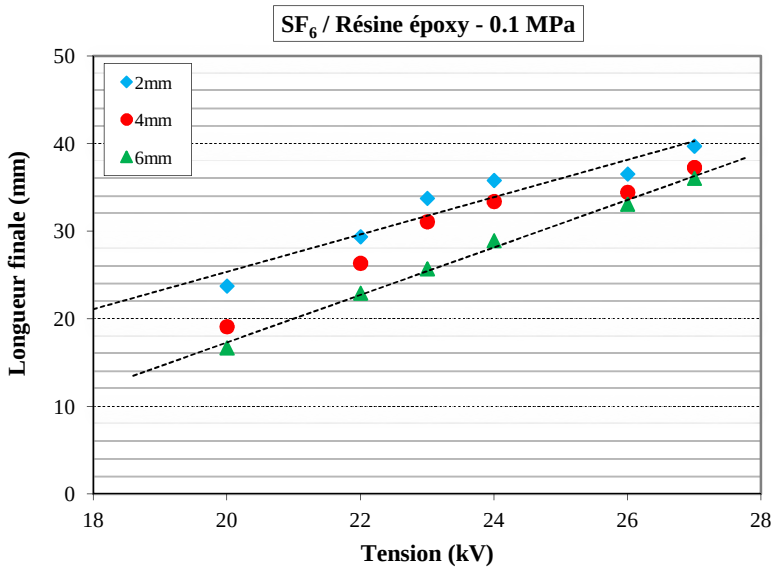


Figure 4.23. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction de l'épaisseur de l'isolant solide en résine époxy dans le SF_6, sous tensions alternative*

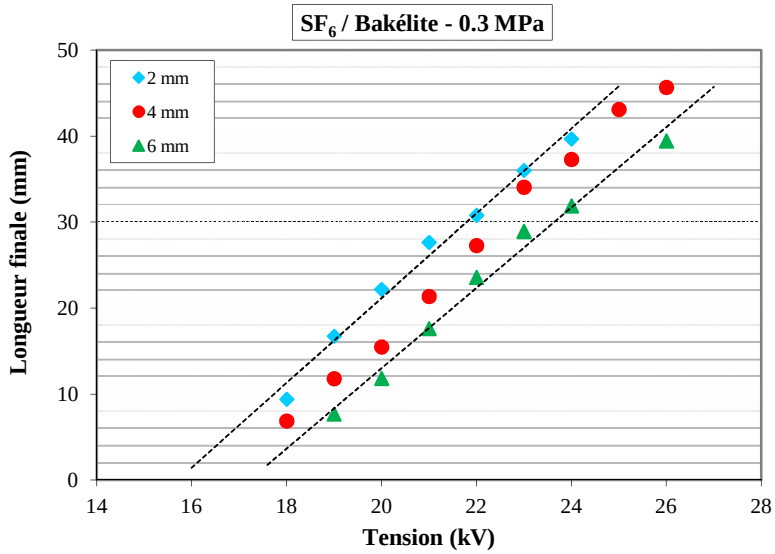


Figure 4.24. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction de l'épaisseur de l'isolant solide en Bakélite dans le SF_6, sous tensions alternative*

4. Conclusion

Dans ce chapitre, la morphologie et la longueur finale des décharges glissantes sous tension alternative ont été analysées pour plusieurs types de matériaux d'isolateurs de différentes épaisseurs et plusieurs types de gaz. Nous avons montré que ces deux caractéristiques dépendent de plusieurs paramètres tels que l'amplitude de la tension, le type

et la pression du gaz (ou mélange), la nature du matériau isolant solide et le taux de SF_6 dans le mélange.

Pour un solide et un gaz donnés, L_f augmente quasi-linéairement avec la tension et diminue quand la pression du gaz augmente. L_f est plus courte dans le SF_6 que dans le CO_2 ou le N_2. L'augmentation du pourcentage de SF_6 dans les mélanges SF_6 - CO_2 et SF_6 - N_2 provoque une diminution significative de la longueur finale des décharges. Les valeurs de L_f obtenues avec les échantillons en verre (ε_r = 5) et en Bakélite (ε_r = 4.8) sont relativement proches et nettement supérieures que celles obtenues avec la résine époxy (ε_r = 3.5) dans les mêmes conditions d'essais. Lorsque l'épaisseur du matériau augmente, la capacité du condensateur constitué par l'isolateur inséré entre les électrodes (pointe et plan) diminue. En conséquence, L_f diminue et la tension de contournement augmente.

5

DECHARGES GLISSANTES SOUS TENSION CONTINUE

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous abordons le cas des décharges glissantes générées sous tension continue. Nous présentons le dispositif expérimental utilisé puis les différentes formes de décharges ainsi que leurs longueurs finales et leur évolution en fonction de l'amplitude de la tension appliquée, de la nature et de l'épaisseur des solides isolants, du type de gaz (mélange) et de sa pression. Par la suite, nous présentons l'analyse fractale des décharges surfaciques obtenues expérimentalement ainsi que l'influence des caractéristiques de l'échantillon solide (épaisseur et permittivité diélectrique) et de la pression du gaz sur la dimension fractale. Les courants associés aux décharges sont décrits en fonction de l'amplitude de la tension appliquée.

2. Dispositif et procédures expérimentaux

Le dispositif expérimental est semblable à celui utilisé pour la caractérisation des décharges glissantes sous tension alternative, décrit au chapitre 4. Il comporte la cellule d'essais contenant le système d'électrode pointe - plan, la chaîne d'acquisition vidéo et le système de mesure électrique. La source de tension est une génératrice à courant continu (SPELLMAN High Voltage DC Supply, Input : 220 VAC, Output : 0 – 200 kV/ 2 mA) délivrant une tension réglable de 0 à 200 kV en polarité positive. La mesure de la tension s'effectue au moyen d'une résistance (2 GΩ, 100 μA) connectée en série avec un microampèremètre. La Figure 5.1 montre le schéma de l'ensemble du dispositif expérimental. La tension est appliquée progressivement par paliers de 2 kV et maintenue à sa nouvelle valeur pendant la durée de l'enregistrement.

Sous tension continue, la durée de l'enregistrement est relativement longue (t = 20 s). Ceci nous amène à obtenir une succession de décharges à chaque fois que la structure isolante est soumise à une tension d'amplitude supérieure au seuil de génération. Ces décharges successives n'ont pas la même longueur finale. Ainsi, lors des mesures de longueurs finales, seules les valeurs maximales de L_f sont prises en compte.

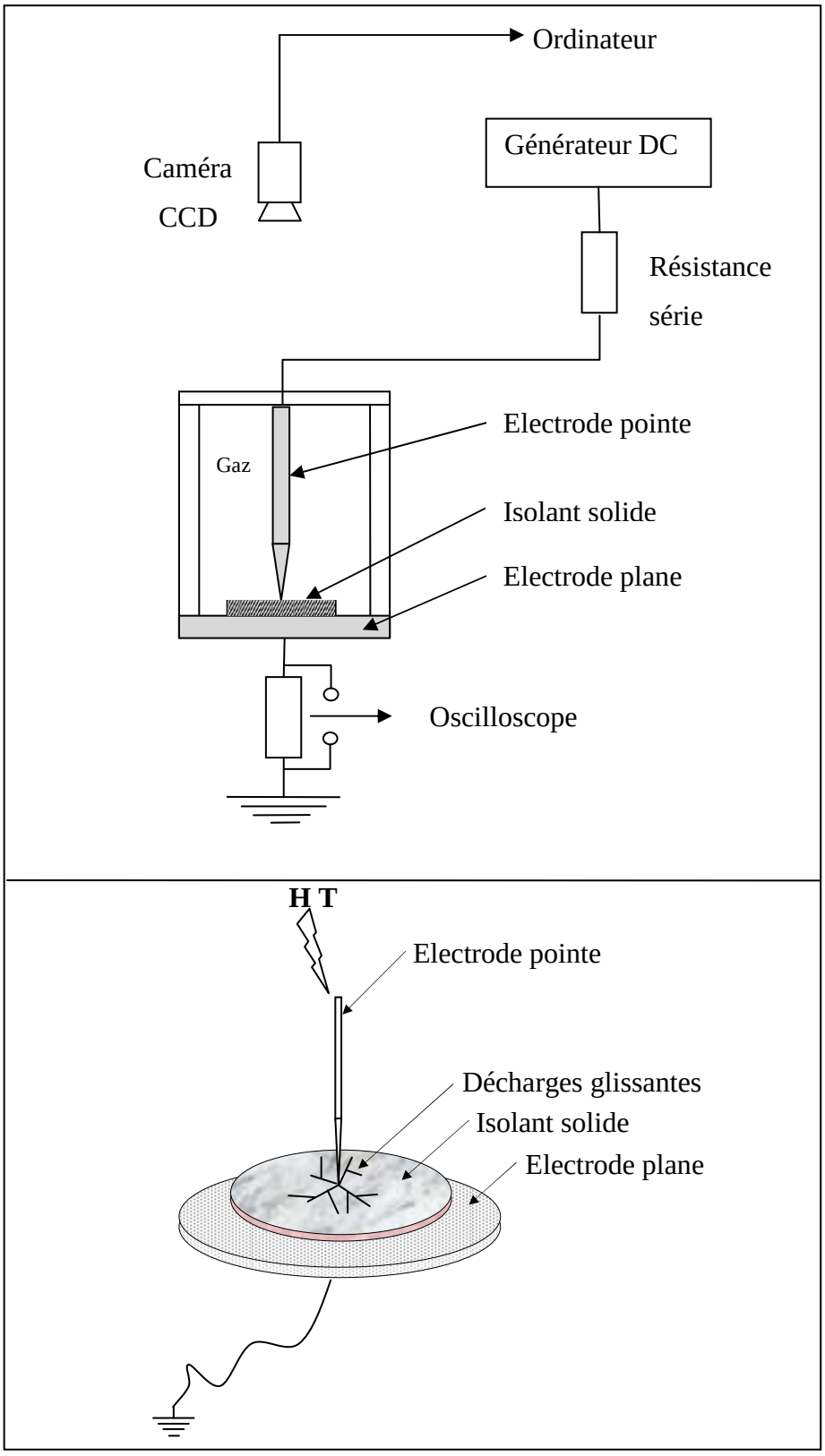


Figure 5.1. *Schéma du dispositif expérimental*

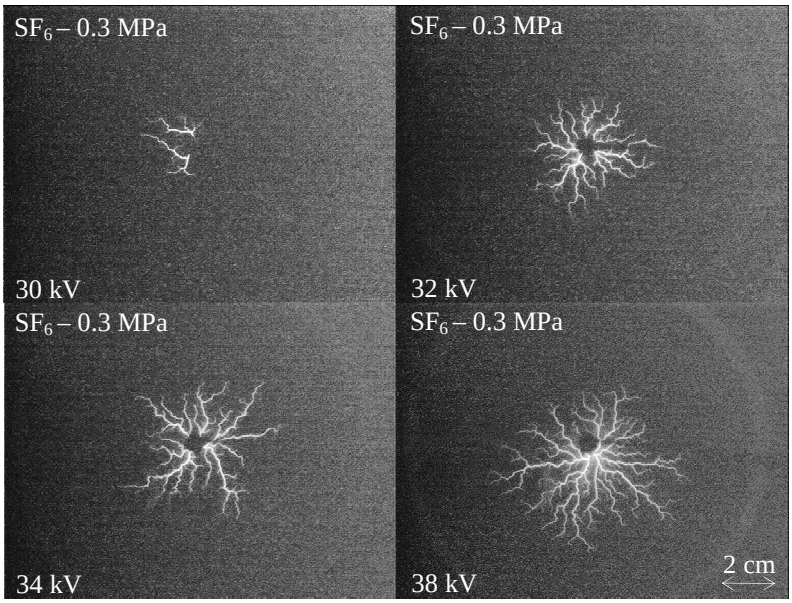
3. Résultats expérimentaux

3.1. Morphologie et longueur finale des décharges

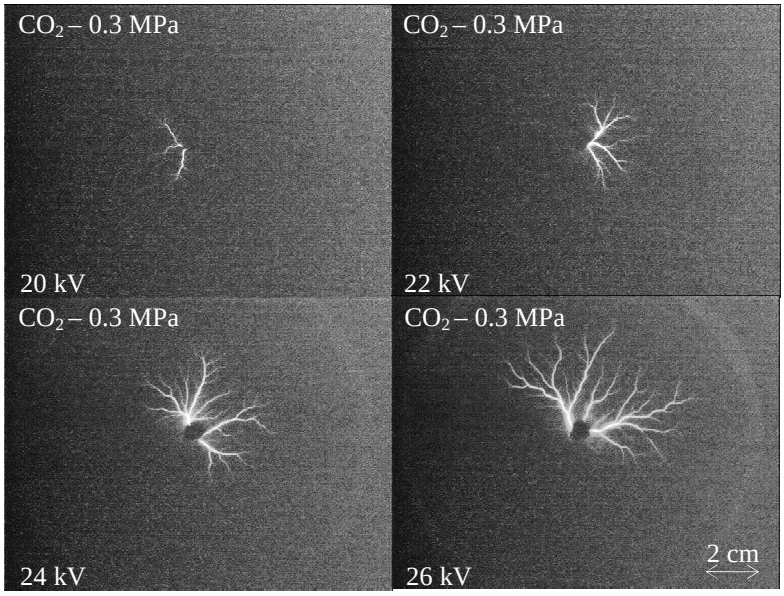
3.1.1. Influence de l'amplitude de la tension appliquée, du type de gaz et sa pression

Les décharges glissantes observées sous tension continue ne sont généralement pas radiales. Elles se composent d'un certain nombre de branches principales ou pieds de décharges qui varient d'une décharge à l'autre. D'autre part, les branches de la même décharge peuvent avoir des longueurs différentes et leurs extrémités ne forment pas un contour circulaire comme celui caractérisant les décharges radiales. Quelques exemples de ces décharges sont présentés sur les Figures 5.2 et 5.3.

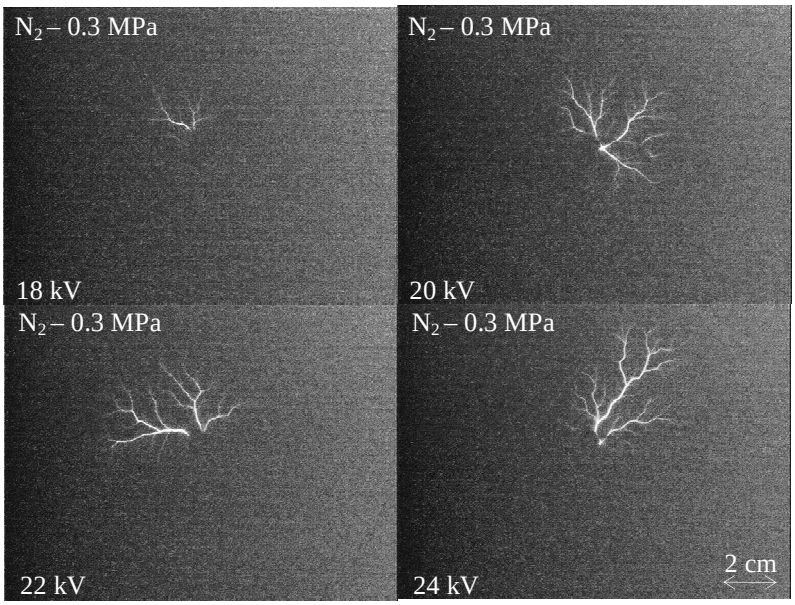
L'orientation des branches et leur répartition sur la surface de l'échantillon solide sont influencées par la charge d'espace. La présence de celle-ci sur la surface du solide isolant, crée un renforcement du champ dans une direction et son affaiblissement dans une autre. Ce déséquilibre crée des trajectoires privilégiées pour les streamers en direction des zones où le champ est le plus élevé. Ce qui explique la forme particulière des décharges glissantes sous tension continue. Pour les deux types de solide étudiés à savoir le verre et la Bakélite, nous remarquons que la longueur et la densité des décharges augmentent avec l'amplitude de la tension appliquée (Figures 5.2 et 5.3)



(a)

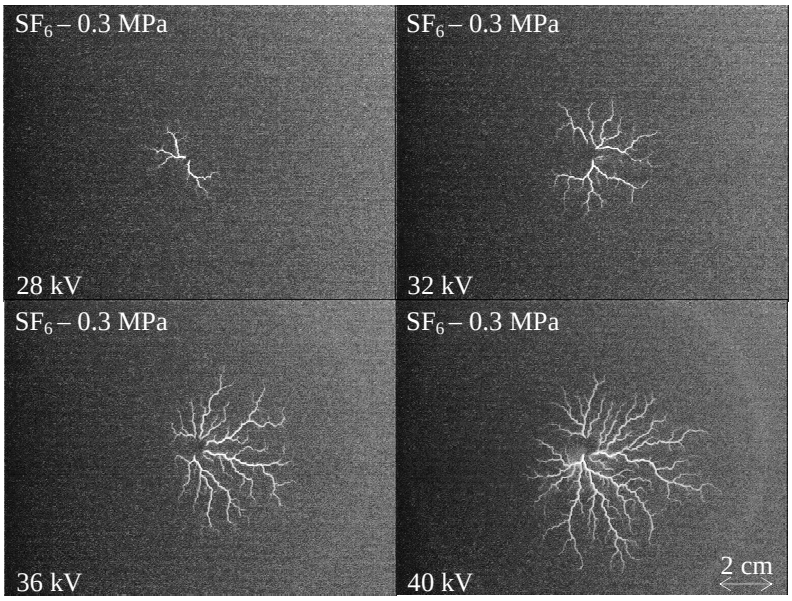


(b)

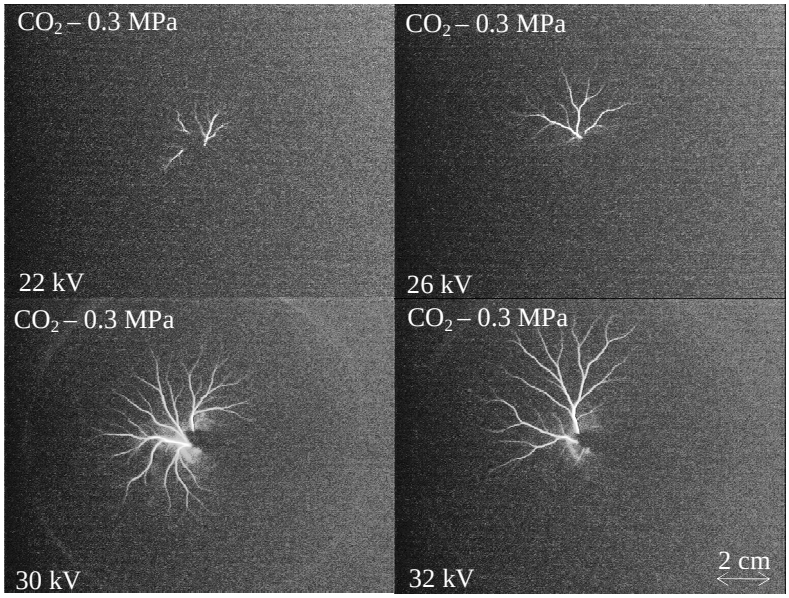


(c)

Figure 5.2. *Influence de l'amplitude de la tension sur les décharges glissantes sous tension continue pour un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur dans le SF_6 (a), le CO_2 (b) et le N_2 (c)*



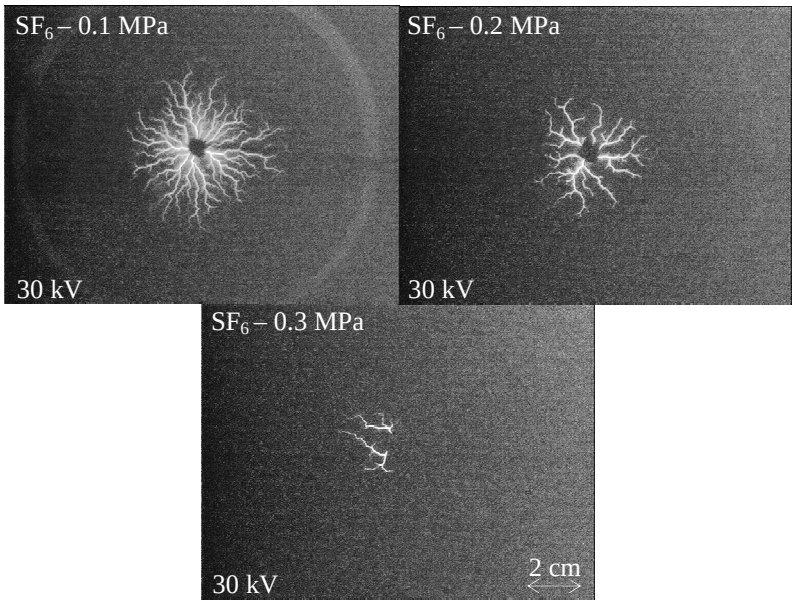
(a)



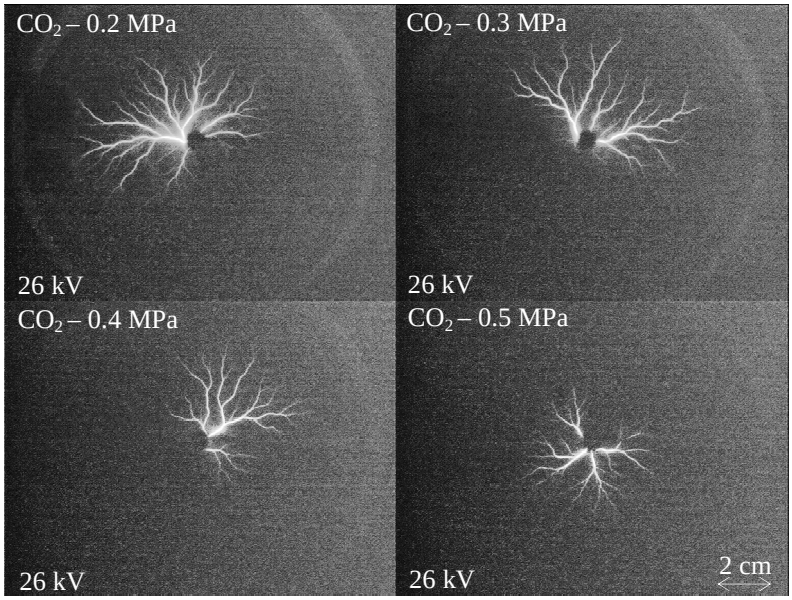
(b)

Figure 5.3. *Influence de l'amplitude de la tension sur les décharges glissantes sous tension continue obtenues avec un échantillon en Bakélite de 2 mm d'épaisseur dans le SF_6 (a) et le CO_2 (b)*

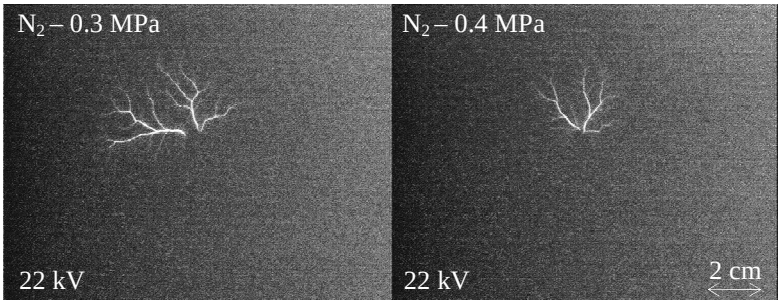
Nous remarquons que la forme des décharges glissantes sous tension continue dépend fortement de la nature du gaz et de sa pression. L'aspect général change selon le type du gaz et la densité des branches est plus importante dans le SF_6 que dans le CO_2 et le N_2. En plus, les décharges sont plus longues et plus ramifiées lorsque la pression diminue (Figures 5.3 et 5.4).



(a)



(b)



(c)

Figure 5.4. *Influence de pression du gaz sur les décharges glissantes sous tension continue obtenues avec un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 (a), CO_2 (b) et N_2 (c)*

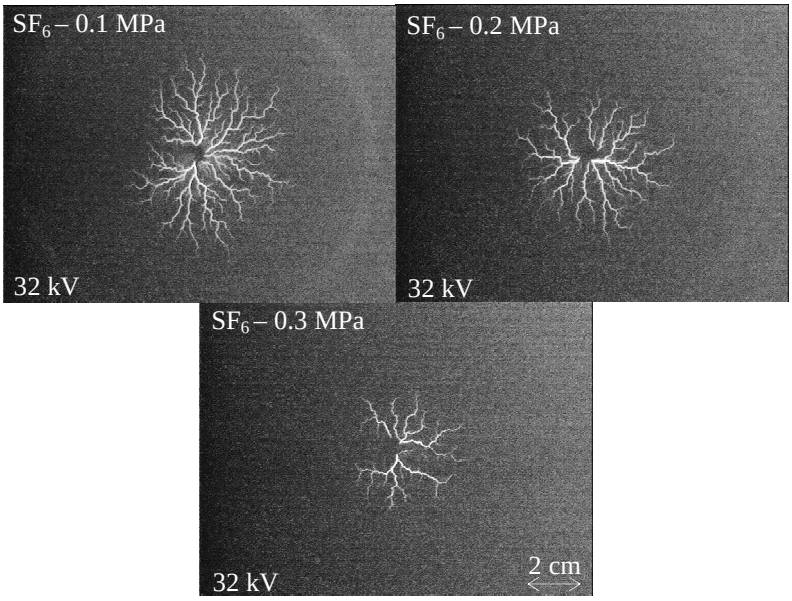


Figure 5.5. *Influence de pression du gaz sur les décharges glissantes sous tension continue obtenues avec un échantillon en Bakélite de 2 mm d'épaisseur dans le SF_6*

Les résultats de mesure de la longueur finale L_f obtenus avec les deux types de matériaux étudiés de 2 mm d'épaisseur, en présence des trois gaz N_2, CO_2 et SF_6, sont illustrés par les Figures 5.6 à 5.8. Nous remarquons que, quelques soient la nature de l'échantillon solide et le type du gaz, L_f augmente quasi-linéairement en fonction de la tension appliquée et diminue lorsque la pression du gaz augmente. Pour une pression de gaz et un type de solide donnés, L_f est plus courte avec le SF_6 qu'avec le CO_2 et le N_2. D'autre part, L_f est légèrement plus élevée avec le verre qu'avec la Bakélite.

Aussi, la tension de génération des décharges glissantes sous tension continue est nettement supérieure à celle des décharges sous tension alternative (chapitre 4) et impulsionnelle [101][102]. Pour une tension donnée, la longueur finale des décharges sous tension alternative et impulsionnelle (choc de foudre normalisé) est supérieure à celle obtenue sous tension continue.

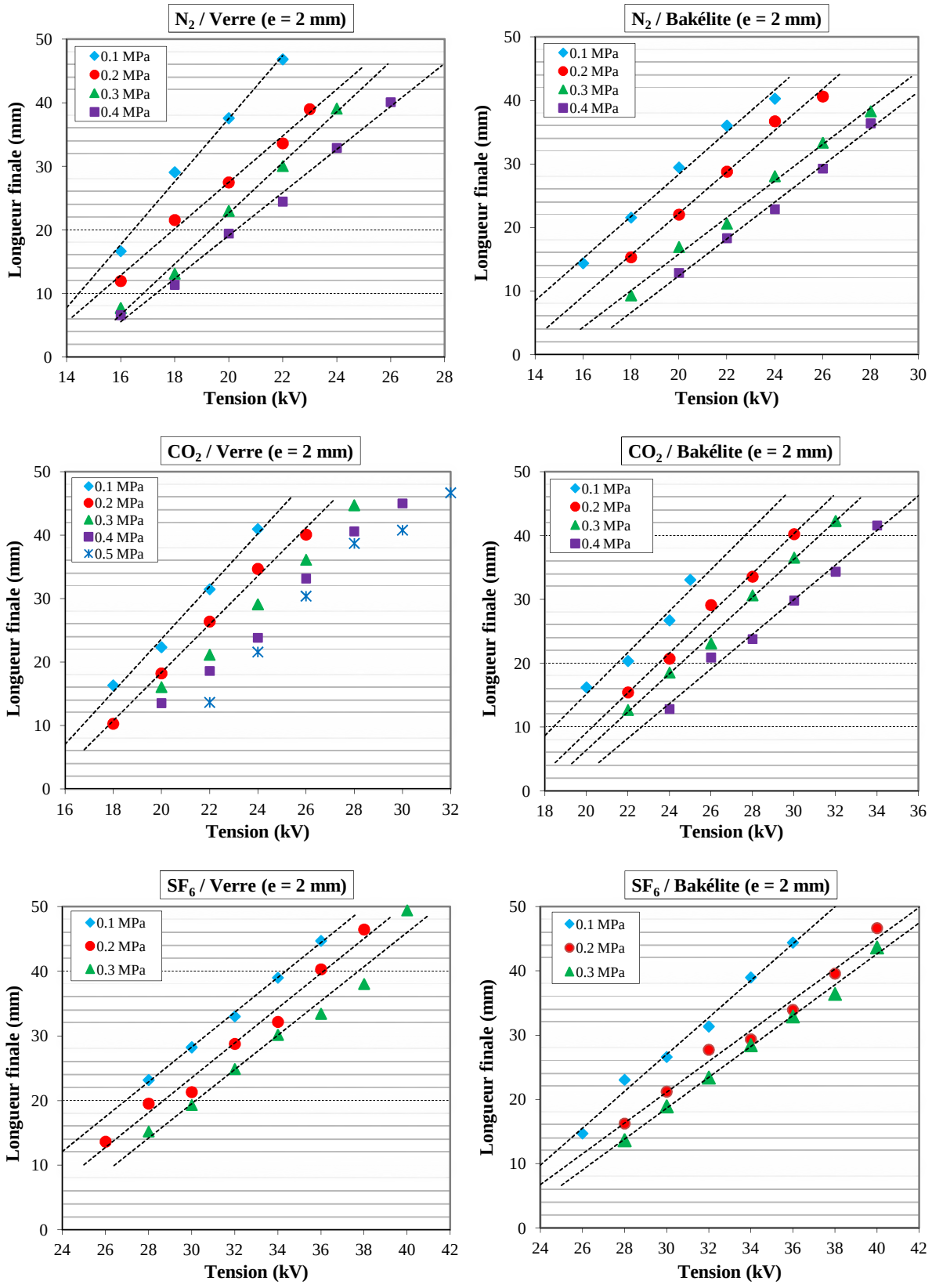


Figure 5.6. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction de la tension en présence des gaz N_2, CO_2 et SF_6 sous différentes pressions pour les deux matériaux (e = 2 mm): Verre (ε_r = 5) et Bakélite (ε_r = 4.8), sous tension continue*

3.1.2. Influence de la concentration de SF_6 dans les mélanges

Les Figures 5.9 et 5.10 donnent quelques exemples représentatifs des décharges glissantes se propageant dans les mélanges SF_6 - N_2 et SF_6 - CO_2 pour des échantillons en verre. On voit clairement que l'addition du SF_6 dans les gaz N_2 et CO_2 modifie la forme des décharges. Ces dernières sont plus courtes mais plus ramifiées et se développent d'une manière uniforme sur la surface du solide contrairement à ce qu'on a observé dans les gaz purs (N_2 et CO_2) où des trajectoires préférentielles des décharges sont observées. Cela peut être justifié par la présence d'un gaz électronégatif (SF_6 dans notre cas) qui attenu l'effet de la charge d'espace.

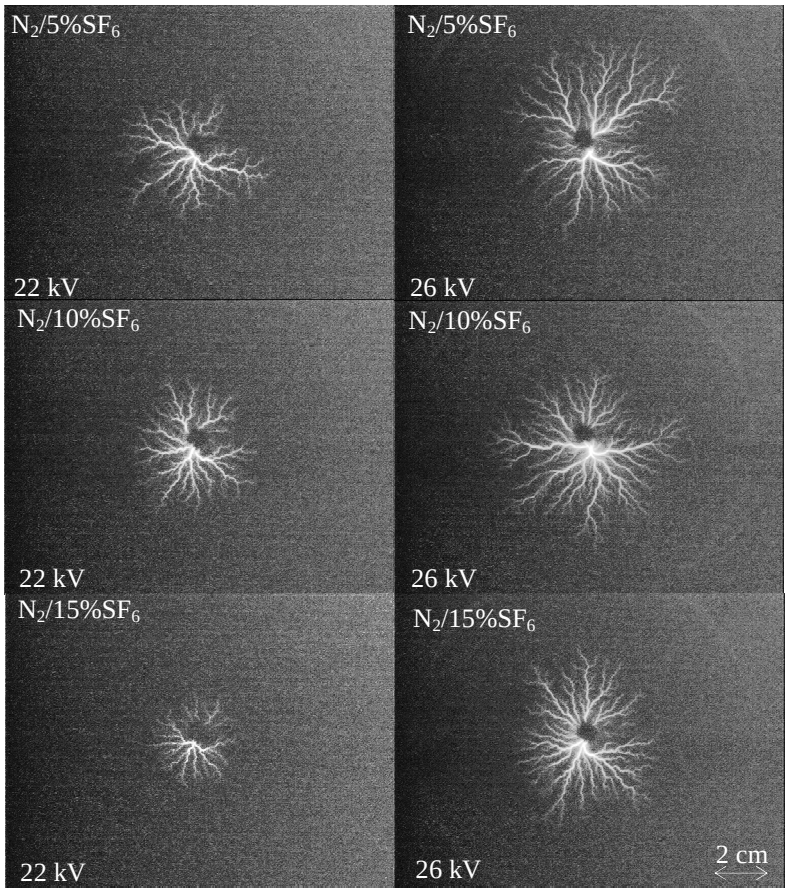


Figure 5.7. *Influence de la concentration de SF_6 dans le mélange SF_6 - N_2 à 0.3 MPa sur les décharges glissantes sous tension continue obtenues avec un échantillon en verre de 2 mm*

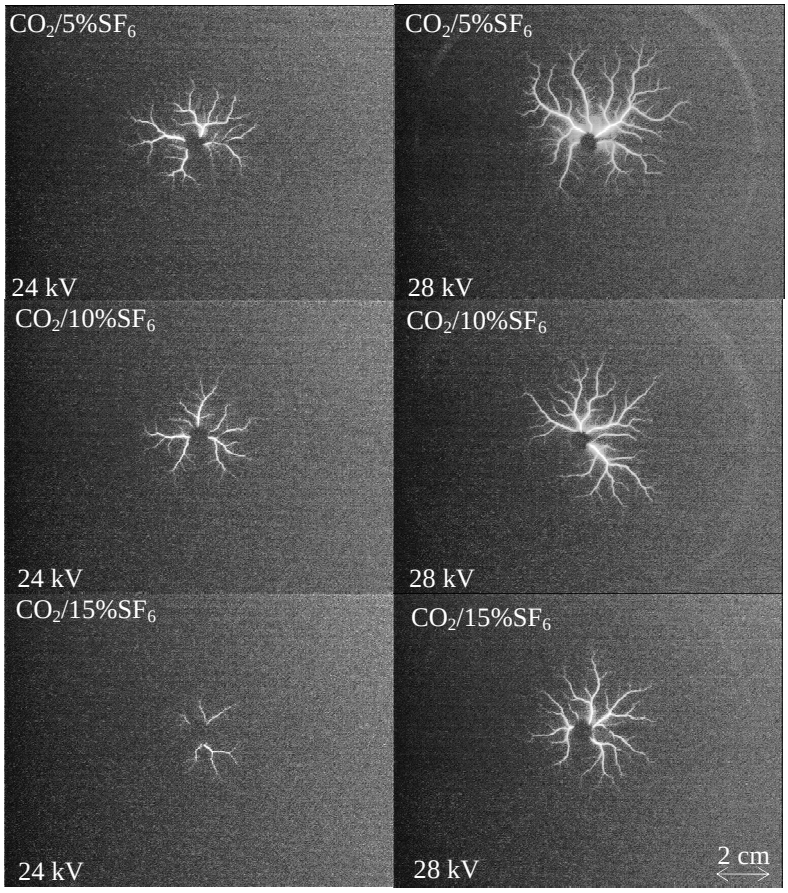


Figure 5.8. *Influence de la concentration de SF_6 dans le mélange SF_6 - CO_2 à 0.3 MPa, sur les décharges glissantes sous tension continue obtenues avec un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur*

L'évolution de la longueur finale L_f des décharges en fonction de la tension des mélanges SF_6 - N_2 et SF_6 - CO_2 sous une pression de 0.3 MPa obtenues avec des échantillons en verre et en Bakélite de 2 mm d'épaisseur est présentée sur les Figures 5.11 et 5.12. Nous constatons que L_f diminue lorsque le pourcentage de SF_6 augmente. En d'autres termes, l'addition d'une faible quantité de SF6 dans ces mélanges permet d'améliorer la tenue de la structure isolante.

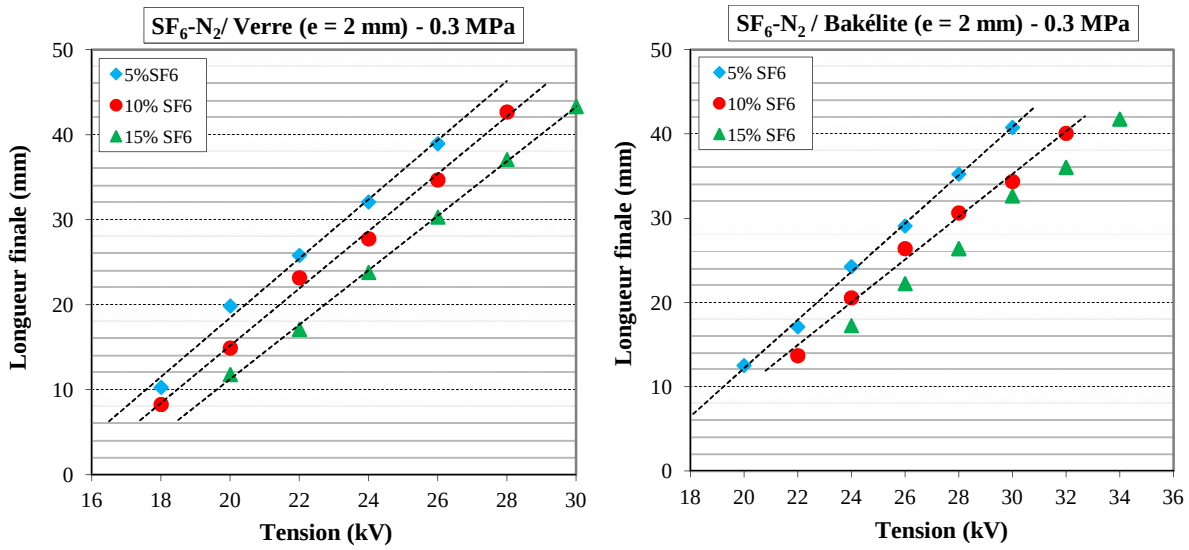


Figure 5.9. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction du pourcentage de SF_6 dans le N_2 à 0.3 MPa, sous tension continue, pour les deux matériaux (e = 2 mm): Verre et Bakélite*

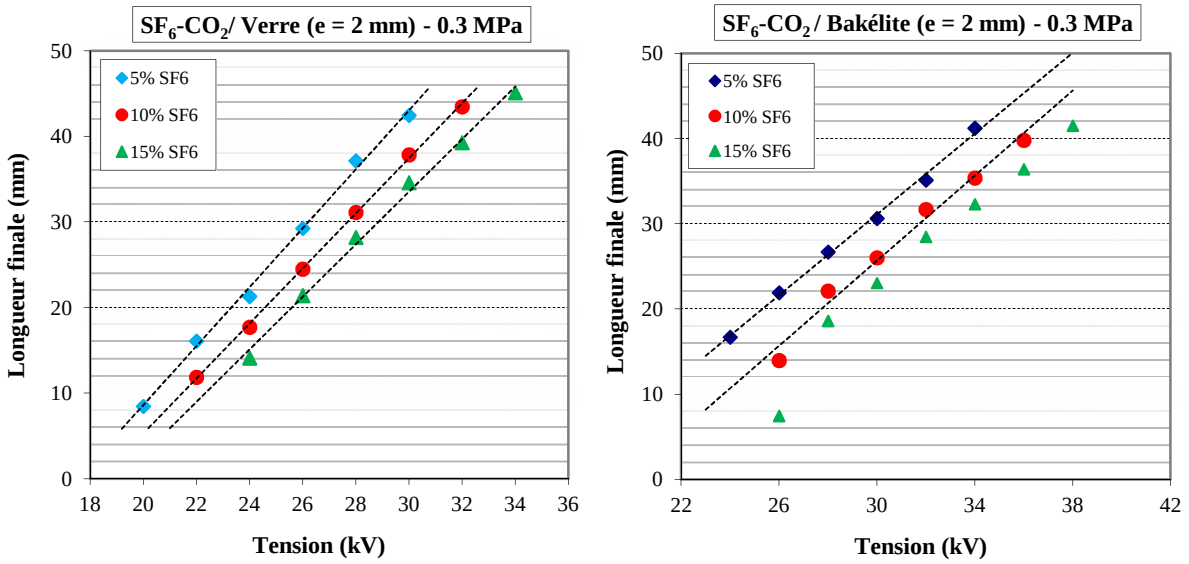
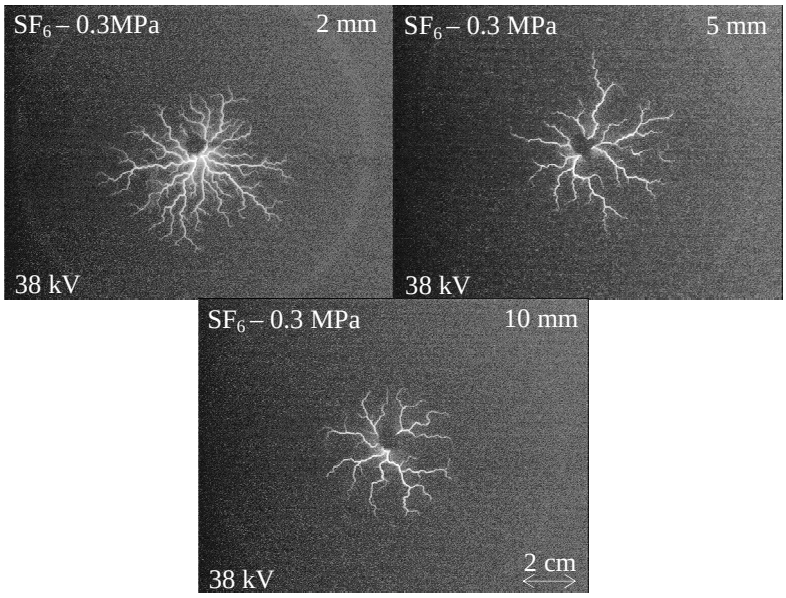


Figure 5.10. *Variation de la longueur finale des décharges en fonction du pourcentage de SF_6 dans le CO_2 à 0.3 MPa, sous tension continue, pour les deux matériaux (e = 2 mm): Verre et Bakélite*

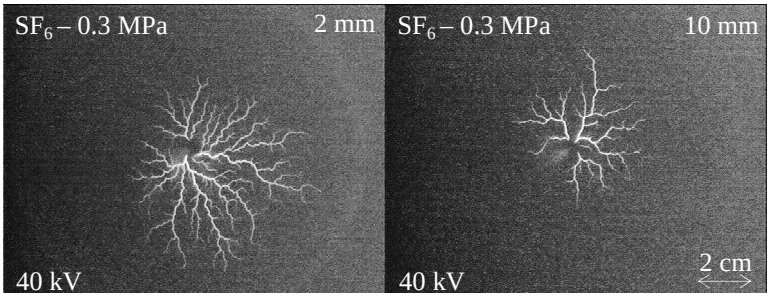
3.1.3. Influence de l'épaisseur de l'échantillon solide

L'aspect général des décharges glissantes et la densité totale des branches dépendent fortement de l'épaisseur du solide isolant sous tension continue. Plus les échantillons solides

sont minces, plus les décharges glissantes sont ramifiées quel que soit le matériau du solide, comme on peut le voir sur la Figure 5.11. Nous reviendrons sur ce point avec plus de détails lorsque nous aborderons l'analyse fractale des décharges glissantes.



(a)



(b)

Figure 5.11. *Influence de l'épaisseur de l'isolant solide sur les décharges glissantes obtenues avec un échantillon en verre (a) et en Bakélite (b) de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6, sous tension continue*

Les variations de $L_f = f(U)$ pour des échantillons en verre et en Bakélite de différentes épaisseurs sont données sur la Figure 5.12. Pour une tension et une pression données, L_f diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Ce résultat indiquerait encore une fois l'implication des effets capacitifs dans les mécanismes de développement des décharges.

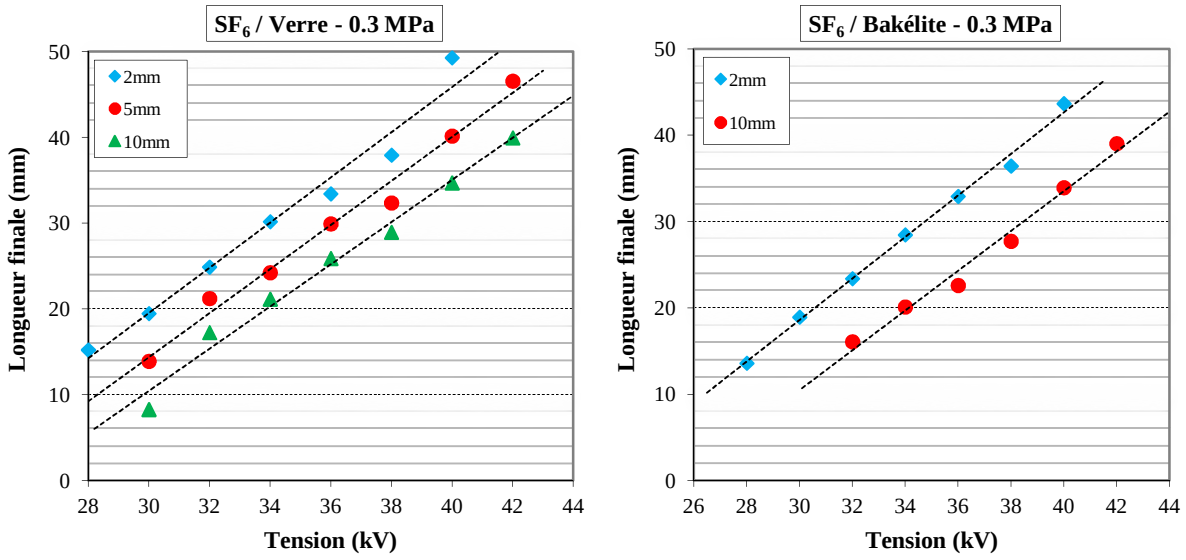


Figure 5.12. *Variation de la longueur finale des décharges glissantes en fonction de l'épaisseur du solide dans le SF_6 à 0.3 MPa, sous tension continue, pour les deux matériaux (e = 2 mm): Verre et Bakélite*

4. Courants et charges associés aux décharges glissantes

La mesure des courants associés aux décharges surfaciques s'effectue à travers la mesure de la tension aux bornes d'une résistance (non inductive) de 50 Ω ± 5% connectée en série avec la cellule et placée du côté basse tension. Cette tension est mesurée au moyen d'un oscilloscope numérique à mémoire, de haute résolution temporelle de type Agilent MSO 6104A (Mixed Signal Oscilloscopes). Pour protéger l'oscilloscope des éventuelles surtensions, l'impédance de mesure est connectée en parallèle avec deux diodes Zener montées tête bêche et d'un éclateur à gaz (U_{max} = 80 V, protection supplémentaire en cas de claquage des diodes) (Figure 5. 13). La charge électrique est obtenue par intégration du courant obtenue automatiquement par l'oscilloscope.

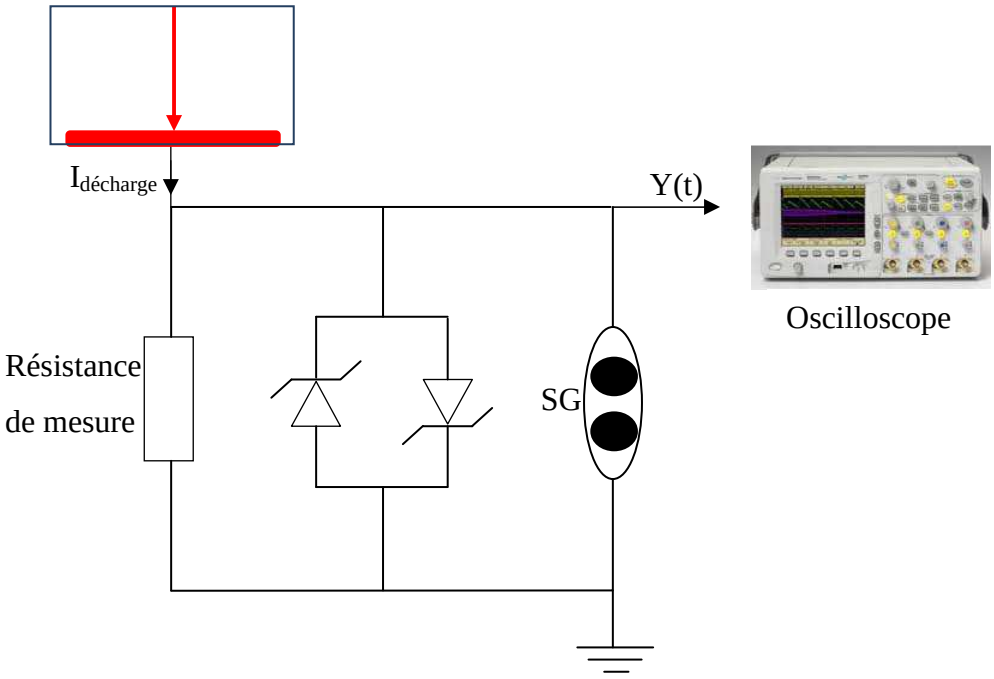


Figure 5. 13. *Schéma électrique destiné à la mesure du courant*

La Figure 5. 14 montre des enregistrements de courants et la charge totale correspondante associés aux décharges glissantes obtenues avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 sous 0.3 MPa de pression pour des valeurs de 30, 34 et 38 kV de tension. Le courant est constitué de plusieurs pics dont l'amplitude augmente avec la tension appliquée. La charge obtenue par intégration du courant augmente aussi avec l'amplitude de la tension. Notons aussi que des enregistrements réalisés durant des temps relativement larges montre l'absence d'une décharge secondaire comme c'était le cas de la tension impulsionnelle (choc de foudre normalisé) [2].

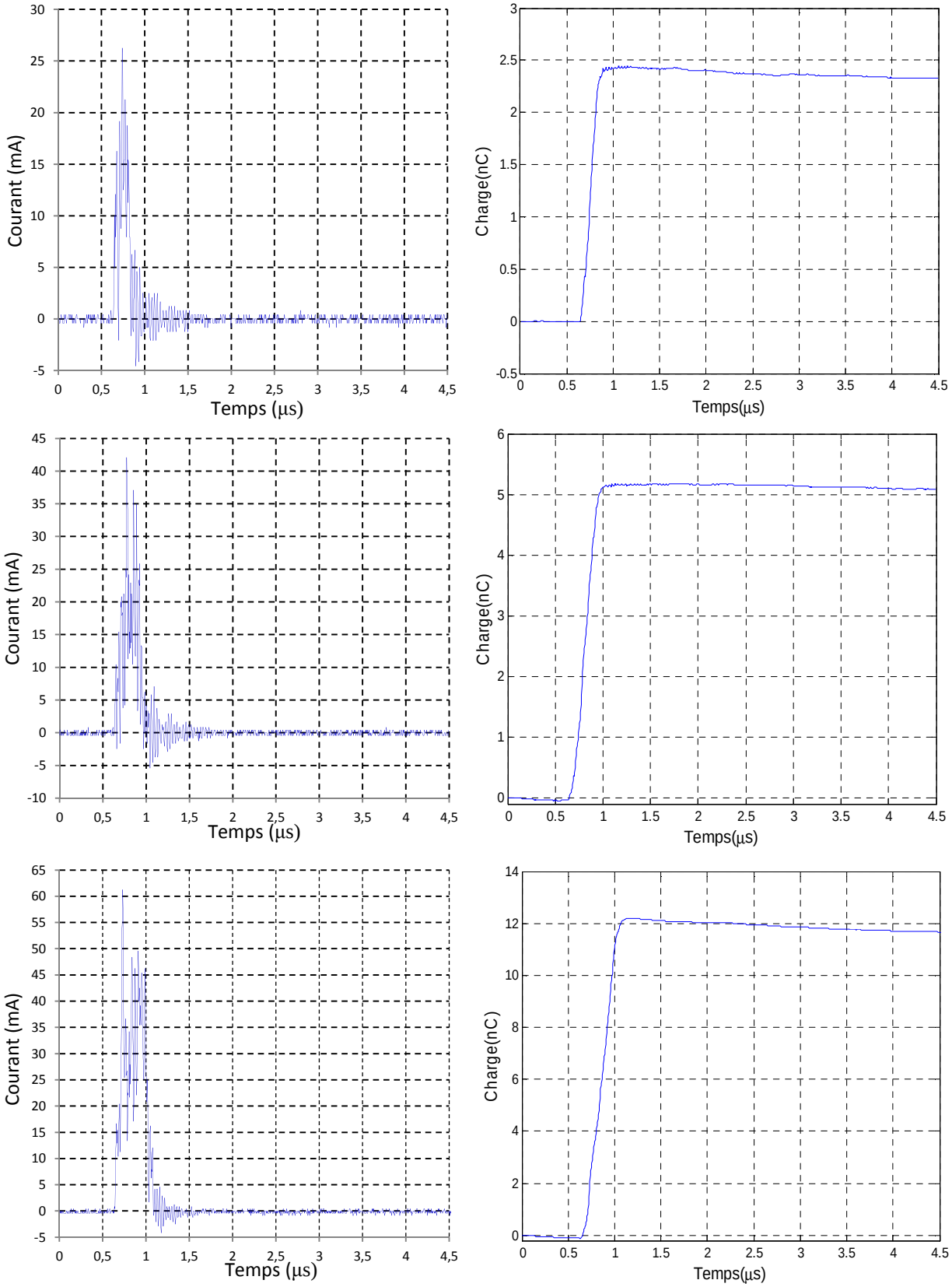


Figure 5. 14. *Les courants et charges associés aux décharges glissantes obtenues avec des échantillons en verre de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 à 0.3 MPa de pression pour différente valeurs de tension 30, 34 et 38 kV*

5. Analyse fractale des décharges glissantes par la méthode de quadrillage (Box counting method)

La dimension fractale peut être calculée par plusieurs méthodes [86]. Dans notre étude nous avons utilisé la méthode de quadrillage. Elle est la plus adaptée pour les décharges surfaciques. Dans les paragraphes suivants nous allons résumer le principe de cette méthode ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

5.1. Procédure expérimentale

Comme nous venons de le voir, la longueur finale des décharges glissantes sous tension continue est fortement influencée par la pression du gaz et l'épaisseur du diélectrique solide. En diminuant la pression, les décharges sont plus longues et plus ramifiées. Plus l'échantillon solide est mince, plus les décharges qui se développent sur sa surface sont longues et ramifiées. Dans le but de faire une comparaison de la dimension fractale *D* des décharges et d'étudier l'influence du type de l'isolant solide sur *D*, l'étude est réalisée avec des échantillons solides en verre et en Bakélite immergés dans le gaz SF_6.

Pour analyser le comportement fractal des décharges glissantes, nous avons choisi des décharges de 38 mm et 35 mm de longueur finale comme longueur standard pour étudier respectivement l'influence de l'épaisseur du matériau et de la pression du gaz.

La méthode expérimentale consiste à:

- **Pour l'étude de l'influence de l'épaisseur de l'échantillon solide** : la tension est augmentée progressivement, sous une pression de 0.3 MPa du gaz et pour chaque épaisseur, jusqu'à l'obtention d'une décharge de 38 mm de longueur.
- **Pour l'étude de l'influence de la pression du gaz** : la tension est augmentée progressivement, pour une épaisseur de l'isolateur de 2 mm et pour chaque pression, jusqu'à l'obtention d'une décharge de 35 mm.

Les valeurs moyennes des tensions nécessaires pour obtenir une décharge de 38 et 35 mm de longueur finale pour le verre et la Bakélite en fonction de l'épaisseur et de la pression du gaz sont regroupées dans les Tableaux 5.1 et 5.2. Nous remarquons que pour atteindre la

même longueur finale, il faudrait un peu plus de tension avec le solide en Bakélite qu'avec celui en verre. Et que cette tension augmente lorsque la pression et l'épaisseur de l'échantillon solide augmentent.

Echantillon solide	e = 2 mm	e = 5 mm	e = 10 mm
Verre	38.5	39.5	41.5
Bakélite	38.5	-	42

Tableau 5.1. *Tension moyenne requise pour l'obtention d'une décharge de 38 mm de longueur finale pour différentes épaisseurs du matériau solide en présence de SF_6 à 0.3 MPa*

Echantillon solide	P = 0.1 MPa	P = 0.2 MPa	P = 0.3 MPa
Verre	32.5	34.5	37
Bakélite	33	36.5	37.5

Tableau 5.2. *Tension moyenne requise pour l'obtention d'une décharge de 35 mm de longueur finale se propageant sur des matériaux solides de 2 mm d'épaisseur en présence de SF_6 sous différentes pressions*

5.2. Principe de la méthode de quadrillage

La méthode de quadrillage utilisée pour le calcul de la dimension fractale *D* des décharges surfaciques consiste à couvrir la figure de la décharge par un maillage carrée de côté *l*, et de relever le nombre de carrés *N* couvrant la décharge. Cette démarche est répétée pour différentes tailles de maillage. La dimension fractale de la décharge est estimée selon les relations suivantes:

$$N\,(l) = l^{-D} \tag{5.1}$$

$$D = -\lim_{l\to 0} \frac{\log N(l)}{\log l} \tag{5.2}$$

5.3. Programme de calcul

La première étape du programme consiste à transformer les images originales des décharges en binaire (c'est-à-dire en noir et blanc). Ces images binaires sont ensuite traitées

avec un code de calcul informatique qui consiste à générer un maillage carré de coté l qui couvre complètement l'image de la décharge. Le nombre de carrés $N(l)$ est compté pour chaque valeur de l. En utilisant le système de coordonnées logarithmique, nous traçons la caractéristique $N = f(l)$ et la dimension fractale D correspond à la pente de la partie linéaire obtenue. La Figure 5.15 illustre les différentes étapes du programme de calcul utilisé.

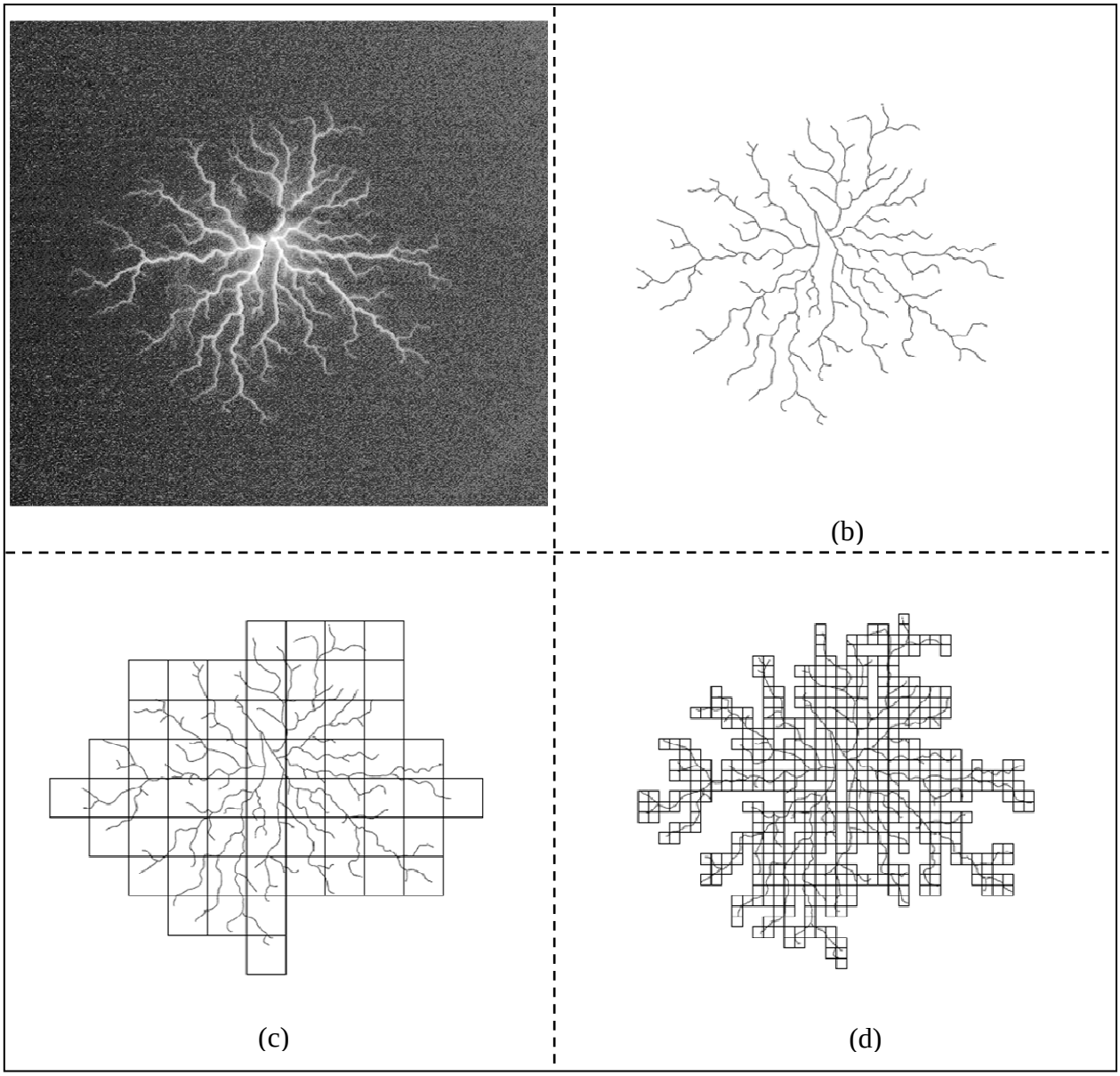


Figure 5.15. *Principe de la méthode de quadrillage appliquée à une décharge se propageant sur un échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur : (a) image originale, (b) image en binaire, (c) et (d) images binaires couvertes par un maillage carré de coté l = 40 pixels et l = 10 pixels respectivement*

5.4. Résultats

5.4.1. Influence de l'épaisseur du solide

La Figure 5.16 donne quelques exemples d'images permettant d'analyser l'influence de l'épaisseur de l'échantillon solide sur le comportement fractal des décharges. Les caractéristiques $N = f(l)$ pour les différentes épaisseurs utilisées dans cette étude sont présentées sur les Figures 5.17 et 5.18. La dimension fractale D de chaque figure est extraite de la pente des droites. Nous remarquons que:

- Plus l'épaisseur du solide est faible, plus la décharge est ramifiée et plus D est élevée et cela quelque soit le type de l'échantillon solide.

- Pour une épaisseur donnée, D est légèrement plus élevée pour le verre ($\varepsilon_r = 5$) qu'avec la Bakélite ($\varepsilon_r = 4.8$).

Ces deux observations nous mènent à conclure qu'il existe une relation entre les caractéristiques du matériau solide (l'épaisseur e et la permittivité relative ε_r), et la dimension fractale D des décharges glissantes en présence d'un gaz donné.

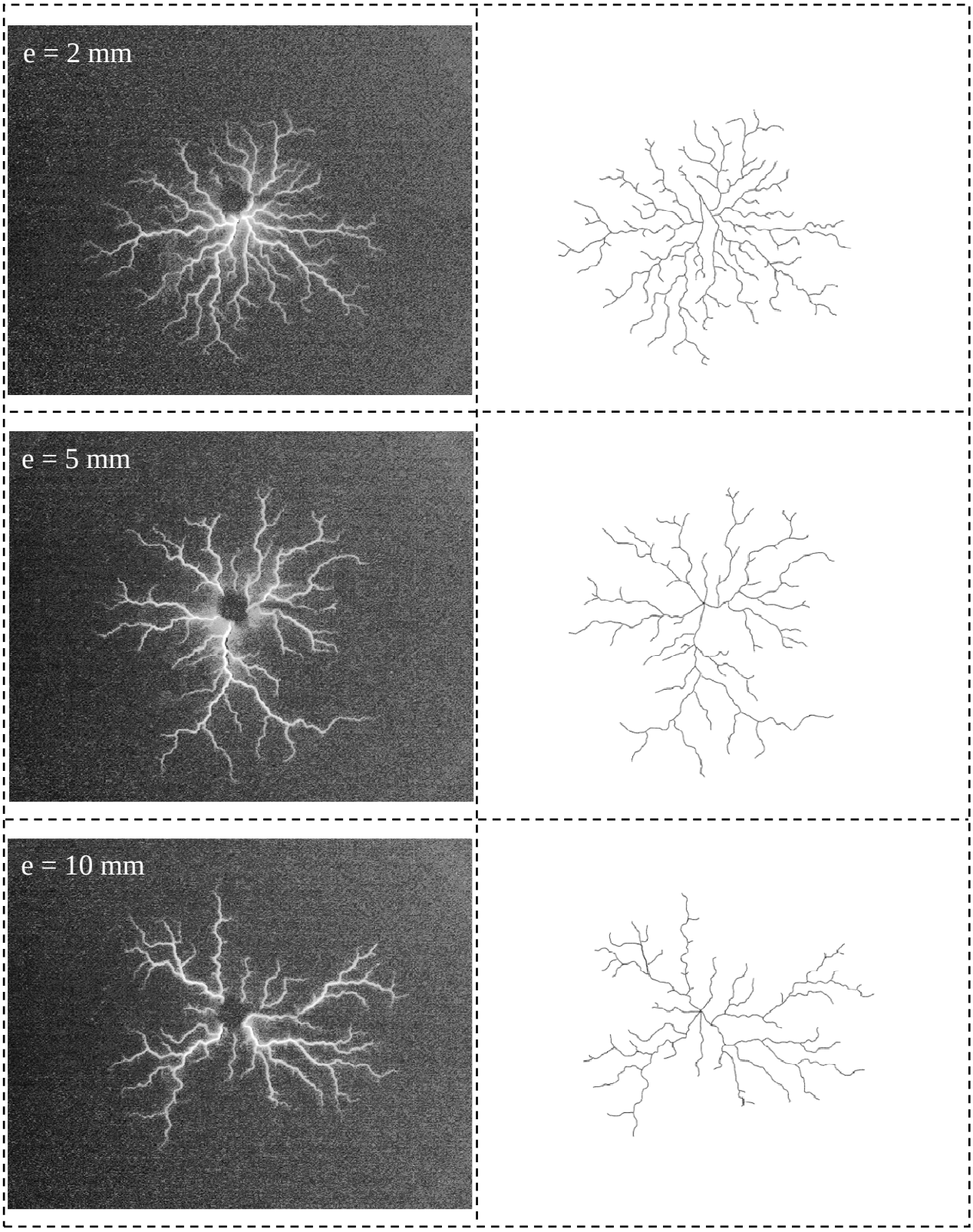


Figure 5.16. *Images de décharges glissantes se propageant sur l'échantillon en verre en présence de SF_6 à 0.3 MPa sous tension continue pour différentes épaisseur: (a) image originale (b) image en binaire correspondante*

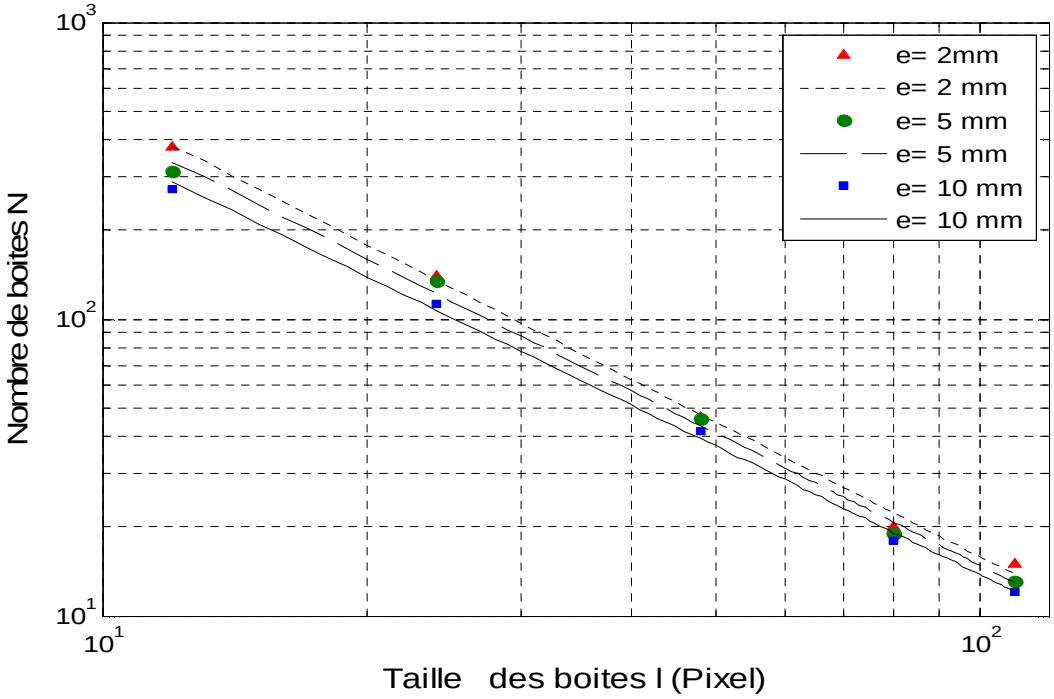


Figure 5.17. *Nombre total de boîtes N en fonction de la taille du maillage l calculé à partir des décharges glissantes obtenues avec l'échantillon solide en verre en présence de SF_6 à 0.3 MPa en utilisant la méthode de quadrillage: D ≈ 1.50, 1.47, 1.43 respectivement pour e = 2 mm, 5 mm, 10 mm*

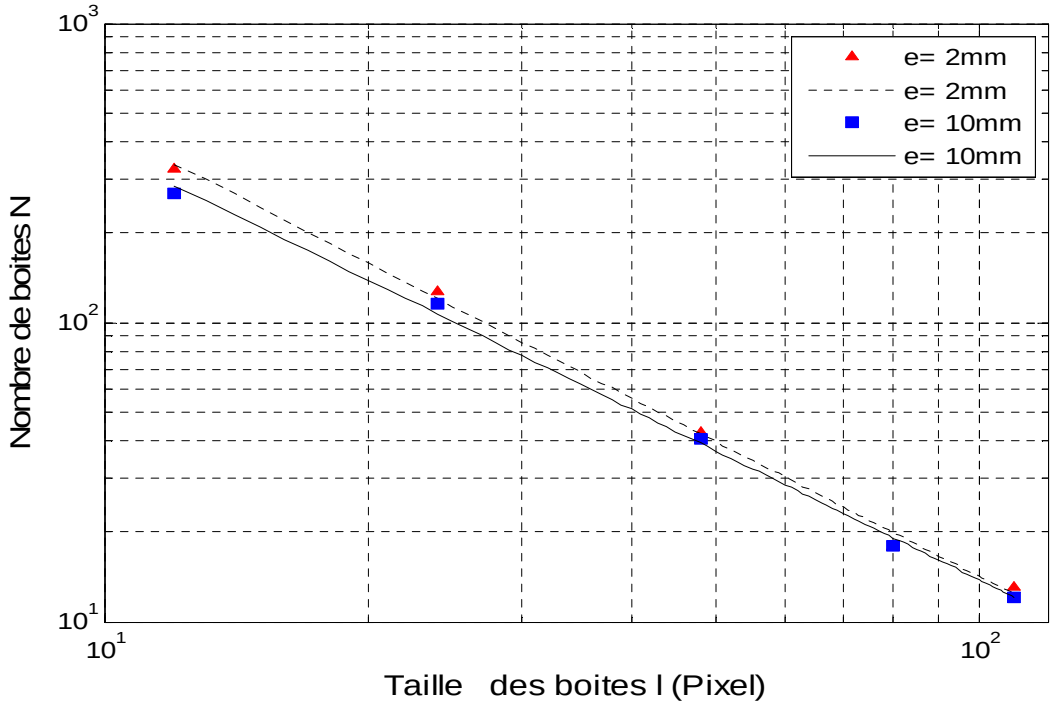


Figure 5.18. *Nombre total de boites N en fonction de la taille du maillage l calculé à partir des décharges glissantes obtenues avec l'échantillon solide en Bakélite en présence de SF_6 à 0.3 MPa en utilisant la méthode de quadrillage: D ≈ 1.49, 1.43 respectivement pour e =2 mm, 10 mm*

5.4.2. Influence de la pression

Pour montrer l'influence de la pression du gaz sur la dimension fractale *D* des décharges, la tension est augmentée progressivement jusqu'à l'obtention des décharges de longueur 35 mm, valeur choisie comme longueur standard dans cette partie. Les mesures sont réalisées en fonction de la pression du gaz (0.1, 0.2 et 0.3 MPa) sur des matériaux solides d'épaisseurs constantes e = 2 mm. Des exemples de décharges et leurs images binaires correspondantes sont présentés sur la Figure 5.19. Nous remarquons, d'après les caractéristiques *N = f(l)*, que la dimension fractale *D* augmente lorsque la pression diminue quelle que soit la nature de l'isolant solide. En d'autres termes, les décharges sont plus ramifiées lorsque la pression diminue. Ainsi, il existe une relation entre la pression du gaz et le degré de ramification des décharges représenté par la dimension fractale *D*.

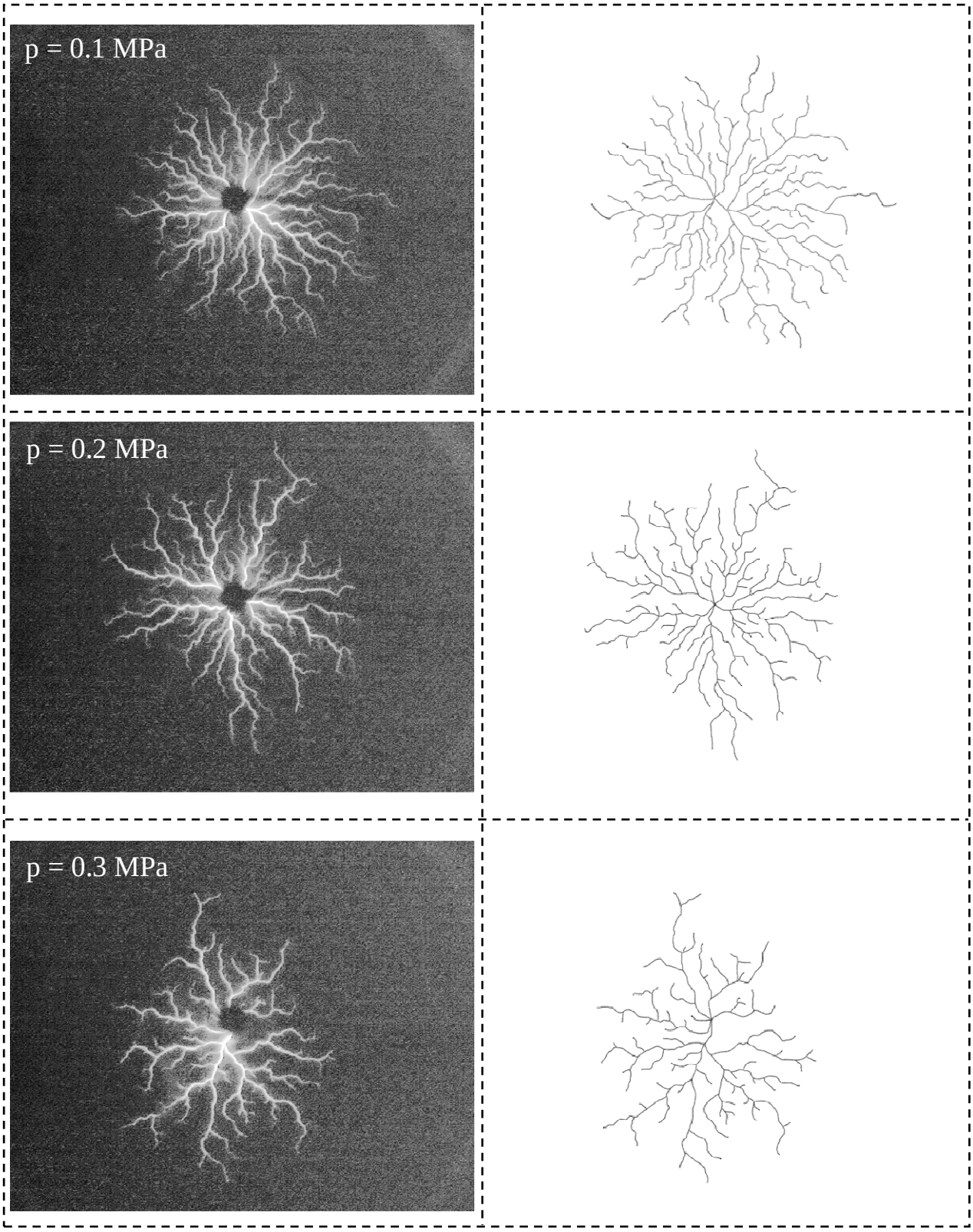


Figure 5.19. *Images de décharges glissantes se propageant sur l'échantillon en verre de 2 mm d'épaisseur sous tension continue pour différentes pressions de SF_6: (a) image originale et (b) image en binaire correspondante*

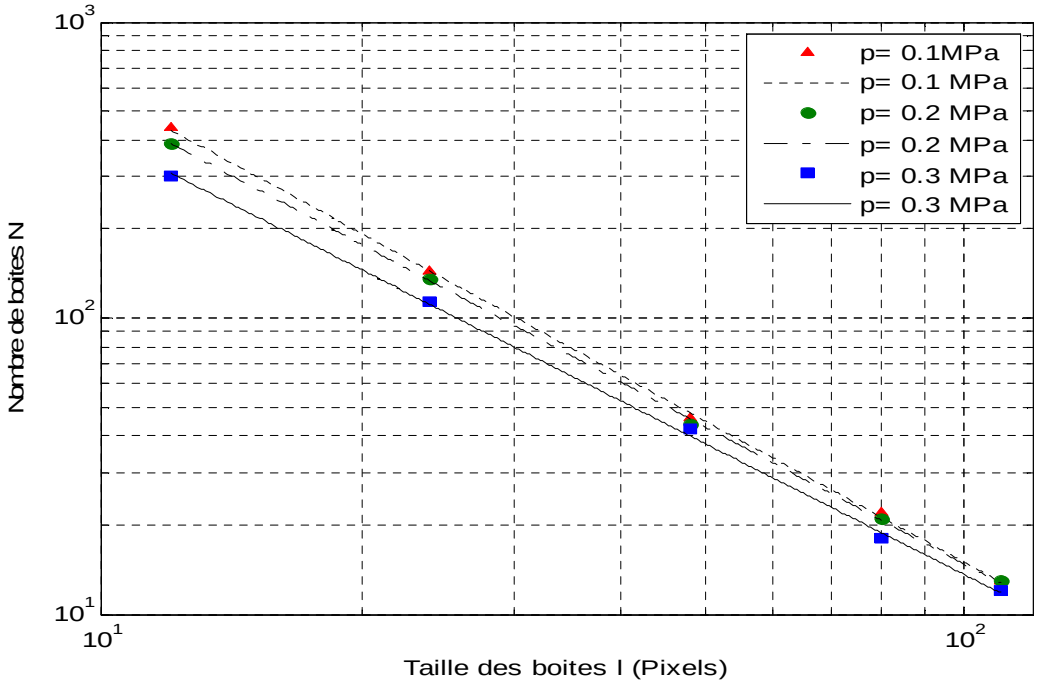


Figure 5.20. *Nombre total de boîtes N en fonction de la taille du maillage l calculé à partir des décharges glissantes obtenues avec l'échantillon solide en verre en présence de SF_6 en utilisant la méthode de quadrillage: D ≈ 1.58, 1.54, 1.47, respectivement pour p = 0.1 MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa*

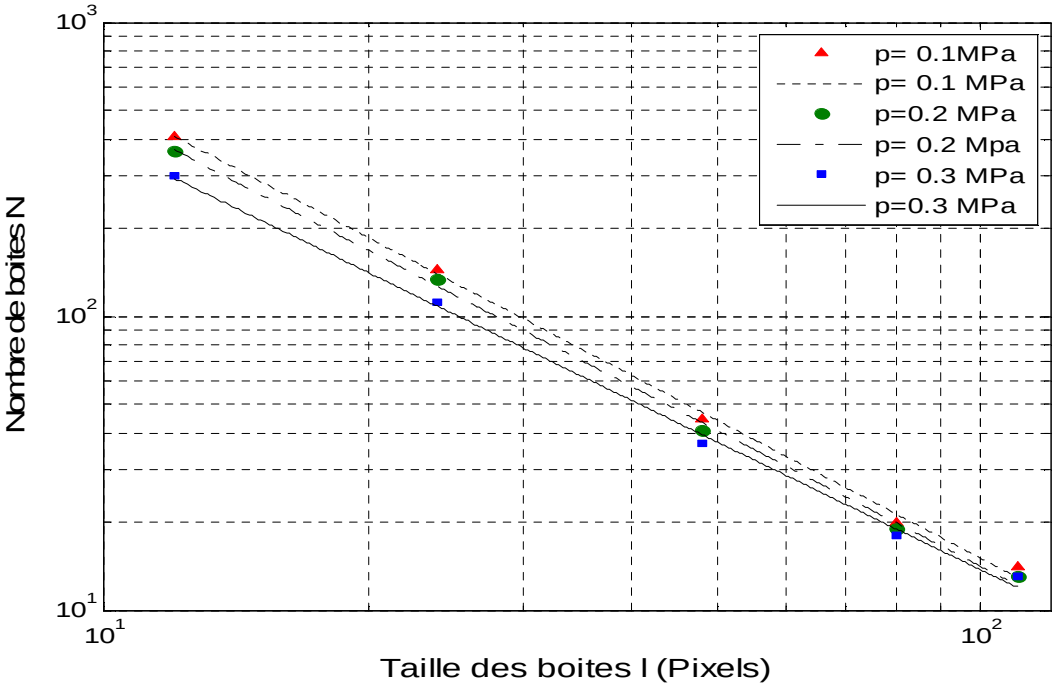


Figure 5.21. *Nombre total de boites N en fonction de la taille du maillage l calculé à partir des décharges glissantes obtenues avec l'échantillon solide en Bakélite en présence de SF_6 en utilisant la méthode de quadrillage: D ≈ 1.56, 1.53, 1.44, respectivement pour p = 0.1MPa, 0.2 MPa, 0.3 MPa*

6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons montré que la nature et l'épaisseur du solide isolant, l'amplitude de la tension, ainsi que le type de gaz et sa pression, jouent un rôle important dans la génération, la propagation et la forme générale des décharges glissantes sous tension continue. Les décharges générées ont en général un aspect non-radial. L'orientation des branches, lors de la propagation, est influencée par la présence de charges d'espace présentes sur la surface de l'isolant solide.

La longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et que L_f diminue lorsque la pression du gaz augmente. Par ailleurs, pour une pression et une tension données, L_f diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. L_f est plus courte dans le SF_6 que dans le CO_2 ou N_2. Et l'augmentation du pourcentage de SF_6 dans le gaz purs N_2 et CO_2 engendre une diminution significative de la longueur finale des décharges quelque soit le type du solide utilisé.

Les caractéristiques $L_f(U)$ obtenues avec des échantillons en Bakélite et en verre, des matériaux dont les permittivités diélectriques sont relativement élevées (ε_r = 4.8 t ε_r = 5 respectivement), sont très proches.

Les longueurs finales des décharges sont nettement inférieures sous tension continue, comparées à celles obtenues sous tension alternative, et par conséquent les tensions de contournement sont plus grandes. L'amplitude des pics de courant associés aux décharges ainsi que la charge totale correspondante augmentent avec l'amplitude de la tension appliquée.

Nous avons également établi une relation entre la nature du matériau solide et son épaisseur, la pression du gaz et la dimension fractale des décharges surfaciques. En utilisant la méthode de quadrillage (ou des boîtes), nous avons montré que la dimension fractale D des décharges diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente. Plus l'épaisseur du solide est grande, plus le degré de ramification des décharges est moins important. Pour une épaisseur de solide donnée, D est légèrement plus élevée dans le cas de l'échantillon solide en verre. D'autre part, la dimension fractale D augmente lorsque la pression diminue.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, nous avons en premier lieu, analysé la tension de claquage sous tension impulsionnelle des gaz purs (SF_6, CO_2, N_2 et air sec) ainsi que celle des mélanges (SF_6/N_2, SF_6/CO_2 et SF_6/ air sec) pour des configurations d'électrodes pointe - plan et sphère - plan. Nous avons pu caractériser les décharges glissantes aux interfaces solide/gaz sous tension alternative (50 Hz) et continue, en géométrie pointe - plan et d'obtenir des résultats importants relatifs à la morphologie et la longueur finale des décharges.

Nous avons montré que l'influence de la polarité de la tension sur la tenue diélectrique des gaz étudiés dépend du type et de la géométrie des électrodes utilisés. Autrement dit, en champ non uniforme (pointe - plan), la tension de claquage est plus élevée en polarité négative qu'en polarité positive quelles que soient la nature et la pression du gaz. Cependant, cette influence de la polarité en champ quasi-uniforme (sphère - plan) dépend du type de gaz et de sa pression ainsi que de la distance inter-électrodes. Concernant l'effet de la présence d'un gaz électronégatif (SF_6) dans un mélange, nous avons pu observer que l'ajout d'une faible quantité de SF_6 permet d'améliorer la tenue diélectrique du gaz et que cette synergie est meilleure pour les faibles concentrations de SF_6.

La morphologie et la longueur finale des décharges surfaciques dépendent de la forme et de l'amplitude de la tension, de l'épaisseur et de la nature du solide isolant, du type du gaz et de sa pression. Sous les deux types de tension (alternative et continue), l'orientation des branches lors de la propagation des décharges glissantes serait influencée par la présence de charges d'espace déposées à la surface de l'isolant solide. Sous tension continue, nous avons observé que cette distribution dépend aussi de la nature du gaz. En présence de SF_6, les décharges deviennent plus ramifiées que dans le cas des gaz purs N_2 et CO_2.

Pour un solide et un gaz donnés, la longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension appliquée et diminue quand la pression du gaz augmente et/ou l'épaisseur de l'isolateur augmente. Par ailleurs, pour une tension et une épaisseur données, les décharges qui se développent en présence de N_2 et CO_2, sont plus longues que celles dans le SF_6 quelle que soit la valeur de la pression. L'augmentation du pourcentage de SF_6 dans les mélanges SF_6 - CO_2 et SF_6 - N_2 provoque une diminution significative de la longueur finale des décharges.

Les propriétés physiques et géométriques de l'isolant solide influencent grandement la longueur finale des décharges : L_f diminue lorsque l'épaisseur du solide augmente et/ou la différence entre la permittivité du gaz et du solide est faible. L'influence de l'épaisseur du solide et la permittivité diélectrique du solide montre l'implication des effets capacitifs sur le développement des décharges glissantes.

Les longueurs finales des décharges sont nettement plus élevées sous tension alternative, comparée à celles obtenues sous tension continue et par conséquent les tensions de contournement sont plus faibles.

L'utilisation de la méthode de quadrillage pour l'analyse fractale des décharges nous a permis de confirmer l'existence d'une relation entre la dimension fractale *D* des décharges surfaciques et les propriétés physiques et géométriques du solide diélectrique ainsi que la pression du gaz. Lorsque l'épaisseur du solide augmente la dimension fractale des décharges diminue. Pour une épaisseur de solide donnée, D diminue lorsque la pression du gaz augmente.

Bibliographie

[1] L. Kebbabi, “Caractérisation des décharges glissantes se propageant aux interfaces liquide/solide sous différentes formes de tension - relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale,” École Centrale de Lyon, Lyon, France, 2006.

[2] M. L. Coulibaly, “Caractérisation des décharges électriques se propageant aux interfaces gaz/solide – Relation entre propriétés des matériaux et dimension fractale,” Ecole Centrale de Lyon, 2009.

[3] “Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks:1990-2011.” U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC 20460 U.S.A., 2013.

[4] IPC (Intergovernmental Panel on Climate), “Climate Change 1995: The Science of Climate Change: Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.” Cambridge University Press, 1996.

[5] A. R. Ravishankara, S. Solomon, A. A. Turnipseed, and R. F. Warren, “Atmospheric Lifetimes of Long-Lived Halogenated Species,” *Science*, vol. 259, no. 5092, pp. 194–199, Jan. 1993.

[6] L. B. Loeb, *Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms*. University of California Press, 1965.

[7] J.M Meek and J.D Craggs, *Electrical breakdown of gases*, Clarendon Press. 1953.

[8] I. Gallimberti, “The mechanism of the long spark formation,” *Le Journal de Physique Colloques*, vol. 40, no. C7, pp. C7–193–C7–250, Jul. 1979.

[9] R. Morrow and J. J. Lowke, “Streamer propagation in air,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 30, no. 4, p. 614, Feb. 1997.

[10] A. Bondiou and I. Gallimberti, “Theoretical modelling of the development of the positive spark in long gaps,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 27, no. 6, p. 1252, Jun. 1994.

[11] N. L. Aleksandrov and E. M. Bazelyan, “Simulation of long-streamer propagation in air at atmospheric pressure,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 29, no. 3, p. 740, Mar. 1996.

[12] R. Bartnikas and R. M. Eichhorn, *Engineering Dielectrics, Volume IIA, Electrical Properties of Solid Insulating Materials: Molecular Structure and Electrical Behavior - STP 783*. ASTM International, 1983.

[13] R. Fournié, *Les isolants en électrotechnique. Essais - Mécanismes de dégradation - Applications industrielles*. 1990.

[14] S. Mohanty and S. Ghosh, "Modeling of the breakdown voltage of solid insulating materials using fuzzy logic techniques," in *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011, pp. 530–533.

[15] B.F.J. Schonland, *Atmospheric Electricity*. Methuen, London, 1983.

[16] W.F. Schmidt and R.J. Van Brunt, "Comments on the effect of the electron detachment in initiating breakdown in gaseous dielectrics," in *Gaseous Dielectrics III*, L.G. Christophorou and M.O Pace., New York: Pergamon Press, 1982, pp. 561–563.

[17] F. Westley, J.T. Herron, R.F. Hampson, and R.F. Hampson, *NIST Standard Reference Data*. Gaithersburg, Maryland, 1994.

[18] B. Belmadani, J. Casanovas, and A.M. Casanovas, "SF6 decomposition under power arcs. II- Chemical aspects," *IEEE Trans. Electr. Insul*, vol. 26, pp. 1177 – 1182, 1991.

[19] B. Senouci, "Influence des impuretés sur la formation et le mode de la décharge dans le SF6 comprimé en polarité positive," Université Pierre et Marie Curie, Paris, 1987.

[20] R. J. Van Brunt and I. Sauers, "Gas-phase hydrolysis of SOF2 and SOF4," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 85, pp. 4377–4380, 1986.

[21] M. S. Bhalla and J. D. Craggs, "Measurement of Ionization and Attachment Coefficients in Carbon Monoxide in Uniform Fields," *Proc. Phys. Soc.*, vol. 78, no. 3, p. 438, Sep. 1961.

[22] I. Popescu and E. Badareu, *Gaz Ionisés, Décharges Electriques dans les Gaz*. Paris, 1968.

[23] Y. Segui, "Diélectriques – Courant de conduction," *Technique de l'Ingénieur, D2301*, Technique de l'Ingénieur.

[24] J. M. Meek, "A Theory of Spark Discharge," *Physical Review*, vol. 57, pp. 722–728, 1940.

[25] A. Rein, “Mécanismes et critères de la rupture diélectrique dans les gaz. Mesure des grandeurs caractéristiques de la décharge. Etude bibliographique,” *Electra CIGRE*, no. 32, pp. 43 – 60, Jan. 1974.

[26] A. Beroual, “Matériaux du Génie Electrique et applications: Cour Master de recharche Génie Electrique.” 2005.

[27] L.B. LOEB and J.M. MEEK, “The mechanism of Spark Discharge in Air at Atmospheric Pressure I,” *Journal of Applied Physics*, vol. 11, pp. 438–447, 1940.

[28] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases*, Butterwords. London, 1964.

[29] A. Pedersen, “Criteria of spark breakdown in sulphur hexafluoride,” *IEEE Trans. on Power Appar. Syst*, pp. 2043–2048, 1970.

[30] 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.

[31] O. Farish, “Corona-controlled breakdown in SF6 and SF6 mixtures,” *Phenomena in Ionized Gases, XVI International Conference, Invited Papers*, Düsseldorf, Fed. Rep. of Germany, p. 187, Sep-1983.

[32] R. Hawley, “Solid insulators in vacuum: A review (invited paper),” *Vacuum*, vol. 18, no. 7, pp. 383 – 390, 1968.

[33] 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.

[34] N. H. Malik and A. H. Qureshi, “Calculation of discharge inception voltages in SF6-N2 mixtures,”, vol. , no. , pp. ,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-14, no. 2, pp. 70–76, 1979.

[35] A. H. Cookson, “Gas-insulated cables,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-20, no. 5, pp. 859–890, 1985.

[36] C. M. Cooke 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.

[37] 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.

[38] B. Mazurek 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.

[39] 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.

[40] M.O. DALE, J. L. ADCOK, L. C. FREES, and L. G. CHRISTOPHOROU, “Feasability studies for improving gas insulation by coating contaminating particules.,” in *Gaseous Dielectrics III*, Pergamon Press,., New York: L. G. CHRISTOPHOROU, 1982, pp. 307–314.

[41] I. Levin, T. Naegler, R. Heinz, D. Osusko, E. Cuevas, A. Engel, J. Ilmberger, R. L. Langenfelds, B. Neininger, C. v. Rohden, L. P. Steele, R. Weller, D. E. Worthy, and S. A. Zimov, “The global SF6 source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories,” *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 10, no. 6, pp. 2655–2662, Mar. 2010.

[42] Denki-Kyodo-Kenkyu (Electric Cooperative Research), “Electric Technology Research Association, SF6 Recycling Guide: Standards for Handling SF6 Gas in the Power Industry, , (in Japanese).,” vol. 5, no. 3, 1998.

[43] CEI61634, “Utilisation et manipulation de gaz hexafluorure de soufre (SF6) dans l’appareillage à haute tension.” 1995.

[44] CIGRE WG 23-10, “SF6 Recycling Guide,” *ELECTRA*, vol. 173, pp. 43–69, 1997.

[45] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori, and F. Endo, “Development of SF6-Free 72.5 kV GIS,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1869–1876, 2007.

[46] L. Ming, M. Leijon, and T. Bengtsson, “Barrier effects in air gaps under DC voltage.,” *7th International Symposium on Gaseous dielectrics Knoxville*, USA, 1994.

[47] M. Homma, M. Sakaki, E. Kaneko, and S. Yanabu, “History of vacuum circuit breakers and recent developments in Japan,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 1, pp. 85–92, 2006.

[48] Y. Qiu and E. Kuffel, “Development of the SF6/N2 Gas Mixture Insulated Transformer in China,” in *Gaseous Dielectrics VIII*, L. G. Christophorou and J. K. Olthoff, Eds. Boston, MA: Springer US, 1998, pp. 519–527.

[49] Y. Qiu and E. Kuffel, “Comparison of SF6/N2 and SF6/CO 2 gas mixtures as alternatives to SF6 gas,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 6, pp. 892–895, 1999.

[50] X. Q. Qiu, I. D. Chalmers, and P. Coventry, “A study of alternative insulating gases to SF6,” *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 32, no. 22, p. 2918, Nov. 1999.

[51] N. H. Malik and A. H. Qureshi, “Breakdown Gradient in SF6-N2, SF6-Air, SF6-CO2 Mixtures,” *IEEE Trans. Dielec. Electric. Insul*, vol. EI-15, no. 5, 1980.

[52] N. H. Malik, A. H. Qureshi, and Y. A. Safar, “Dc Voltage Breakdown of SF6-Air and SF6-CO2 Mixtures in Rod-Plane Gaps,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-18, no. 6, pp. 629–636, 1983.

[53] Z. Li, R. Kuffel, and E. Kuffel, “Volt-Time Characteristics in Air, SF6/AIR Mixture and N2 for Coaxial Cylinder and Rod-sphere Gaps,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-21, no. 2, pp. 151–155, 1986.

[54] “The Montreal protocol on substances that deplete the ozone layer.” UNEP, 2000.

[55] L. G. Christophorou, J. K. Olthoff, and D. S. Green, “Gases for electrical insulation and arc interruption: Possible present and future alternatives to pure SF6.” NIST Technical note 1425, 1997.

[56] “Partial discharge measurements,” *IEC 270*, 1981.

[57] F. H. KREUGER, *Industrial high voltag*, Delf University press., vol. 1. 1991.

[58] M. Aguet and M. Lanoz, *Traité d’électricité, haute tension*, vol. XXII. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2001.

[59] Minh Tuan DO, “Propriétés diélectriques des gels isolants : application aux composants d’électronique de puissance,” Joseph Fourier, Grenoble, France, 2008.

[60] K. Dieter, *An Introduction to High Voltage Experimental Technique*. Vieweg, 1978.

[61] F. H. KREUGER, *Industrial high voltage*, vol. 2. Delf University press, 1992.

[62] R. Bartnikas, *Engineering Dielectrics, Vol. I, Corona Measurement and interpretation*. ASTM, 1979.

[63] R. Bartnikas, ", A commentary on partial discharge measurement and detection," *IEEE Transaction on Electrical insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 629–653.

[64] D. A. Nattrass, "Partial discharge Measurement and interpretation," *IEEE Electrical insulation magazine*, vol. 4, no. 3, pp. 10–23, 1988.

[65] A. E. W. Austen and S. Whitehead, "Discharges in insulation under alternating current stresses," *The Journal of the Institution of Electrical Engineers - Part III: Communication Engineering, including the Proceedings of the Wireless Section of the Institution*, vol. 88, pp. 18–22, 1941.

[66] R. Bartnikas, "Effect of pulse rise time on the response of corona detectors," *IEEE Transaction on Electrical insulation*, vol. 7, no. 1, pp. 3–8, 1972.

[67] T. Lebey, "Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques," *J3eA, journal sur l'enseignement des sciences et technologies et l'information et des systèmes*, vol. 4, 2005.

[68] M. Akyuz, L. Gao, V. Cooray, T. G. Gustavsson, S. M. Gubanski, and A. Larsson, "Positive streamer discharges along insulating surfaces," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 8, no. 6, pp. 902–910, 2001.

[69] I. Gallimbertti, I. Marchesi, and L. Niemeyer, "Streamer corona at an insulating surface," *Proc. of 7th Int. Symp. on High Voltage Engineering*, Dresden, Germany, pp. 1–4, 1991.

[70] H. F. A. Verhaart and A. J. L. Verhage, "Insulator flashover in SF6 gas," *Kema Scientific and Technologic Reports*, vol. 6, no. 9, pp. 179–228, 1988.

[71] X. Jun and I. D. Chalmers, "The influence of surface charge upon flash-over of particle-contaminated insulators in under impulse-voltage conditions," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 30, no. 7, p. 1055, Apr. 1997.

[72] C. Laurent, "Diélectriques solides et charges d'espace," *Techniques de l'Ingénieur, Traité d'électricité D2305*, vol. D2II, pp. 1–13, 1999.

[73] R. A. Fouracre, E. Santos, I. Timoshkin, M. J. Given, and S. J. MacGregor, “Surface Discharge Propagation: The Influence Of Surface Charge,” in *Power Modulator Symposium, 2006. Conference Record of the 2006 Twenty-Seventh International*, 2006, pp. 39–42.

[74] R. A. Fouracre, F. A. Twema, S. J. MacGregor, and M. J. Given, “The influence of charge on surface flashover,” in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (Conf. Publ. No. 467)*, 1999, vol. 3, pp. 329–332 vol.3.

[75] T. Jing and P. H. F. Morshuis, “Evaluation of field-steering techniques in GIS with respect to surface charge accumulations,” in , *Proceedings of the 4th International Conference on Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1992*, 1992, pp. 102–106.

[76] T. Jing, P. H. F. Morshuis, and F. H. Kreuger, “The role of spacer surface conditions in the scatter of charge accumulations in SF6,” in , *Proceedings of the 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1994*, 1994, vol. 1, pp. 274–277 vol.1.

[77] T. S. Sudarshan and R. A. Dougal, “Mechanisms of Surface Flashover Along Solid Dielectrics in Compressed Gases: a Review,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-21, no. 5, pp. 727–746, 1986.

[78] H. C. Miller, “Surface flashover of insulators,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 5, pp. 765–786, 1989.

[79] N. L. Allen and D. C. Faircloth, “Corona propagation and charge deposition on a PTFE surface,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 10, no. 2, pp. 295–304, 2003.

[80] N. L. Allen and P. N. Mikropoulos, “Streamer propagation along insulating surfaces,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 6, no. 3, pp. 357–362, 1999.

[81] B. B. Mandelbrot, *Fractals: Form, Chance, and Dimension*, W. H. Freeman and Company. San Francisco, 1977.

[82] Y. Sawada, S. Ohta, M. Yamazaki, and H. Honjo, “Self-similarity and a phase-transition-like behavior of a random growing structure governed by a nonequilibrium parameter,” *Phys. Rev. A*, vol. 26, no. 6, pp. 3557–3563, décembre 1982.

[83] L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, “Fractal Dimension of Dielectric Breakdown,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 52, no. 12, pp. 1033–1036, Mar. 1984.

[84] H. J. Wiesmann and H. R. Zeller, “A fractal model of dielectric breakdown and prebreakdown in solid dielectrics,” *Journal of Applied Physics*, vol. 60, no. 5, pp. 1770–1773, Sep. 1986.

[85] L. Niemeyer, L. Pietronero, and H. J. Wiesmann, *Scaling properties of growing zone and capacity of Laplacian fractal.* Amsterdam: Elsevier, 1986.

[86] K. Kudo, “Fractal analysis of electrical trees,” *IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical insulation*, vol. 5, pp. 713–727, 1998.

[87] T. Hara, O. Yamamoto, and M. Kaji, “Fractal characteristics of the random patterns of the surface streamer corona,” *10th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications*, Swansea, UK, 1992.

[88] S. Fujimori, “Electric Discharge and Fractals,” *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 24, no. Part 1, No. 9, pp. 1198–1203, 1985.

[89] T. A. Witten and L. M. Sander, “Diffusion-Limited Aggregation, a Kinetic Critical Phenomenon,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 47, no. 19, pp. 1400–1403, Nov. 1981.

[90] L. Kebbabi and A. Beroual, “Fractal analysis of creeping discharge patterns propagating at solid/liquid interfaces-influence of the nature and geometry of solid insulators,” in *2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005. CEIDP ’05*, 2005, pp. 132–135.

[91] CEI60060-1, “Techniques des essais en haute tension Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais.” .

[92] B. Hamon, “Mélange de gaz,” *Techniques de l’ingénieur, Traité de Génie Electrique,*, vol. A 5830, 1990.

[93] *Encyclopédie des gaz de L’Air Liquide*, Elsevier. L’air liquide Division ALPHAGAZ.

[94] R. Coelho and J. Debeau, “Properties of the tip-plane configuration,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, no. 4, pp. 1266–1280, 1991.

[95] D. Kind and H. Kräner, *Voltage Insulation Technology*, Text book for electric engineers,. 1985.

[96] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering: fundamentals*. 2000.

[97] M. L. Coulibaly, A. Beroual, O. Aitken, and A. Girodet, "Experimental characterization of creeping discharges over solid/gas and solid gaseous mixture interfaces under lightning impulse voltage," *XVI International Conference on Gas Discharges and Their applications*, Cardiff, Wales, UK, Sep-2008.

[98] L. Kebbabi and A. Beroual, "Influence of solid insulating thickness on the morphology of creeping discharges propagating over solid/liquid interfaces – Fractal analysis," *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 39, pp. 177–183, 2006.

[99] V. Dang and A. Beroual, "Investigations on creeping discharges propagating over pressboard immersed in mineral and vegetable oils submitted to impulse voltage," in *2011 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, 2011, pp. 411–414.

[100] V. H. Dang, A. Beroual, M. Coulibaly, and C. Perrier, "Investigation on creeping discharges propagating over pressboard immersed in mineral and vegetable oils submitted to AC and DC voltages," *Proc. of the International Conference on High Voltage Engineering and Application - ICHVE*, China, 2012.

[101] A. Beroual, M. l. Coulibaly, O. Aitken, and A. Girodet, "Investigation on creeping discharges propagating over epoxy resin and glass insulators in the presence of different gases and mixtures," *The European Physical Journal - Applied Physics*, vol. 56, no. 03, 2011.

[102] A. Beroual, M.-L. Coulibaly, O. Aitken, and A. Girodet, "Effect of micro-fillers in polytetrafluoroethylene insulators on the characteristics of surface discharges in presence of SF6 CO2 and SF6-CO mixture," *IET Generation, Transmission Distribution*, vol. 6, no. 10, pp. 951–957, 2012.

dernière page de la thèse

AUTORISATION DE SOUTENANCE

Vu les dispositions de l'arrêté du 7 août 2006,

Vu la demande du Directeur de Thèse

Monsieur A. BEROUAL

et les rapports de

Monsieur S. AGNEL
Professeur - Laboratoire Institut d'Electronique du Sud (IES) - GEM - Université de Montpellier - CC079
Place E. Bataillon - 34095 Montpellier cedex 05

Et de

Monsieur J. MARTINEZ
Professeur - Université Paul Sabatier (UPS) - Laplace - 118 route de Narbonne - 31062 Toulouse cedex 9

Monsieur SADAOUI Fares

est autorisé à soutenir une thèse pour l'obtention du grade de **DOCTEUR**

Ecole doctorale ELECTRONIQUE, ELECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE

Fait à Ecully, le 6 septembre 2013

P/Le directeur de l'E.C.L.
La directrice des Etudes

ECOLE CENTRALE DE LYON
Service des Scolarités
ECULLY

M-Aé GALLAND

Titre: Comparaison des caractéristiques électriques et optiques des décharges glissantes sur différents types d'isolateurs dans le CO_2, le SF_6 et le N_2 et leurs mélanges à différentes pressions

Résumé:

Le présent travail porte sur une étude comparative des caractéristiques optiques et électriques des décharges glissantes se propageant aux interfaces solide/gaz sur des isolateurs de verre, de Bakélite et de résine époxy en présence des gaz N_2, CO_2 et SF_6 et des mélanges SF_6/N_2 et SF_6/CO_2, sous tension continue et alternative (50 Hz), en géométrie pointe - plan. L'objectif est de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans l'initiation des décharges partielles et leur évolution et développement en décharges surfaciques (glissantes) lesquelles peuvent conduire au contournement des composants et systèmes haute tension. Les résultats obtenus montrent que la morphologie et la longueur finale (d'arrêt ou d'extension maximale) des décharges surfaciques dépendent de la forme et de l'amplitude de la tension, de l'épaisseur et de la nature du solide isolant, du type du gaz/mélange et de sa pression. Il est montré que la longueur finale des décharges L_f augmente quasi-linéairement avec la tension. L_f diminue lorsque la pression du gaz et/ou l'épaisseur du solide augmentent. Cette longueur est plus courte dans le SF_6 que dans le CO_2 ou le N_2 ; et elle diminue significativement lorsque le taux du SF_6 dans le mélange de gaz augmente. Par ailleurs, pour une tension donnée, L_f augmente avec la constante diélectrique de l'isolant solide. La longueur finale des décharges est nettement plus élevée sous tension alternative que sous tension continue. La morphologie des décharges glissantes générées sous tension continue et alternative est généralement non radiale; leur orientation est fortement influencée par la présence des charges d'espace présentes ou déposées sur la surface de l'isolateur. Une analyse fractale des décharges glissantes obtenues expérimentalement sous tension continue est également réalisée et une corrélation entre la dimension fractale, la pression du gaz, la constante diélectrique et l'épaisseur du matériau solide est mise en évidence. En particulier, la dimension fractale augmente lorsque la constante diélectrique augmente et/ou l'épaisseur de l'isolant solide diminue et/ou la pression du gaz diminue.

Mots clés:

Interface solide/gaz, décharges partielles, décharges glissantes, longueur d'arrêt, dimension fractale.

Title: Comparison of electrical and optical characteristics of creeping discharges propagating on different types of insulators in CO_2, SF_6 and N_2 and their mixtures at different pressures.

Abstract:

This work deals with a comparative study of optical and electrical characteristics of creeping discharges propagating at solid/gas interfaces on insulators made of glass, Bakelite and epoxy resin in the presence of N_2, CO_2 and SF_6 gases and SF_6/N_2 SF_6/CO_2 mixtures, under DC and AC (50 Hz) voltage, using a point - plane electrode arrangement. The objective is to better understand the mechanisms involved in the initiation of partial discharges and their evolution and development into discharges surface (creeping discharges) that can lead to flashover of components and high voltage systems. The results show that the morphology and final length (maximum extension or stopping length) depend on the shape and amplitude of the voltage, the thickness and the nature of the solid insulator, type of gas / mixture and its pressure. It is shown that the final length L_f increases quasi-linearly with the voltage. L_f decreases as the gas pressure increases and/ or the thickness of the solid increases. L_f is shorter in SF_6 than in CO_2 or N_2, and it decreases significantly when the rate of SF_6 in the gas mixture increases. Moreover, for a given voltage, L_f increases with the dielectric constant of the solid insulation. The final length of the discharge is much higher under AC voltage than under DC voltage. The morphology of creeping discharges generated under DC and AC voltage is generally not radial; and their orientation is strongly influenced by the presence of space charges present or deposited on the surface of the insulator. A fractal analysis of creeping discharges experimentally obtained under DC voltage is also carried out and a correlation between the fractal dimension, the pressure of the gas, the dielectric constant and the thickness of the solid material is highlighted. In particular, the fractal dimension increases when the dielectric constant increases and / or thickness of the solid insulator decreases and / or pressure of the gas decreases.

Keywords:

Solid/gas interface, partial discharges, creeping discharges, stopping length, fractal dimension.

Laboratoire Ampère (CNRS UMR5005),
http://www.ampere-lab.fr
Ecole Centrale de Lyon
36 avenue Guy de Collongue, 69134 Ecully CEDEX (France)

Direction de Recherche :
Professeur Abderrahmane BEROUAL
Abderrahmane.Beroual@ec-lyon.fr