



**HAL**  
open science

# Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension

M. Hairour

► **To cite this version:**

M. Hairour. Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension. Energie électrique. Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2007. Français. NNT: . tel-00327704

**HAL Id: tel-00327704**

**<https://theses.hal.science/tel-00327704>**

Submitted on 9 Oct 2008

**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.

ACADEMIE DE MONTPELLIER

# UNIVERSITE MONTPELLIER II

SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

## THESE

présentée à l'Université Montpellier II – Sciences et Techniques du Languedoc

pour obtenir le diplôme de DOCTORAT

Spécialité : Electronique, Optronique et Systèmes

Ecole Doctorale : Electronique : "Information, Structures et Systèmes"

### **Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension**

par

**Mounir HAIROUR**

Soutenue le 30 octobre 2007 devant le Jury composé de :

G. TOUCHARD	Professeur à l'Université de Poitiers	Rapporteur
A. BEROUAL	Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon	Rapporteur
J. MARTINEZ-VEGA	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse	Président
J-L. BESSEDE	Docteur AREVA T&D Villeurbanne	Examineur
M. HASSANZADEH	Docteur AREVA T&D Montpellier	Examineur
J. CASTELLON	Maître de Conférences à l'Université de Montpellier II	Examineur
S. AGNEL	Maître de Conférences à l'Université de Montpellier II	Examineur
A. TOUREILLE	Professeur émérite à l'Université de Montpellier II	Directeur de Thèse

---

A ma famille.

## REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été réalisés au Centre de Recherche sur l'Appareillage Haute Tension d'AREVA T&D à Villeurbanne et au Laboratoire d'Electrotechnique de Montpellier (LEM) devenu l'Institut d'Electronique du Sud (IES).

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, le Professeur Alain TOUREILLE pour son soutien et tout ce qu'il m'a apporté tant sur le plan scientifique que humain.

Je remercie également mon responsable chez AREVA T&D, Monsieur Jean-Luc BESSEDE chef du Laboratoire Technologies et Matériaux, de m'avoir accueilli eu sein de son groupe.

J'adresse mes remerciements au Professeur Juan MARTINEZ-VEGA pour avoir accepté la présidence du jury de soutenance de thèse.

Je remercie également les Professeurs Abderrahmane BEROUAL de l'Ecole Centrale de Lyon et Gérard TOUCHARD de l'Université de Poitiers d'avoir accepté la tâche de rapporteur.

Je remercie Messieurs Serge AGNEL et Jérôme CASTELLON, Maîtres de Conférences à l'Université de Montpellier II, pour leur suivi et leurs conseils avisés.

Je remercie également Monsieur Mehrdad HASSANZADEH, chef du groupe Matériaux et Eco-Conception chez AREVA T&D à Montpellier, pour sa disponibilité et sa sympathie.

Je remercie Monsieur Alain GIRODET, chef du groupe Appareillage Haute Tension et Parafoudres au centre de recherche d'AREVA T&D de Villeurbanne, d'avoir mis à ma disposition la maquette d'essais et pour ses discussions constructives, tout comme Monsieur Wolfgang GRIESHABER.

Je remercie tous mes collègues d'AREVA T&D de Villeurbanne ; en particulier Messieurs Pierre GIANNINI, Roland MONTAGNON, Gwenael MARQUEZIN, Paul VINSON, Jean-Pierre DUPRAZ, Alain FANGET, Philippe ROBIN-JOUAN et Youssef AOUNI pour leurs qualités humaines.

Enfin, je remercie tous les membres du GEM pour leur accueil et plus particulièrement Monsieur Petru NOTINGHER.

## RESUME

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche d'une alternative à l'utilisation du gaz hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) dans l'appareillage électrique Haute Tension et plus particulièrement les postes à isolation gazeuse. Ce gaz possède de bonnes propriétés diélectriques mais son potentiel de réchauffement global (GWP) est estimé à 23900 fois celui du dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ). Malheureusement, les gaz dits simples tels que l'azote ( $\text{N}_2$ ) présentent une tenue diélectrique deux à trois fois plus faible que celle du  $\text{SF}_6$ .

Dans le but d'améliorer la tenue diélectrique du système, on se propose d'appliquer sur les conducteurs un revêtement isolant à base de silicone constitué d'une sous-couche semi-conductrice d'épaisseur 0.5 mm et d'une couche isolante d'épaisseur 1.5 mm, afin de limiter ou supprimer le rôle des électrons du métal.

Les essais diélectriques réalisés sous une tension de choc de foudre dans des conditions expérimentales proches de la pratique industrielle montrent qu'en présence de  $\text{N}_2$  la tenue diélectrique du système avec revêtement est régie par le gaz. Par conséquent, l'application du revêtement sur les conducteurs diminue la tenue diélectrique du système (effet capacitif).

Ces essais montrent, cependant, qu'il est possible d'améliorer la tenue diélectrique du système avec le revêtement, en présence de  $\text{SF}_6$  en polarité négative. Les paramètres importants semblent être, la propreté du gaz, le degré d'ionisation du gaz et surtout les charges qui se déposent à l'interface gaz-revêtement, qui dans certaines conditions ont un effet bénéfique : ce dernier résultat donne une piste aux travaux futurs.

Mots clefs :

Isolation gazeuse, haute tension, tenue diélectrique,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{N}_2$ , revêtement isolant, interface isolant solide – gaz.

# TABLE DES MATIERES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>III</b>
<b>RESUME .....</b>	<b>IV</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>7</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>8</b>
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>9</b>
<b>CHAPITRE 1 ETAT DE L'ART ET CAHIER DES CHARGES.....</b>	<b>12</b>
1.1. ETAT DE L'ART .....	13
1.1.1. Les barrières diélectriques.....	13
1.1.2. Les revêtements diélectriques.....	14
1.1.3. Les brevets.....	17
1.2. CAHIER DES CHARGES.....	18
1.2.1. Les couches solides.....	18
1.2.1.1. Sous-couche semi-conductrice (MSC) .....	18
1.2.1.2. Couche isolante (BIP) .....	19
1.2.1.3. Contraintes à prendre en compte .....	20
1.2.2. La couche gazeuse.....	21
1.3. CONCLUSION .....	22
<b>CHAPITRE 2 ASPECTS THEORIQUES.....</b>	<b>23</b>
2.1. PHENOMENE D'INJECTIONS D'ELECTRONS .....	25
2.1.1.1. Le travail de sortie.....	25
2.1.1.2. Emission Schottky.....	26
2.1.1.3. Emission Fowler - Nordheim .....	26
2.2. POLARISATION DES DIELECTRIQUES SOLIDES.....	27
2.2.1. Polarisation de déformation.....	28
2.2.2. Polarisation dipolaire .....	28
2.2.3. Polarisation interfaciale .....	28
2.2.4. Polarisation par charge d'espace .....	28
2.3. CLAQUAGE DIELECTRIQUE DANS UN GAZ .....	29
2.3.1. L'avalanche électronique.....	29
2.3.2. Théorie de Townsend .....	30
2.3.2.1. Mécanismes de claquage .....	30
2.3.2.2. Critère de claquage.....	31
2.3.3. Théorie du canal (Streamer) .....	32
2.3.3.1. Mécanismes de claquage .....	32
2.3.3.2. Critère de claquage.....	34
2.3.4. Courbes de Paschen.....	35
2.3.5. Critère basé sur les courbes de Paschen.....	35
2.3.5.1. Exemple du N <sub>2</sub> .....	38
2.3.5.2. Exemple du SF <sub>6</sub> .....	39
2.3.6. Réflexions sur l'origine de la particule germe .....	39
2.3.6.1. Electrodes nues.....	39
2.3.6.2. Electrodes recouvertes.....	40
2.3.7. Configuration métal - isolant solide - gaz.....	41

2.3.7.1.	Hypothèse 1 .....	41
2.3.7.2.	Hypothèse 2 .....	42
2.3.7.3.	Hypothèse 3 .....	43
2.4.	CONCLUSION .....	44
<b>CHAPITRE 3</b>	<b>ASPECTS EXPERIMENTAUX.....</b>	<b>45</b>
3.1.	LA CELLULE DE TESTS.....	47
3.2.	LES ELECTRODES .....	48
3.3.	CHOIX DE LA TENSION D'ESSAIS .....	49
3.3.1.	<i>La tension de choc de foudre</i> .....	49
3.3.1.1.	Génération d'une tension de choc de foudre.....	50
3.3.1.2.	Le générateur de MARX .....	51
3.4.	STRATEGIE D'ESSAIS.....	52
3.4.1.	<i>Classification des procédures d'essais</i> .....	53
3.4.2.	<i>Analyses des résultats d'essais</i> .....	54
3.4.3.	<i>Stratégie d'essais choisie</i> .....	55
3.5.	MATERIAUX ET CONTROLE .....	56
3.5.1.	<i>Réalisation du revêtement</i> .....	56
3.5.2.	<i>Caractérisation électrique</i> .....	57
3.5.2.1.	Quelques définitions.....	57
3.5.2.2.	Les éprouvettes.....	59
3.5.2.3.	Caractérisation de la couche BIP.....	60
3.5.2.3.1.	Mesure de la rigidité diélectrique ( $E_{BD}$ ).....	60
3.5.2.3.2.	Mesure de la résistivité volumique ( $\rho$ ).....	62
3.5.2.3.3.	Mesure de la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) / facteur de perte $tg(\delta)$ .....	66
3.5.2.4.	Caractérisation de la sous-couche MSC .....	69
3.6.	ESSAIS PRELIMINAIRES .....	71
3.6.1.	<i>Résultats des essais</i> .....	72
3.6.2.	<i>Conclusion des essais préliminaires</i> .....	75
3.7.	MESURE DE L'HUMIDITE DANS LA CELLULE DE TESTS .....	75
3.8.	CONCLUSION .....	79
<b>CHAPITRE 4</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS.....</b>	<b>80</b>
4.1.	ESSAIS ELECTRODES NUES .....	82
4.1.1.	<i>Conditions expérimentales</i> .....	82
4.1.2.	<i>Résultats</i> .....	83
4.1.2.1.	Validation des critères de claquage .....	84
4.1.2.1.1.	Cas du $N_2$ .....	84
4.1.2.1.2.	Cas du $SF_6$ .....	85
4.1.2.2.	Influence de la polarité de la tension .....	85
4.1.2.2.1.	Cas du $N_2$ .....	85
4.1.2.2.2.	Cas du $SF_6$ .....	88
4.1.2.3.	Influence de la distance inter-électrodes.....	89
4.1.2.3.1.	Cas du $N_2$ .....	89
4.1.2.3.2.	Cas du $SF_6$ .....	90
4.2.	ESSAIS AVEC REVETEMENT .....	93
4.2.1.	<i>Résultats</i> .....	94
4.2.1.1.	Cas du $N_2$ .....	96
4.2.1.2.	Cas du $SF_6$ .....	102
4.3.	CONCLUSION .....	106
<b>CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES.....</b>	<b>110</b>	
<b>NOTE SUR LA FORMULATION D'UNE COUCHE DE RESISTIVITE NON LINEAIRE EN FONCTION DU CHAMP ELECTRIQUE APPLIQUE .....</b>	<b>112</b>	
A.	RAPPEL SUR LES VARISTANCES A BASE DE ZNO .....	113
(a)	<i>Préparation</i> .....	113
(b)	<i>Microstructure d'une varistance frittée</i> .....	114
(c)	<i>Propriétés électriques</i> .....	115
B.	INFLUENCE DU RAPPORT DE MELANGE .....	117
(a)	<i>Eprouvettes</i> .....	117
(b)	<i>Montage et mode opératoire</i> .....	118
(c)	<i>Résultats</i> .....	119

<b>ANNEXES .....</b>	<b>121</b>
<b>REFERENCES.....</b>	<b>126</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 1 :	Cheminement de l'énergie électrique.....	9
Figure 2 :	Exemple de poste conventionnel.....	10
Figure 3 :	Exemple de poste blindé.....	10
Figure 4 :	Principe de l'isolation hybride.....	18
Figure 5 :	Travail de sortie $\phi$ d'un métal.....	25
Figure 6 :	Accélération de l'électron.....	30
Figure 7 :	Ionisation par collision.....	30
Figure 8 :	Avalanche électronique.....	30
Figure 9 :	Distribution capacitive du champ électrique dans le système (à faible champ).....	41
Figure 10 :	Distribution du champ électrique dans le système avec un gaz ionisé (champ intense).....	42
Figure 11 :	Distribution du champ électrique dans le système avec injection de charges.....	43
Figure 12 :	Dessin de la cellule de tests.....	47
Figure 13 :	Plateau mis à la masse.....	48
Figure 14 :	Plateau mis sous tension.....	48
Figure 15 :	Répartition des equipotentiels avec le logiciel Flux 2D.....	48
Figure 16 :	Forme finale des électrodes.....	49
Figure 17 :	Forme normalisée de la tension de choc de foudre.....	49
Figure 18 :	Génération capacitive de la tension de choc de foudre.....	50
Figure 19 :	Schéma d'un générateur de Marx à 3 étages.....	51
Figure 20 :	Procédure d'essais.....	55
Figure 21 :	Croquis du moule utilisé pour la réalisation du revêtement.....	56
Figure 22 :	Réalisation du revêtement.....	57
Figure 23 :	Exemple d'éprouvette MSC.....	59
Figure 24 :	Mesure de la rigidité diélectrique de la couche BIP.....	60
Figure 25 :	Méthode des paliers de tension pour la mesure de la rigidité diélectrique.....	61
Figure 26 :	Principe de mesure de la résistivité volumique de la couche BIP.....	62
Figure 27 :	Mode opératoire pour la mesure de résistivité volumique.....	63
Figure 28 :	Résistivité volumique de la couche isolante BIP en fonction du champ électrique.....	65
Figure 29 :	Permittivité relative de la couche isolante BIP en fonction de la fréquence.....	67
Figure 30 :	Facteur de perte de la couche isolante BIP en fonction de la fréquence.....	67
Figure 31 :	Résistivité volumique de la sous-couche MSC en fonction du gradient électrique appliqué.....	70
Figure 32 :	Configurations testées lors des essais préliminaires.....	71
Figure 33 :	Résultats des essais préliminaires pour le N <sub>2</sub> en polarité positive.....	73
Figure 34 :	Résultats des essais préliminaires pour le N <sub>2</sub> en polarité négative.....	73
Figure 35 :	Résultats des essais préliminaires pour le SF <sub>6</sub> en polarité positive.....	74
Figure 36 :	Résultats des essais préliminaires pour le SF <sub>6</sub> en polarité négative.....	74
Figure 37 :	Schéma de principe d'un Hygromètre à condensation.....	77
Figure 38 :	Montage pour la mesure de l'humidité dans le cellule de tests.....	78
Figure 39 :	Tenue diélectrique du système sans revêtement isolé au N <sub>2</sub> .....	86
Figure 40 :	Distribution du champ électrique dans le système électrodes nues.....	87
Figure 41 :	Tenue diélectrique du système sans revêtement isolé au SF <sub>6</sub> .....	88



Figure 42 :	Champ électrique de claquage moyen du N <sub>2</sub> en polarité positive. ....	89
Figure 43 :	Champ électrique de claquage moyen du N <sub>2</sub> en polarité négative. ....	90
Figure 44 :	Champ électrique de claquage moyen du SF <sub>6</sub> en polarité positive. ....	91
Figure 45 :	Champ électrique de claquage moyen du SF <sub>6</sub> en polarité négative. ....	91
Figure 46 :	Photographie d'un claquage électrique dans la configuration électrodes nues. ....	92
Figure 47 :	Photographie d'une électrode revêtue. ....	93
Figure 48 :	Exemple de courbe de tendance dans la configuration sans revêtement. ....	95
Figure 49 :	Champ électrique de claquage moyen du système pour le N <sub>2</sub> dans le cas avec revêtement. ....	97
Figure 50 :	Champ électrique de claquage dans le gaz pour le N <sub>2</sub> dans le cas avec revêtement. ....	98
Figure 51 :	Photographie du phénomène de cheminement en surface du revêtement. ....	99
Figure 52 :	Exemple d'impact de claquage sur le plateau côté masse. ....	100
Figure 53 :	Analyse d'une électrode revêtue après claquage au microscope binoculaire. ....	100
Figure 54 :	Vue en coupe d'une micro pointe dans le revêtement. ....	101
Figure 55 :	Champ électrique de claquage moyen du système pour le SF <sub>6</sub> dans le cas avec revêtement. ....	103
Figure 56 :	Champ électrique de claquage moyen dans le gaz pour le SF <sub>6</sub> dans le cas avec revêtement. ....	104
Figure 57 :	Perforation du revêtement dans le cas du SF <sub>6</sub> . ....	105
Figure 58 :	Exemple de revêtement et gaz mis en parallèle. ....	112
Figure 59 :	Exemple de structure d'une varistance à base de ZnO. ....	113
Figure 60 :	Microstructure schématisée d'une varistance à base de ZnO. ....	114
Figure 61 :	Caractéristique J(V) des varistances à ZnO. ....	115
Figure 62 :	Feuille de silicone chargée de poudre à base de ZnO. ....	117
Figure 63 :	Mesure de la résistivité volumique de la couche MNL. ....	118
Figure 64 :	Exemple de mesure du seuil de non linéarité. ....	119
Figure 65 :	Seuil de non linéarité en fonction du taux de charge. ....	120
Figure 66 :	Courbe de Paschen pour le N <sub>2</sub> . ....	121
Figure 67 :	Courbe de Paschen pour le SF <sub>6</sub> . ....	122
Figure 68 :	Maquette d'essais en station diélectrique HT. ....	123
Figure 69 :	Forme de la tension de choc appliquée dans la pratique. ....	124
Figure 70 :	Générateur de MARX. ....	125

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2 :	Energie d'ionisation du N <sub>2</sub> et du SF <sub>6</sub> . ....	36
Tableau 3 :	Détermination de la rigidité diélectrique de la couche BIP. ....	61
Tableau 4 :	Détermination de la résistivité volumique de la couche BIP. ....	64
Tableau 5 :	Détermination de la permittivité relative et du facteur de perte de la couche BIP. ....	66
Tableau 6 :	Détermination de la résistivité volumique de la sous-couche MSC. ....	69
Tableau 7 :	Résultats des essais préliminaires. ....	72
Tableau 8 :	Résultats des essais diélectriques électrodes nues. ....	83
Tableau 9 :	Résultats des essais diélectriques avec revêtement. ....	94
Tableau 10 :	Champ électrique de claquage moyen pour $d=11.5\text{mm}$ électrodes nues. ....	95
Tableau 11 :	Récapitulatif des résultats obtenus avec le N <sub>2</sub> dans le cas avec revêtement. ....	96
Tableau 12 :	Récapitulatif des résultats obtenus avec le SF <sub>6</sub> dans le cas avec revêtement. ....	102
Tableau 13 :	Résultats des essais de caractérisation de la couche MNL. ....	119

## INTRODUCTION

Les sources de production d'énergie électrique sont généralement éloignées des centres industriels et des villes. Cette énergie est acheminée par des liaisons électriques (lignes aériennes, câbles, ...) qui remplissent la fonction de transport. Ces liaisons sont raccordées entre elles pour mettre en commun toutes les sources de production et former ainsi un réseau. Aux points de raccordement de ces liaisons, se trouvent les postes dans lesquels on installe des transformateurs de puissance pour élever ou abaisser la tension de transport, des disjoncteurs pour pouvoir isoler une maille lors d'un défaut ou pour la maintenance, ... etc.

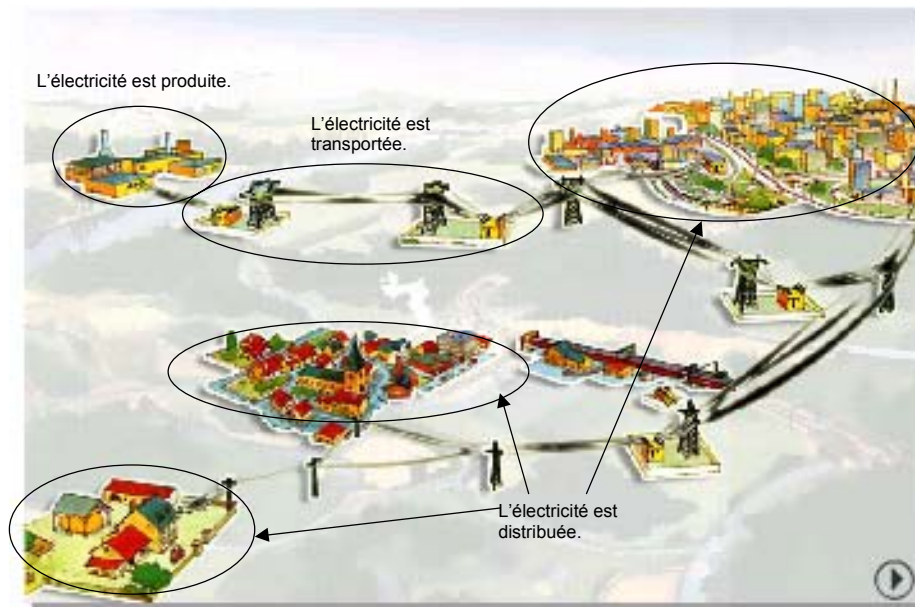


Figure 1 : Cheminement de l'énergie électrique.

Dans les postes dits conventionnels, l'isolation des phases (conducteurs mis sous tension) entre elles et par rapport à la terre est assurée par l'air ambiant. En haute et très haute tension, les distances d'isolement "phases – phases" et "phases – terre" deviennent très grandes et engendrent des superficies de postes très importantes. Dans les endroits où le gain d'espace devient le facteur prédominant, on a recours aux postes dits blindés. Dans ce type de postes, l'isolation est assurée en enfermant les phases dans des enveloppes métalliques remplies de gaz sous pression et mises à la terre. Le rapport de la surface au sol occupée par un poste conventionnel à celle d'un poste blindé assurant les mêmes fonctions est d'environ 5 à 10 pour la partie appareillage seule [1].

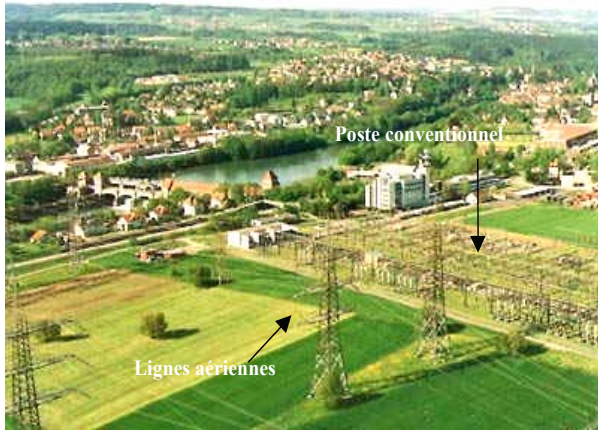


Figure 2 : Exemple de poste conventionnel.

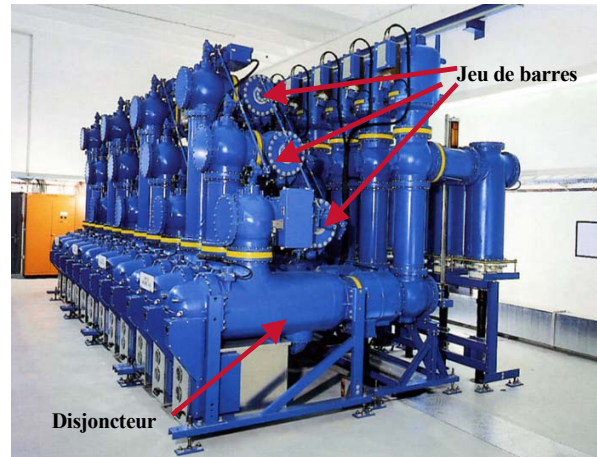


Figure 3 : Exemple de poste blindé.

Le gaz majoritairement utilisé dans ce type de poste est l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ). Ce gaz présente une rigidité diélectrique relativement haute, une bonne conductivité thermique et des pertes peu élevées. Il est chimiquement inerte et non toxique et après avoir été dissocié par un arc électrique, il se recombine rapidement et presque totalement. Il est aussi non inflammable et son prix est modéré.

Les propriétés indésirables de la technologie utilisant du  $\text{SF}_6$  sont une production limitée de substances très toxiques et corrosives provenant de la décomposition du gaz lorsqu'il est exposé à des décharges et une sensibilité non négligeable de la tension de claquage aux impuretés. Mais son inconvénient majeur est sa contribution à l'effet de serre lorsqu'il est relâché dans l'atmosphère. Du fait de son inertie chimique, ce gaz est un bon absorbant de radiation infrarouge, ce qui le place parmi les gaz à effet de serre les plus forts connus de nos jours. Son potentiel de réchauffement global ou GWP (Global Warming Potential) est estimé à 23900 fois celui du dioxyde de carbone [2] et sa durée de vie dans l'atmosphère est d'environ 3200 ans.

Le  $\text{SF}_6$  est donc listé par l'Organisation météorologique mondiale et le programme environnemental des Nations Unies (protocole de Kyoto) parmi les gaz dont les émissions doivent être limitées [3]. Les systèmes de transport et de distribution de l'énergie électrique contenant du  $\text{SF}_6$  seront dorénavant étroitement contrôlés. Ceci conduit les industriels à chercher des alternatives au  $\text{SF}_6$ .

Les gaz dits simples comme l'air ou l'azote susceptibles de remplacer le  $\text{SF}_6$  d'un point de vue impact sur l'environnement présentent malheureusement une tenue diélectrique beaucoup plus faible que celle du  $\text{SF}_6$  (tableau 1).

GAZ	RIGIDITE DIELECTRIQUE RAPPORTEE A CELLE DU SF <sub>6</sub>	IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT (GWP)	CONDUCTIVITE THERMIQUE (10 <sup>3</sup> W/m.K) A PRESSION ATMOSPHERIQUE
CF <sub>3</sub> SF <sub>5</sub>	1.51	>SF <sub>6</sub>	.....
1,3-C <sub>4</sub> F <sub>6</sub>	1.5	.....	.....
C <sub>4</sub> F <sub>10</sub>	1.36	7000	.....
c-C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	1.25	8700	.....
SF <sub>6</sub>	1	23900	140.68
C <sub>3</sub> F <sub>8</sub>	0.96	7000	16
CF <sub>3</sub> OCF <sub>3</sub>	0.84	.....	.....
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	0.78	9200	16.96
CO	0.4	.....	23.027
CF <sub>4</sub>	0.37	6500	69.16 (liquide)
CO <sub>2</sub>	0.3	1	14.101
N <sub>2</sub> O	0.44	310	14.67
N <sub>2</sub>	0.36	.....	23.53
Air	0.3	.....	23.547
H <sub>2</sub>	0.18	.....	169.565
Ar	0.07	.....	16.27

Tableau 1 : Principaux gaz isolants utilisés en électrotechnique.

Par conséquent, l'utilisation de ces gaz est conditionnée par une augmentation soit de la pression de service, soit de la distance d'isolement. Les deux solutions conduisent au même résultat : l'augmentation de la taille des postes blindés qui est leur principal avantage.

Afin de palier cet inconvénient, le présent travail vise à agir sur l'origine du claquage électrique du gaz pour augmenter la tenue diélectrique du système. Le gaz étant un bon isolant, on suppose que le claquage électrique d'un système à isolation gazeuse est régi par les conducteurs qui injectent des électrons dans ce gaz. L'idée est donc d'appliquer un revêtement isolant sur les conducteurs pour freiner voire empêcher cette injection.

Dans la suite de ce mémoire, le chapitre 1 est dédié à l'état de l'art et au cahier des charges de ce type d'isolation. Les aspects théoriques et expérimentaux sont traités respectivement dans les chapitres 2 et 3. Enfin, les résultats des essais diélectriques et les discussions sont donnés dans le chapitre 4.

# **CHAPITRE 1**

## **ETAT DE L'ART ET CAHIER DES CHARGES**

Dans ce chapitre nous allons dans un premier temps nous efforcer de mettre en évidence les différents travaux relatifs au concept de l'isolation hybride. Nous décrirons en suite le cahier des charges de ce type d'isolation.

## **1.1. Etat de l'art**

D'une façon générale, vu le côté innovant, on trouve peu de publications, sur le sujet. Dans la littérature, l'utilisation d'une ou plusieurs couches isolantes entre deux conducteurs isolés par gaz est divisée en deux catégories : les barrières diélectriques et les revêtements diélectriques. Dans le cas des barrières diélectriques, contrairement aux revêtements diélectriques, les couches isolantes ne sont jamais en contact avec les conducteurs.

### **1.1.1. Les barrières diélectriques**

Dans [4], pour des essais en géométrie "pointe-plan" dans l'air atmosphérique sous tension continue, on donne une augmentation de la tension de claquage de 180 % avec une barrière diélectrique plate de rayon 105 mm. La tension de claquage est une fonction linéaire de la largeur de la barrière. L'augmentation de la tenue diélectrique est expliquée par une homogénéisation du champ électrique due à la barrière diélectrique.

Dans [5-9], l'augmentation de la tenue diélectrique est expliquée par la redistribution et l'homogénéisation de la distribution du champ électrique et par le fait que la barrière "allonge" le chemin de la décharge, ce qui retarde le développement de la décharge disruptive.

De manière générale, l'augmentation de la tenue diélectrique due à une barrière diélectrique dépend de :

- La géométrie à la fois des barrières et des électrodes ;
- La position de la barrière dans l'espace inter-électrodes ;
- La charge de surface initiale ;
- La polarité de la tension (si la distribution du champ électrique est non homogène).

### 1.1.2. Les revêtements diélectriques

Dans [10], l'influence du revêtement d'électrodes par un film ou un verni isolant sur la tenue diélectrique d'un système isolé par gaz sous pression a été investiguée sous tension de choc de foudre. Les auteurs partent du constat suivant : dans la pratique, pour des pressions supérieures à environ 10 bars, les valeurs de tenue diélectrique sont plus faibles que celles calculées à partir de la loi de Paschen. Ils supposent que ce phénomène est lié à l'émission par effet de champ aux électrodes qui devient plus importante lorsque le champ électrique est supérieur à 10 kV/mm. Pour vérifier cette hypothèse, les auteurs ont réalisé des tests diélectriques en géométrie coaxiale avec du SF<sub>6</sub> sous 1.5 MPa et du N<sub>2</sub> sous 3.5 MPa. Les champs électriques atteints lors du claquage sont 95 kV/mm et 74 kV/mm dans respectivement le SF<sub>6</sub> et le N<sub>2</sub>. Le coefficient d'utilisation du champ électrique  $\xi$  - rapport entre le champ électrique moyen et le champ électrique maximum dans l'intervalle inter-électrodes - est de 0.58. Les revêtements utilisés sont un film polyoléfine de 0.5 mm d'épaisseur et un verni polychlorure de vinyle (PVC) de 0.03 mm d'épaisseur. Les meilleurs résultats obtenus sont en polarité négative lorsque le cylindre intérieur est revêtu par le film polyoléfine et le cylindre extérieur par le verni PVC. Aucune explication n'a été donnée sur l'influence de la polarité. L'amélioration de la tenue diélectrique reportée est de plus de 32 % dans le cas du SF<sub>6</sub> et de plus de 27 % dans le cas du N<sub>2</sub> par rapport à la configuration sans revêtement.

Dans [11], là aussi, les auteurs s'intéressent à l'écart de la tenue diélectrique par rapport à la loi de Paschen sous fort champ électrique. Cet écart est attribué à deux phénomènes, l'émission d'électrons par la cathode et le renforcement de l'ionisation du gaz aux irrégularités à la surface des électrodes. Les tests diélectriques sont réalisés en géométrie coaxiale avec un coefficient  $\xi$  de 0.47. Les gaz testés sont le SF<sub>6</sub>, l'air sec et le N<sub>2</sub> sous une pression de 0.2 MPa. Le revêtement utilisé est un verni de polyéthylène de 0.1 mm d'épaisseur. Les tensions appliquées sont la tension de choc de foudre et la tension de choc de manœuvre. Lorsque le revêtement est appliqué sur la surface du cylindre intérieur, la tenue diélectrique est augmentée de 7.2 % et 8.5 % pour respectivement le SF<sub>6</sub> et l'air sec sous tension de choc de foudre et de 48.3 % dans le cas du N<sub>2</sub> sous tension de choc de manœuvre.

Dans [12], les tests diélectriques sont réalisés en géométrie "sphère-plan" avec une distance inter-électrodes de 10 mm et un coefficient  $\xi$  de 0.83. Le gaz utilisé est le SF<sub>6</sub> sous une pression de 0.4 MPa. La tension appliquée est une tension de choc de foudre et le champ

électrique atteint lors du claquage est de 30 kV/mm. Pour évaluer l'influence de la nature du revêtement, quatre matériaux sont testés : la résine époxyde, l'éthylène propylène fluoré (FEP), le polyéthylène téréphtalate (PET) et l'alumine ( $Al_2O_3$ ). Les revêtements d'épaisseur 25  $\mu m$  sont appliqués sur la sphère. Une augmentation de la tenue diélectrique de plus de 20 % est reportée. Aucun effet de la polarité de la tension ni de la nature du revêtement n'a été observé.

Dans [13], le système testé est une maquette coaxiale avec un coefficient  $\xi$  de 0.63. Le gaz utilisé est du  $SF_6$  sous une pression de 0.3, 0.5 et 0.7 MPa entraînant un champ électrique de claquage respectivement de 10, 15 et 23 kV/mm. La tension appliquée est une tension alternative 50 Hz. Le cylindre intérieur est recouvert d'un film en résine époxyde de 0.2 mm d'épaisseur. L'application du revêtement s'est traduite par une augmentation de la tenue diélectrique de 17, 29 et 14 % respectivement pour 0.3, 0.5 et 0.7 MPa.

Dans [14], les auteurs se sont intéressés à l'influence de la rugosité des conducteurs, ainsi que de l'application de revêtement sur la tenue diélectrique d'un système "sphère-plan" à géométrie uniforme isolé par du  $SF_6$  ou du  $N_2$  sous tension continue. La rugosité de la sphère est de 5 puis 35 puis 75  $\mu m$ . Les revêtements appliqués sur la sphère sont de la résine époxyde, du polyuréthane, du plastique et du graphite. La pression et la distance inter-électrodes ont été variées de 0.1 à 0.5 MPa et de 3 à 15 mm.

Les résultats rapportés sont :

- Une diminution de la tension de claquage lorsque la rugosité de la sphère augmente. Ce phénomène est fonction du gaz, de la pression et de la géométrie.
- Pour des sphères ayant une rugosité de 4  $\mu m$ , les revêtements n'ont aucun effet sur la tension de claquage.
- Pour des sphères ayant une rugosité de 75  $\mu m$ , l'application du revêtement graphite n'a pas eu d'effet sur la tension de claquage. Les revêtements en polyuréthane et en résine époxyde augmentent la tension de claquage de 30 % et 15 % dans respectivement le cas du  $SF_6$  et du  $N_2$  pour une distance inter-électrodes de 5 mm et une pression de 0.3 MPa.
- Pour les électrodes revêtues, le nombre de claquages successifs n'a pas d'influence sur la tension de claquage seulement si ce nombre n'est pas trop élevé.



Dans [15], le système testé est une virole d'un poste à isolation gazeuse. La tension appliquée est une tension de choc de foudre. Le gaz testé est du SF<sub>6</sub> sous une pression de 0.35 MPa. Le revêtement utilisé est un film de résine époxyde de 0.5-1 mm d'épaisseur. La partie revêtue est une pièce appelée "pare effluve" où le champ électrique est le plus fort. Cette pièce a pour fonction d'améliorer la distribution du champ électrique aux connexions entre la barre haute tension et ses supports isolateurs. Le champ électrique atteint lors du claquage est de 31 kV/mm. Le résultat obtenu est une augmentation de la tenue diélectrique par rapport au système sans revêtement de 25-30 %.

Dans [16], on s'intéresse à l'effet d'une anodisation (oxydation) du conducteur central d'un système coaxial sur la tenue diélectrique de ce système. Le gaz testé est du SF<sub>6</sub> sous une pression de 0.6 MPa et une tension de choc de foudre. La rugosité des conducteurs est comprise entre 10 et 50 μm. Le champ électrique de claquage maximum sur le conducteur central pour des électrodes sans anodisation diminue avec la rugosité. Ce champ est environ 20 % plus élevé dans le cas d'un conducteur central anodisé par rapport au même cas sans anodisation pour une rugosité de 10 μm.

Dans [17], l'objectif est de déterminer l'influence de la résistivité volumique du revêtement dans l'augmentation de la tension de claquage. Pour ce faire, on charge le revêtement avec du graphite. Les matériaux utilisés sont du verni polyuréthane, du verni en époxyde, de la cire paraffine et de l'aluminium anodisé. Le gaz testé est du SF<sub>6</sub> en géométrie uniforme (profil Bruce) sous une pression de 0.68 MPa. Les tensions sont du continu et du choc de foudre.

Les résultats reportés sont :

- Les revêtements de résistivité volumique supérieure à 10<sup>11</sup>Ω.cm augmentent sensiblement la tension de claquage. Cette tension de claquage augmente avec l'épaisseur du revêtement.
- Le premier claquage, qui est environ 20 % plus élevé que les suivants, perce le revêtement. Cependant, ces perforations ont une influence négligeable sur la tenue diélectrique.
- La présence de matière non conductrice dans l'espace inter-électrodes n'affecte pas la tenue diélectrique.

- Les revêtements se "chargent" en surface après l'application de la tension. Ces charges restent à la surface pendant plusieurs minutes même après le retrait de la tension.

### **1.1.3. Les brevets**

Parmi les brevets qui traitent du sujet, celui déposé par ABB en 2001 sous le numéro DE10009474 est particulièrement pertinent. Le système breveté est constitué d'un gaz et d'une couche d'isolant solide entre deux électrodes haute tension. Une couche semi-conductrice est appliquée sur au moins une surface de l'isolant solide.

On peut également citer celui déposé par SIEMENS en 1982 sous le numéro DE3112022 dans lequel le conducteur central et la surface intérieure du conducteur extérieur d'un système coaxial sont couverts d'une couche conductrice afin de lisser les surfaces.

Un brevet plus général qui peut être noté est celui déposé par CENTRAL ELETRIC GENERATOR BOARD en 1964 sous le numéro GB967012. Il s'agit d'un câble coaxial isolé par un gaz sous pression composé d'un conducteur central maintenu par des "rails" diélectriques dans un conducteur extérieur à la manière d'une virole. La surface intérieure du conducteur extérieur et la surface extérieure du conducteur central sont revêtues d'un matériau diélectrique de sorte que la tenue diélectrique soit moins dépendante de l'état de surface de ces conducteurs.

Ainsi, tenant compte de ces différentes hypothèses, il a été constitué un cahier des charges décrit ci-après.

## 1.2. Cahier des charges

Le principe de l'isolation hybride repose sur le phénomène d'injection d'électrons des conducteurs métalliques vers le gaz. En effet, comme nous l'avons vu précédemment, des électrons peuvent, sous l'effet du champ électrique, quitter le métal et diminuer la tenue diélectrique du gaz. L'idée est donc d'appliquer une couche de matériau isolant solide sur ces conducteurs afin de limiter l'injection d'électrons de ces derniers vers le gaz. Cette couche, matérialisée en vert et repérée (1) sur la figure 4, constitue la barrière isolante principale (BIP). Pour obtenir une meilleure adhérence et une continuité des équipotentiels, on envisage d'utiliser entre le conducteur et la couche BIP une sous-couche d'un matériau semi-conducteur (MSC), en noir et repérée (2) sur la figure.

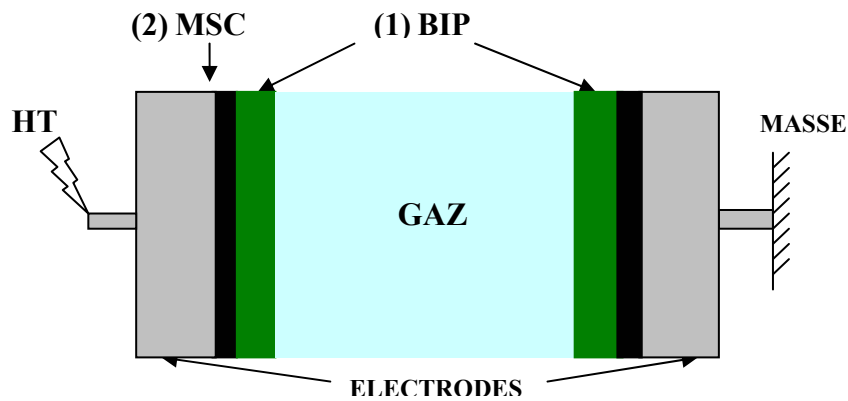


Figure 4 : Principe de l'isolation hybride.

### 1.2.1. Les couches solides

#### 1.2.1.1. Sous-couche semi-conductrice (MSC)

**Fonction :**

Cette sous-couche a pour fonction :

- D'assurer une adhérence entre le conducteur métallique et la sous-couche BIP ;
- De lisser la surface du conducteur et limiter ainsi l'apparition d'un champ électrique local intense pouvant provoquer l'injection d'électrons.

**Composition :**

C'est une couche à base de polymère dans lequel on disperse un matériau faiblement conducteur pulvérulent tel que du noir de carbone, des charges minérales telles que de la silice ( $\text{SiO}_2$ ), de l'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), du dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ), ou toute autre charge permettant d'améliorer les propriétés mécaniques du matériau et éventuellement l'adhésion de la couche sur son support et des couches entre elles.

Elle peut aussi se présenter sous forme d'une couche en matériau composite comprenant une matrice polymère dans laquelle sont dispersées des inclusions de noir de carbone, par exemple, en une teneur allant de 10 à 50 % en poids par rapport au poids total du matériau. La matrice peut être thermoplastique tel que du Polyéthylène (PE), Polypropylène (PP), PET (Polyéthylène téréphtalate) ou thermodurcissable telle que l'Epoxyde, le Polyuréthane (PU), le polyester ou encore une matrice polymère élastomérique comme du silicone, de l'Ethylène Propylène Diène Monomère (EPDM), ... etc.

**Epaisseur :**

Cette sous-couche peut présenter une épaisseur allant de 10 à 500  $\mu\text{m}$  ; de préférence 100 à 300 $\mu\text{m}$ .

**Mise en œuvre :**

La sous-couche peut être déposée par extrusion, par pulvérisation, par trempage dans une solution liquide, ou tout autre moyen habituel de dépôt.

### 1.2.1.2. Couche isolante (BIP)

La sous-couche MSC est ensuite recouverte d'une couche solide en polymère organique isolant.

**Fonction :**

Cette couche constitue la Barrière Isolante Principale pour empêcher le phénomène d'injection d'électrons.

**Composition :**

Elle peut être constituée des mêmes matériaux que la sous-couche MSC mais sans incorporation de charges.

***Epaisseur :***

Elle présente typiquement une épaisseur allant de 0.1 à 5 mm, préférentiellement 0.5 à 2 mm.

***Mise en œuvre :***

Elle peut être déposée selon les mêmes techniques de dépôt que celles développées plus haut pour la sous-couche MSC. On peut également appliquer, entre les deux couches et lors du dépôt de la première sous-couche sur le conducteur, un traitement de surface visant à améliorer l'adhésion d'une couche sur l'autre ou sur le conducteur. Ce traitement peut être à base de silane pulvérisé sur les surfaces, ou encore de fonctionnalisation par traitement laser, ou toute autre technique de préparation de surface.

Il est préférable aussi que les deux couches solides soient constituées du même polymère de base.

**1.2.1.3. Contraintes à prendre en compte**

- Tenue aux gaz et à leurs produits de décomposition ;
- Tenue pour une plage de température de  $-40\text{ °C}$  à  $105\text{ °C}$  ;
- La tenue diélectrique ;
- La permittivité relative ;
- La résistivité volumique et superficielle ;
- Les phénomènes de réchauffement ;
- Les coefficients d'absorption, d'émission ;
- Le coefficient de dilatation.

### 1.2.2. La couche gazeuse

Le système d'isolation hybride comprend aussi une couche gazeuse constituée d'un gaz isolant sous pression qui occupe l'espace entre les deux conducteurs avec ou sans revêtements.

Le gaz constituant cette couche peut être de l'air sec, de l'azote ( $N_2$ ), du protoxyde d'azote ( $N_2O$ ) ou du dioxyde de carbone ( $CO_2$ ). Il peut également être constitué de tout mélange de gaz tels que le mélange obtenu présente un effet de serre moyen (GWP calculé sur 100 ans) inférieur à 15000 fois l'effet de serre du  $CO_2$ .

Ainsi, cette couche peut en particulier comprendre des additifs fluorés, tels que l'hexafluorure de soufre ( $SF_6$ ), le tétrafluorométhylène ( $CF_4$ ), le Xénon tétrafluorure ( $XeF_4$ ), le Xénon difluorure ( $XeF_2$ ), le tétrafluorosilane ( $SiF_4$ ), l'hexafluorure de tungstène ( $WF_6$ ), ou tout autre fluorure minéral. L'idéal étant que cette couche soit totalement dénuée de  $SF_6$ .

### 1.3. Conclusion

Le principe de l'isolation hybride est d'appliquer un revêtement à base de polymère isolant sur les conducteurs d'un système à isolation gazeuse. Ce revêtement a pour but d'améliorer la tenue diélectrique du système en limitant le phénomène d'injection d'électrons à partir des conducteurs vers le gaz. En effet, au voisinage des irrégularités de surface des conducteurs métalliques, le champ électrique est renforcé et des électrons peuvent ainsi gagner assez d'énergie pour quitter le métal et participer au claquage du gaz.

Le revêtement est constitué d'une première sous-couche semi-conductrice (MSC) qui a pour fonction de lisser ces irrégularités de surface et d'assurer une bonne adhérence entre le métal et la barrière isolante principale (couche BIP) qui a pour fonction d'empêcher le transit des électrons.

L'état de l'art a mis en évidence des travaux peu nombreux mais rapportant des résultats intéressants. L'augmentation de la tenue diélectrique décrite, due à l'application d'un revêtement sur le ou les conducteurs d'un système à isolation gazeuse, varie entre 7 % et 48 %. Les revêtements utilisés sont constitués d'une seule couche et l'épaisseur est de l'ordre de la dizaine voire la centaine de micromètre.

D'autres travaux rapportent que l'application de revêtements isolants solides sur des conducteurs de rugosité inférieure ou égale à 4  $\mu\text{m}$  n'a pas d'effet sur la tenue diélectrique du système à isolation gazeuse.

La distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrodes, la rugosité des conducteurs et la charge à la surface du revêtement semblent être des paramètres importants.

# **CHAPITRE 2**

## **ASPECTS THEORIQUES**



Dans ce chapitre nous allons aborder les aspects théoriques permettant d'étudier le comportement diélectrique de la structure hybride "métal – diélectrique solide – gaz isolant" en nous efforçant de mettre en évidence les phénomènes importants pour chaque composante de la structure.

Pour cela, nous nous intéresserons dans un premier temps aux phénomènes d'injections de charges à partir des conducteurs métalliques, puis aux phénomènes de polarisation dans les diélectriques solides et enfin au claquage diélectrique dans un gaz isolant.

Nous allons aussi établir trois hypothèses sur le comportement diélectrique global de cette structure en fonction du champ électrique appliqué.

## 2.1. Phénomène d'injections d'électrons

Dans les conditions normales, les électrons libres contenus dans un métal ne peuvent pas le quitter à cause des forces électrostatiques. Pour vaincre ces forces, une certaine quantité d'énergie est requise. Il existe plusieurs processus d'émission permettant de transmettre cette énergie pour libérer les électrons.

### 2.1.1.1. Le travail de sortie

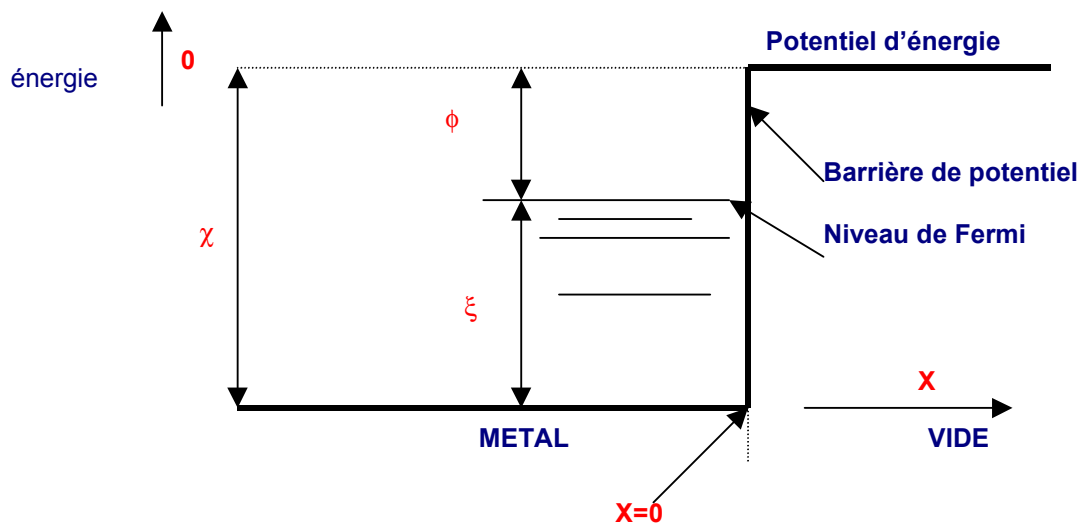


Figure 5 : Travail de sortie  $\phi$  d'un métal.

Un métal contient des électrons libres qui peuvent se mouvoir mais qui ne peuvent pas spontanément quitter le métal à cause de la barrière de potentiel  $\phi$  à l'interface métal-vide (figure 5). Cependant, du fait de leur mouvement, ces électrons acquièrent une certaine énergie cinétique occupant ainsi des niveaux d'énergie différents. Le niveau d'énergie le plus élevé occupé par un électron est appelé niveau de Fermi. Le travail de sortie  $\phi$  d'un métal est la différence  $\chi - \xi$  qui correspond donc à l'énergie nécessaire à un électron pour quitter le métal. A champ électrique relativement important (à partir de quelques  $10^6$  V/m), la barrière énergétique à l'interface électrode-isolant peut être franchie par les porteurs suivant deux processus distincts. Le premier est le saut par activation thermique au dessus de la barrière en tenant compte de l'abaissement de celle-ci sous l'effet du champ électrique et de la température (effet Schottky). Le deuxième, est le passage de la charge par *effet tunnel* au travers de la barrière de potentiel (effet Fowler-Nordheim). Les deux phénomènes peuvent aussi se superposer.

### 2.1.1.2. Emission Schottky

D'après Schottky, le travail de sortie d'un métal est diminué sous l'action d'un fort champ électrique et la densité de courant émise suit la relation suivante :

$$J_s = A_s T^2 \exp \left\{ - \frac{\phi - \beta_s \sqrt{E_c}}{kT} \right\} \quad (1)$$

$A_s = \frac{4qm k^2}{h^3} = 12 \cdot 10^5 (A/m^2 K^2)$  est la constante de Richardson-Dushman pour l'émission thermoélectrique où :

- $m$  est la masse effective de l'électron ;
- $q$  est la charge élémentaire  $\approx 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$  ;
- $h$  est la constante de Planck  $\approx 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$  ;
- $k$  est la constante de Boltzmann  $\approx 1.380 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ .

$T$  est la température en K,  $E_c$  est le champ électrique à la cathode et  $\beta_s = \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$  est la constante de Schottky (C.m) où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide  $\approx 8.854 \cdot 10^{-12}$  et  $\epsilon_r$  la permittivité relative du milieu.

### 2.1.1.3. Emission Fowler - Nordheim

Pour un travail de sortie de 4 à 5 eV, et un champ électrique supérieur à  $10^8 \text{ V/m}$ , le courant calculé à partir de la relation de Schottky est encore très faible. Cependant, les mesures expérimentales donnent des courants mesurables. Fowler et Nordheim [26] ont expliqué ces résultats par le caractère ondulatoire des électrons qui, en présence d'un fort champ électrique, n'ont plus besoin de surmonter la barrière de potentiel. Ils la traversent par *effet tunnel*. De tels champs sont observés en présence de formes pointues et d'irrégularités de surface microscopiques. Ces champs sont beaucoup plus élevés que les champs de claquage même dans les gaz sous pression. Dans certains cas, une émission Fowler-Nordheim est possible avec des champs appliqués apparents aussi faibles que  $10^7 \text{ V/m}$ . Cet effet est attribué au

renforcement du champ électrique local sur les irrégularités de surface qui peuvent multiplier ce champ par 10 voire 100 (effet du rayon de courbure). Des ions positifs peuvent aussi rester temporairement sur une couche d'oxyde isolante à la surface de la cathode et créer localement un très grand renforcement du champ électrique. Les particules de poussières constituent un facteur important dans la création de champs électriques locaux très intenses.

Fowler et Nordheim ont proposé l'expression suivante pour la densité de courant :

$$J_{FN} = A_{FN} (E_C)^2 \exp\left(-\frac{\beta_{FN}}{E_C}\right) \quad (2)$$

Où  $E_C$  est le champ électrique réel à la cathode en kV/mm,  $A_{FN} = \frac{q^3}{8\pi h \phi}$  est une constante où  $q$  est la charge élémentaire  $\approx 1.602 \cdot 10^{-19}$  C,  $h$  est la constante de Planck  $\approx 6.626 \cdot 10^{-34}$  J.s et  $\phi$  est le travail de sortie.  $\beta_{FN} = \frac{4\sqrt{2m\phi^{3/2}}}{3hq}$  est une constante où  $m$  est la masse effective de l'électron.

Nous allons nous intéresser à présent à l'une des propriétés des diélectriques solides qui nous semble jouer un rôle important dans la structure hybride : la polarisation.

## 2.2. Polarisation des diélectriques solides

La propriété essentielle des matériaux diélectriques solides est de se polariser lorsqu'un champ électrique leur est appliqué. La polarisation  $\vec{P}$  est le moment dipolaire par unité de volume. Elle est reliée à la permittivité  $\epsilon$  du matériau et au champ électrique macroscopique  $E$  par la relation :

$$\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0) \vec{E} \quad (3)$$

Où  $\epsilon_0$  est la permittivité du vide et  $\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$  avec  $\epsilon_r$  la permittivité relative du matériau.

Un matériau est dit polaire lorsque les molécules qui le constituent possèdent un moment dipolaire permanent. Ces moments s'orientent dans une direction privilégiée sous l'effet du champ électrique. Lorsqu'on applique un champ électrique, divers processus de polarisation peuvent apparaître.

### **2.2.1. Polarisation de déformation**

Il s'agit des phénomènes de polarisation affectant la forme des nuages électroniques ainsi que les liaisons covalentes (liaisons par l'intermédiaire des électrons) ou ioniques. La polarisation électronique se manifeste par un léger déplacement des électrons par rapport au noyau sous l'effet du champ électrique externe. Lorsque deux atomes sont liés par une liaison covalente, un moment dipolaire peut s'instaurer si les polarités des deux atomes sont différentes. C'est la polarisation atomique. L'application d'un champ électrique modifie le moment dipolaire par modification de la distance entre les atomes. La polarisation ionique affecte les matériaux présentant des liaisons ioniques ou iono-covalentes. Le déplacement relatif des ions positifs et négatifs sous l'action du champ fait apparaître un moment dipolaire ionique induit.

### **2.2.2. Polarisation dipolaire**

Dans un diélectrique polaire et en l'absence de champ appliqué, les moments permanents n'ont pas d'orientation privilégiée car l'agitation thermique s'y oppose. Lorsqu'un champ est appliqué, les dipôles ont tendance à s'orienter selon ce champ. Ce phénomène peut perdurer après suppression du champ électrique. Les diélectriques polaires ont une permittivité supérieure aux diélectriques non polaires.

### **2.2.3. Polarisation interfaciale**

Lorsqu'une non homogénéité existe dans le matériau, les surfaces de séparation entre deux phases 1 et 2 se chargent de façon opposée sous l'action du champ électrique. Les charges accumulées sur les surfaces de séparation induisent une polarisation supplémentaire appelée polarisation interfaciale.

### **2.2.4. Polarisation par charge d'espace**

Considérons par exemple un échantillon contenant une concentration uniforme de centres ionisés et tout autant de porteurs quasi-libres (c'est-à-dire qui peuvent se libérer sous l'action du champ électrique). Si les électrodes sont bloquantes (n'injectent pas de charges), l'échantillon est neutre en tout point lorsque aucun champ électrique n'est appliqué. Quant un

champ est appliqué au diélectrique, ce dernier reste globalement neutre mais les porteurs libérés s'accumulent près de l'électrode de signe opposé constituant ainsi une hétérocharge.

## 2.3. Claquage diélectrique dans un gaz

Un gaz est théoriquement un isolant parfait puisqu'il ne contient que des atomes ou des molécules neutres. Pour que l'initiation de la décharge disruptive se produise, il faut qu'au moins une particule chargée dite *particule germe*, généralement un électron, soit présent dans ce gaz. Dès lors que cet électron est créé, il est accéléré par le champ électrique appliqué et entre en collision avec les molécules neutres du gaz. Quand le champ est suffisant, cette charge, entre deux chocs, prend assez d'énergie pour ioniser une molécule et créer d'autres charges libres qui à leurs tours peuvent ioniser d'autres molécules. C'est l'effet d'avalanche électronique. Plusieurs avalanches peuvent ainsi être créées dans le gaz. Ces dernières peuvent conduire au claquage électrique suivant deux mécanismes : le mécanisme de Townsend ou le mécanisme du canal (Streamer en anglo-saxon) en fonction de plusieurs paramètres tels que la distribution du champ électrique entre les électrodes, l'intensité de ce champ, la forme de la tension appliquée, le taux d'humidité, ... etc.

### 2.3.1. L'avalanche électronique

Considérons un système de deux électrodes planes et parallèles plongées dans un gaz isolant et entre lesquelles il y a un électron libre. Lorsqu'on applique une tension, l'électron est de plus en plus accéléré sous l'effet du champ électrique (figure 6). 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 (figure 7). Ce phénomène est caractérisé par un coefficient  $\alpha$  appelé coefficient d'ionisation (ou premier coefficient de Townsend). Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par ionisation par collisions au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une avalanche électronique (figure 8).

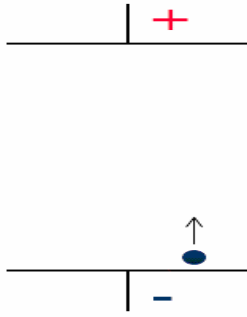


Figure 6 : Accélération de l'électron.

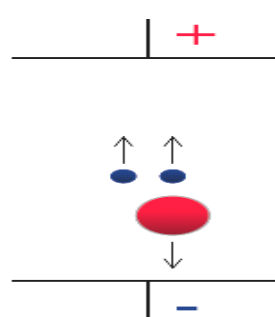


Figure 7 : Ionisation par collision.

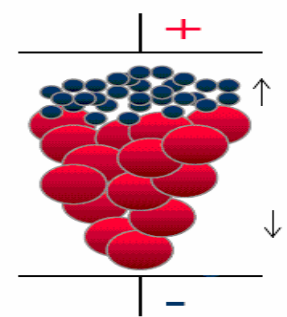


Figure 8 : Avalanche électronique.

## 2.3.2. Théorie de Townsend

### 2.3.2.1. Mécanismes de claquage

Dans la théorie de Townsend, les ions positifs de l'avalanche électronique vont vers la cathode (électrode négative). Si ces derniers ont une énergie suffisante, ils peuvent *arracher* des électrons par bombardement de la cathode qui vont venir renforcer l'avalanche. 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. On définit le coefficient  $\gamma$  appelé *coefficient d'émission secondaire* ou *second coefficient de Townsend* qui représente le nombre d'électrons arrachés à la cathode par un ion positif. Ce coefficient dépend de la nature du matériau constituant la cathode et du gaz.

### 2.3.2.2. Critère de claquage

L'équation générale de Townsend reliant le courant d'avalanche  $I$  au courant initial  $I_0$  en champ non uniforme est :

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1 + \int_0^d \exp \left[ \int_0^x (\alpha - \eta) \right] \alpha dx}{1 - \gamma \int_0^d \exp \left[ \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] \alpha dx} \quad (4)$$

Où  $d$  est la distance inter-électrodes en mm,  $\alpha$  le coefficient d'ionisation,  $\gamma$  le coefficient d'émissions secondaires et  $\eta$  le coefficient d'attachement. Ce dernier caractérise la propriété qu'ont certains gaz à *capturer* des électrons (gaz dits électronégatifs).

Dans ce cas, le critère de claquage est :

$$\gamma \int_0^d \exp \left[ \int_0^x (\alpha - \eta) dx \right] \alpha dx = 1 \quad (5)$$

Pour un champ uniforme, ce critère devient :

$$\frac{\alpha \gamma}{\alpha - \eta} [\exp (\alpha - \eta) d - 1] = 1 \quad (6)$$

Pour un champ uniforme et un gaz non électronégatif, le critère devient :

$$\gamma [\exp \alpha d - 1] = 1 \quad (7)$$

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes de plus d'un centimètre et des pressions proches de la pression atmosphérique, la théorie de Townsend ne peut pas expliquer les temps de développement de la décharge mesurés ( $10^{-9}$  à  $10^{-7}$  s) [27]. Ces temps étant beaucoup plus courts que ceux nécessaires à l'apparition d'effets secondaires à la cathode. Cette théorie ne peut également pas expliquer le fait que la tension de claquage ne dépende pas du matériau de la cathode qui doit intervenir par l'intermédiaire du coefficient d'émissions secondaires  $\gamma$ .



### 2.3.3. Théorie du canal (Streamer)

#### 2.3.3.1. Mécanismes de claquage

Dans la théorie du Streamer, la présence d'une seule avalanche de taille suffisamment importante peut provoquer le claquage par l'intermédiaire d'un canal de plasma appelé Streamer. Les mécanismes de base de cette théorie sont :

- La création d'une avalanche primaire du type Townsend engendrée par un électron germe ;
- Le renforcement du champ électrique local par la charge d'espace positive laissée par la première avalanche ;
- La photo ionisation du gaz à la tête de l'avalanche ;
- La transition avalanche-Streamer lorsque le champ de charge d'espace devient de l'ordre de grandeur du champ électrique appliqué.

L'avalanche primaire peut prendre 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 (électrode positive) alors que de l'autre côté, les ions positifs restent immobiles (la mobilité des électrons est 100 à 1000 fois supérieure à celle des ions). Le champ devient alors non uniforme 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. Le champ électrique sur les flancs de l'avalanche quant à lui, diminue. Dès que la charge d'espace de l'avalanche primaire atteint une taille critique (soit environ  $10^8$  électrons), elle va contribuer à intensifier les collisions ionisantes sur les pôles.

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 vont créer à leurs tours une charge d'espace positive à l'avant de la première. Ces avalanches secondaires jouent le rôle de facteur d'entretien et la décharge devient autonome.

Chaque avalanche se développe 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 phénomènes se transplantent par rayonnement lumineux et non par migration d'électrons et d'ions. L'ionisation se fait donc sans l'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 électrique.

D'autre part, lors de collisions élastiques (non ionisantes) avec les particules neutres du 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. C'est le cas dans le développement du type Streamer.

Le champ électrique 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  $0.5 \cdot 10^6$  V/m et de  $1.5 \cdot 10^6$  V/m lorsque celui-ci se développe à partir de la cathode alors que le champ critique est d'environ  $3 \cdot 10^6$  V/m (dans les conditions normales de pression et de température).

Dans le cas d'intervalles inter-électrodes importants ( $> 1$  m pour l'air à pression atmosphérique), la décharge en forme de Streamer se transforme lors de son passage vers l'autre électrode en une forme de décharge appelée Leader. L'augmentation du nombre de porteurs de charges à l'intérieur du Streamer en même temps que sa propagation peut accroître la température du gaz jusqu'à une valeur favorisant l'ionisation thermique. L'intensité du champ électrique nécessaire au maintien de cette forme de décharges est plus faible que celle du Streamer ; ce champ décroît avec la longueur du Leader.

### 2.3.3.2. Critère de claquage

Plusieurs critères ont été proposés pour caractériser le claquage selon le mécanisme du Streamer. Meek [28] a déterminé l'équation suivante pour la rupture d'un intervalle en champ non uniforme :

$$\alpha_x \exp \left[ \int_0^x \alpha dx \right] = KE_x \left( \frac{x}{\rho} \right) \quad (8)$$

L'indice  $x$  se rapporte à la position du front de l'avalanche.  $\alpha$  est le coefficient d'ionisation.  $x$  représente la longueur critique de l'avalanche  $K$  est une constante caractéristique du gaz.  $E$  est le champ électrique et  $\rho$  est la masse volumique du gaz.

Raether [29] a proposé une relation semblable :

$$\int_0^x \alpha dx = k \quad (9)$$

Où  $k$  est une constante du gaz. Pour l'air atmosphérique, elle est voisine de 20.

Pedersen [30] a proposé la relation suivante pour l'air :

$$\alpha_x \exp \left[ \int_0^x \alpha dx \right] = G(x, \rho) \quad (10)$$

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

Pour le SF<sub>6</sub>, il a proposé la relation suivante :

$$\int_0^x (\alpha - \eta) dx = 18 \quad (11)$$

Dans [27], on conclut que "le modèle du Streamer est important d'un point de vue quantitatif puisqu'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

*est pratiquement impossible. Les considérations théoriques doivent être complétées par des résultats expérimentaux, permettant d'établir des relations quantitatives nécessaires à la conception de systèmes d'isolation".*

### 2.3.4. Courbes de Paschen

D'après la loi de Paschen, la tension de claquage  $U_d$ , d'un gaz dans un champ électrique uniforme est une fonction simple du produit  $p*d$  de la pression  $p$  par la distance  $d$  inter-électrodes. Cette loi est valable pour une température constante et est représentée par des courbes dites de Paschen déterminées expérimentalement. On trouvera, en annexe pages 121 et 122, les courbes de Paschen pour le  $N_2$  et le  $SF_6$ . Ces courbes sont souvent utilisées pour le dimensionnement des systèmes à isolation gazeuse [31].

### 2.3.5. Critère basé sur les courbes de Paschen

On peut formuler simplement une théorie correspondant au début de l'ionisation et qui explique les courbes de Paschen.

La pression  $p$  et  $n$  le nombre de molécules par  $m^3$  sont liés par la relation suivante :

$$p = nkT \quad (12)$$

Où  $k$  est la constante de Boltzmann et  $T$  est la température absolue en K.

Soit  $\lambda$  le libre parcours moyen (distance moyenne que parcourt un électron entre deux collisions) et  $\sigma$  la section efficace de la molécule du gaz considéré en  $m^2$ .

Par définition :

$$\sigma n \lambda = 1 \quad (13)$$

L'énergie thermique (à température ambiante) seule ne suffit pas à activer et ioniser une molécule car l'énergie nécessaire est forte (tableau 2). Il faut donc l'activer par le champ électrique.

Gaz	Energie d'ionisation en eV
N <sub>2</sub>	15.53
SF <sub>6</sub>	19.30

Tableau 2 : Energie d'ionisation du N<sub>2</sub> et du SF<sub>6</sub>.

Sous l'effet d'un champ électrique  $E$ , un électron ou un ion sur la distance  $\lambda$  prend l'énergie moyenne  $qV$  en eV :

$$qV = qE\lambda \quad (14)$$

Avec  $q$  la charge élémentaire et  $V$  la tension appliquée en V.

La probabilité pour que cette énergie  $qV$  ionise la molécule est donnée par la relation suivante :

$$\exp\left(-\frac{qV_C}{qV}\right) = \exp\left(-\frac{V_C}{E\lambda}\right) \quad (15)$$

Avec  $V_C$  la tension d'ionisation en V.

Le nombre de chocs  $N_C$  sur la distance  $d$  est en moyenne :

$$N_C = \frac{d}{\lambda} \quad (16)$$

Ou encore

$$N_C = dn\sigma = d\sigma \frac{P}{kT} \quad (17)$$

Le nombre de chocs actifs  $N_{CA}$  est donné par la relation suivante :

$$N_{CA} = N_C \exp\left(-\frac{V_C}{E\lambda}\right) \quad (18)$$

Le claquage a lieu lorsque ce nombre de chocs actifs devient grand devant 1. Soit  $C$  ce nombre et  $V_D$  la tension de claquage. Nous pouvons écrire dans le cas d'un champ électrique uniforme :

$$N_C \exp\left(-\frac{V_C}{E\lambda}\right) = C \quad (19)$$

$$E = \frac{V_D}{d}$$

La relation (13) nous permet d'écrire :

$$dn\sigma \exp\left(-\frac{V_C}{V_D} dn\sigma\right) = C \quad (20)$$

Ou encore :

$$\frac{dn\sigma}{C} = \exp\left(\frac{V_C}{V_D} dn\sigma\right) \quad (21)$$

En prenant le logarithme de cette relation, nous obtenons la relation de Paschen :

$$\frac{V_C}{V_D} dn\sigma = \text{Ln}\left(\frac{dn\sigma}{C}\right) \quad (22)$$

Ou encore :

$$V_D = \frac{dn\sigma}{\text{Ln}\left(\frac{dn\sigma}{C}\right)} * V_C \quad (23)$$

Cette fonction passe par un minimum (minimum de Paschen) pour :

$$dn_0\sigma = eC$$

et

$$V_D = dn_0\sigma V_C \quad (24)$$

$n_0$  est le nombre de molécules de gaz au minimum de Paschen.

2.3.5.1. Exemple du  $N_2$ 

Sur la courbe de Paschen, le minimum est de :

$V_D = 295$  V pour  $(pd)_m = 1$  Pa.m.

Les relations, ci-dessus, nous donnent :

$$(dn_0\sigma) = \frac{V_D}{V_C} = \frac{295}{15,51} = 19,0$$

Et (25)

$$C = \frac{19}{e} = 7$$

Avec  $d=10mm$  et dans les conditions normales de pression et de température, on obtient :

$$p_0 = 100 \text{ Pa}$$

$$n_0 = \frac{p}{kT} = 2,4 * 10^{22} \text{ molécules}$$

$$\sigma = \frac{eC}{dn_0} \cong 8 * 10^{-20} \text{ m}^2$$

(26)

Ce modèle théorique vérifie bien la courbe expérimentale de Paschen au moins jusqu'à 4 MPa.mm.

### 2.3.5.2. Exemple du SF<sub>6</sub>

Le cas du SF<sub>6</sub> est plus complexe dû à son caractère électronégatif. Il semble que  $\sigma$  varie avec  $n$  (ou la pression). Nous avons trouvé une loi qui permet de tenir compte de ce phénomène :

$$\sigma = \sigma_0 \left( \frac{n_0}{n} \right)^\beta$$

$$\beta = 0,1$$
(27)

La relation (23) devient :

$$V_D = \frac{dn \sigma_0 \left( \frac{n_0}{n} \right)^\beta}{Ln \left( \frac{dn \sigma_0 \left( \frac{n_0}{n} \right)^\beta}{C} \right)} * V_C$$
(28)

De même que pour le N<sub>2</sub>, la courbe de Paschen du SF<sub>6</sub> nous donne  $C=9.53$ .

Cette théorie simple, utilisant un minimum de paramètres, rend bien compte quantitativement des courbes de Paschen.

## 2.3.6. Réflexions sur l'origine de la particule germe

### 2.3.6.1. Electrodes nues

L'origine de la particule germe qui conduit à l'avalanche primaire est encore l'objet de nombreuses hypothèses. Dans l'obscurité, à l'intérieur d'un blindage, à température basse ( $\leq 300$  K), il est difficile d'imaginer l'existence d'ions vu les énergies nécessaires.

Certains auteurs accusent le rayonnement cosmique  $\gamma$  [32]. Pourtant, on a observé des décharges sous fort blindage.

D'autres parlent d'injections par effet de champ (effet tunnel) à partir de certains potentiels électriques susceptibles de créer sur des pointes (rayon de courbure de quelques  $\mu\text{m}$ ) des champs électriques très forts. En effet, pour vaincre le travail de sortie de l'électron ( $\geq 4$  eV pour l'aluminium par exemple) il faut des champs supérieurs à  $10^9$  V/m. Des auteurs ont



"travaillé" la rugosité du métal pour la diminuer [34]. Effectivement, la décharge commence à des champs plus forts, mais elle existe encore.

On peut alors penser à l'association de plusieurs effets. Il semble évident qu'il existe un effet *tunnel* dû à la nature *quantique* de l'électron. On attribue à l'électron une longueur d'onde de probabilité qui va de 50 – 60 Å pour l'électron libre à l'ambiante à quelques dizaines voire quelques unités d'Å pour l'électron *lié*. L'électron est *libre* dans le métal et il est *lié* dans le gaz dont les molécules viennent heurter les parois (surtout sous pression) un grand nombre de fois par seconde. On peut donc bien imaginer durant un temps très court, une proximité de quelques Å entre une molécule de gaz et la paroi du métal : cette situation peut occasionner de très forts champs. Par exemple à la cathode chargée négativement, un électron peut passer par effet tunnel du métal au gaz, dès que la distance *molécule du gaz – électron du métal* est de l'ordre de 4 Å (champ moléculaire  $\approx 10^{10}$  V/m). Un électron germe est alors créé dans le gaz.

#### 2.3.6.2. Electrodes recouvertes

Dans le cas d'électrodes recouvertes d'un isolant solide, il s'agit du contact *molécule du solide – molécule du gaz*. Nous sommes en présence d'électrons *liés* des deux côtés. Le phénomène décrit précédemment peut être extrapolé dès l'instant où l'interface *gaz – solide* est chargée par polarisation. Le phénomène peut aussi avoir lieu côté anode pour *arracher* par effet tunnel un électron à une molécule de gaz. Ici, la probabilité sera plus faible car la charge positive est abaissée d'un facteur  $\epsilon_r$  par rapport au cas *électrodes nues*. On peut donc penser à une amélioration, bien que le champ appliqué dans le gaz soit plus fort. Cependant, si la décharge démarre, elle dépose des charges positives côté interface près de la cathode et des charges négatives côté interface près de l'anode. Cet effet diminue le champ dans le gaz et l'accroît dans le solide.

### 2.3.7. Configuration métal - isolant solide - gaz

L'isolation mixte a été peu étudiée sur le plan théorique. Devant cette situation, nous allons analyser trois hypothèses simples – mais réalistes – concernant les processus de claquage. La tension considérée est la tension de choc de foudre et le mode opératoire consiste en l'application d'une série de choc de niveau croissant jusqu'au claquage. On admet l'existence de l'électron germe ou particule germe dans le gaz, ce qui semble admis par les expérimentateurs.

#### 2.3.7.1. Hypothèse 1

Quand le champ appliqué est faible, la distribution des charges est du type capacitif. La polarisation interfaciale augmente le champ électrique  $E_g$  dans le gaz tandis que le champ électrique dans le solide  $E_s$  diminue (figure 9). Dans ce cas, si cette situation demeure lorsque le champ électrique de claquage est atteint, la tension de claquage du système avec des électrodes recouvertes sera plus faible que la tension de claquage du même système avec des électrodes nues.

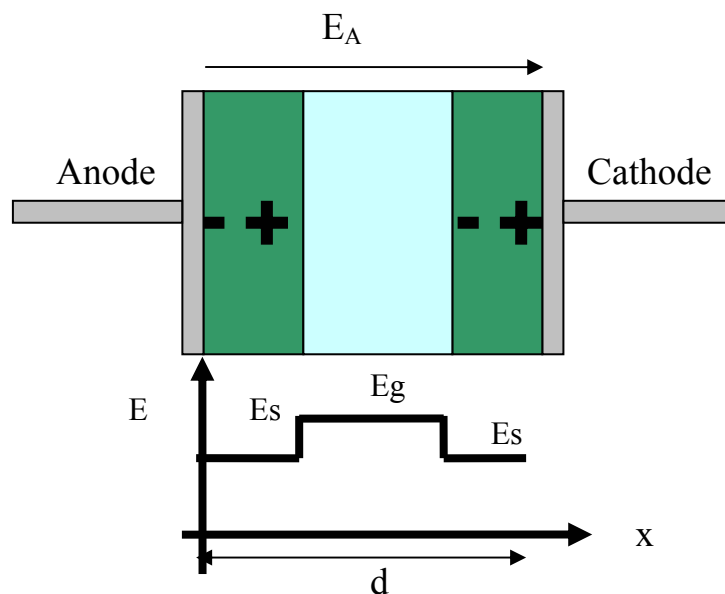


Figure 9 : Distribution capacitive du champ électrique dans le système (à faible champ).

## 2.3.7.2. Hypothèse 2

Supposons que, le niveau de tension montant, le champ électrique appliqué  $E_A$  devienne suffisamment intense pour que l'ionisation du gaz commence sans pour autant initier le claquage. Le gaz devient alors légèrement conducteur. Des charges positives et négatives vont alors se déposer respectivement sur la surface du solide côté cathode et côté anode (figure 10). Dans ce cas, un champ électrique inverse  $E_i$  peut apparaître dans le gaz. Il en résulte que le champ électrique dans le gaz est diminué. Avec cette hypothèse, la tension de claquage du système avec des électrodes recouvertes sera supérieure à la tension du même système avec des électrodes nues. La distribution des charges n'est plus du type capacitif.

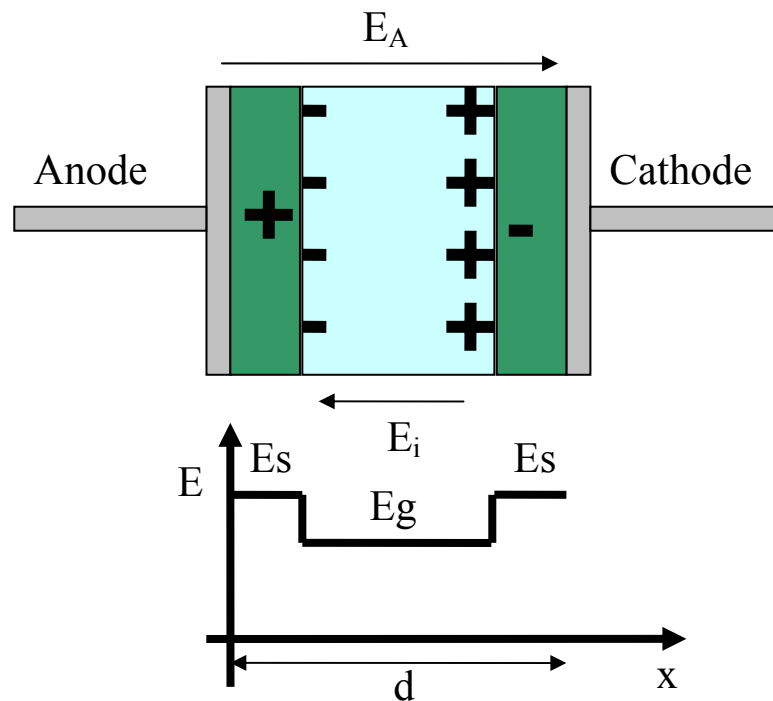


Figure 10 : Distribution du champ électrique dans le système avec un gaz ionisé (champ intense).

## 2.3.7.3. Hypothèse 3

Si durant le choc critique – ou dû aux chocs précédents- le champ électrique a été suffisant pour permettre l'injection de charges dans les isolants solides à partir des électrodes, on a de la charge d'espace aux électrodes (figure 11). Dans ce cas, le champ électrique dans le gaz augmente et la tension de claquage du système avec des électrodes recouvertes sera inférieure à la tension du même système avec des électrodes nues.

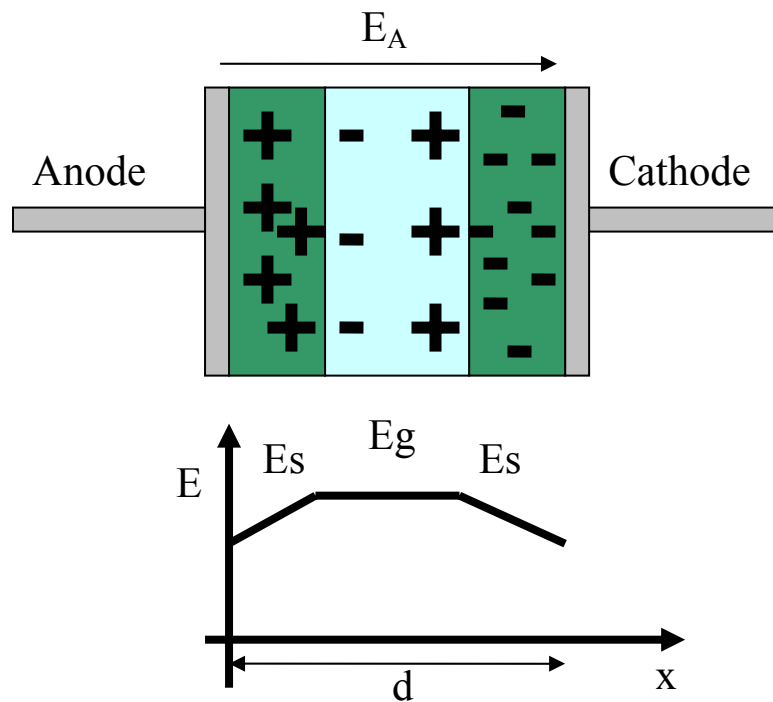


Figure 11 : Distribution du champ électrique dans le système avec injection de charges.

## 2.4. Conclusion

Nous venons de passer en revue les outils théoriques nous permettant d'étudier le comportement diélectrique de la structure "métal – diélectrique solide – gaz isolant".

Les électrodes métalliques peuvent influencer la tenue diélectrique de cette structure par l'injection d'électrons sous l'effet du champ électrique. L'injection Fowler – Nordheim est la plus contraignante car elle fait intervenir le renforcement du champ électrique local à la surface des conducteurs. Dans la pratique, ce renforcement peut être dû aux irrégularités de surface (micro – pointes), aux particules de poussières qui se déposent sur les conducteurs ou encore aux ions positifs qui restent temporairement sur une couche d'oxyde isolante à la surface de la cathode.

Les diélectriques solides affectent le comportement diélectrique de la structure par le phénomène de polarisation. La polarisation à l'interface "diélectrique solide - gaz isolant" peut, en fonction de l'intensité du champ électrique appliqué et de l'état d'ionisation du gaz, renforcer ou diminuer le champ électrique dans le gaz.

Dans le gaz isolant, le critère de claquage basé sur la théorie de Townsend valable pour une distance inter-électrodes de l'ordre de 10 mm et une pression proche de la pression atmosphérique ne semble pas être adapté à notre cas (essais sous 0.4 MPa). Le critère de claquage basé sur la théorie du canal (Streamer) semble être plus adapté mais, à cause des nombreux phénomènes qui interviennent, son application est très difficile. Nous avons donc établi un critère simple avec peu de paramètres qui explique bien les courbes de Paschen.

Nous allons maintenant décrire, dans le chapitre suivant, les aspects expérimentaux qui ont servi aux essais diélectriques haute tension.

## **CHAPITRE 3**

# **ASPECTS EXPERIMENTAUX**

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps décrire la cellule de tests et les électrodes sur lesquelles sera déposé le revêtement. Nous expliquerons ensuite le choix de la tension de choc de foudre comme tension d'essais ainsi que la stratégie d'essais appliquée. Puis, nous détaillerons la réalisation et la caractérisation électrique du revêtement. Nous exposerons par la suite des essais préliminaires ayant pour but de mettre en évidence une configuration de tests qui sera utilisée pour la suite de l'étude. Nous aborderons enfin la mesure d'un paramètre important qui est le taux d'humidité dans la cellule de tests.

### 3.1. La cellule de tests

Le dispositif utilisé pour les investigations est constitué de trois éléments :

- La cellule de tests (figure 12) ;
- Une cellule d'isolement ;
- Une traversée aérienne.

La photographie de la maquette est donnée en annexe page 123. Le générateur Haute Tension (HT) est connecté à la cellule de tests via la traversée aérienne et la cellule d'isolement. Un isolateur fermé étanche sépare la cellule d'isolement et la cellule de tests. Le gaz à tester est injecté à travers une vanne. La cellule de tests est constituée d'un plateau connecté à la haute tension (figure 14) et d'un plateau mis à la masse (figure 13), distants l'un de l'autre de 49 mm. Douze vérins, actionnables de l'extérieur de la cellule, sont fixés derrière le plateau mis à la masse. Sur ce plateau, douze trous de diamètre 50 mm ont été réalisés en regards des vérins. Pour chaque vérin, une électrode, ayant un profil optimisé, est fixée au bout de la tige et une autre juste en face sur le plateau côté HT. Le montage ainsi réalisé permet de tester douze échantillons sans devoir démonter le dispositif.

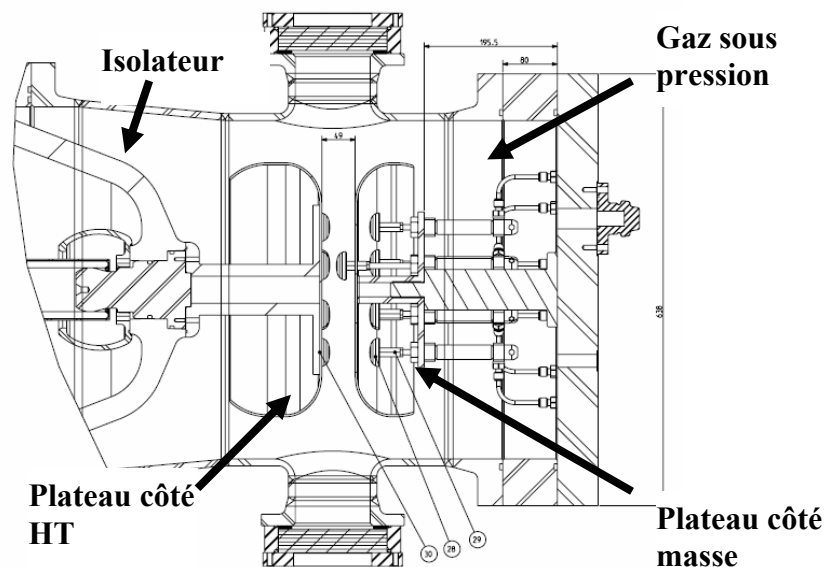


Figure 12 : Dessin de la cellule de tests.





Figure 13 : Plateau mis à la masse.



Figure 14 : Plateau mis sous tension.

### 3.2. Les électrodes

L'objectif est de réaliser les tests dans une géométrie à champ électrique aussi uniforme que possible dans la partie centrale des électrodes. Pour cela, la forme des électrodes a été optimisée à l'aide du logiciel de simulation FLUX2D en tenant compte de la configuration de la cellule de tests. Les électrodes utilisées sont en aluminium de rugosité moyenne est  $1.6 \mu\text{m}$ . Le résultat de l'optimisation est donné figure 15 et la forme finale des électrodes figure 16.

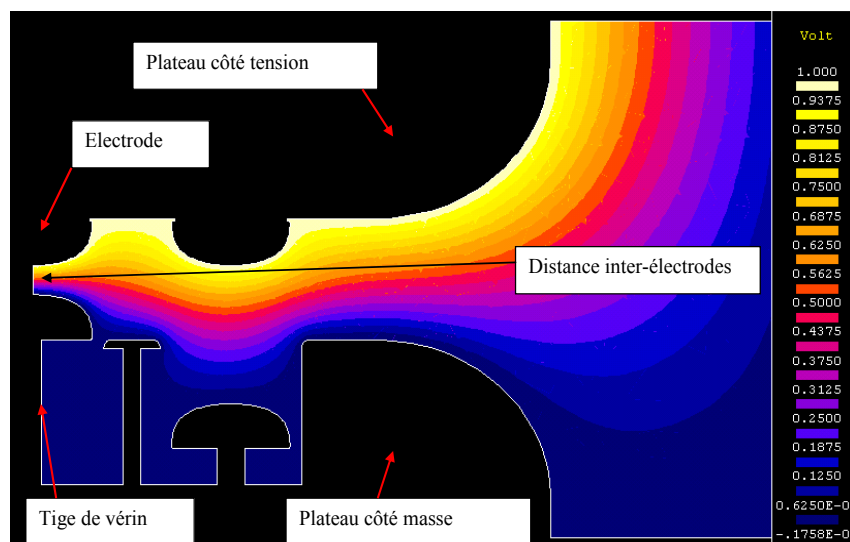


Figure 15 : Répartition des equipotentielles avec le logiciel Flux 2D.

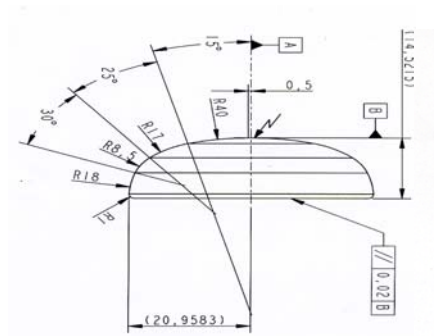


Figure 16 : Forme finale des électrodes.

### 3.3. Choix de la tension d'essais

Un appareil HT est conçu pour tenir la tension de service (tension alternative) mais aussi des tensions impulsionnelles représentant les perturbations qui apparaissent sur les réseaux électriques. Parmi ces tensions définies par la norme CEI 60243, la tension de choc de foudre est la plus contraignante d'un point de vue diélectrique. C'est la raison pour laquelle nous avons décidé d'investiguer avec ce type de tension.

#### 3.3.1. La tension de choc de foudre

La figure 17, ci-dessous, montre la forme normalisée de la tension de choc de foudre.

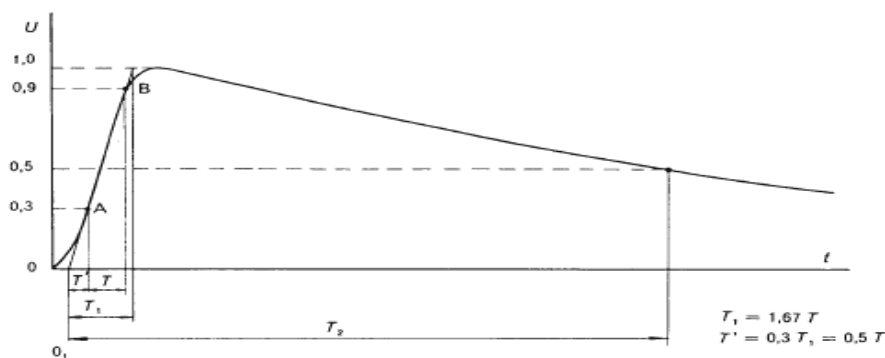


Figure 17 : Forme normalisée de la tension de choc de foudre.

La forme normalisée est caractérisée par un temps de montée  $T_1$  de  $1.20 \mu\text{s} \pm 30\%$  et un temps de descente  $T_2$  de  $50 \mu\text{s} \pm 20\%$ . On trouvera en annexe page 124 la forme de la tension appliquée dans la pratique.

Ce type de tension est obtenu en déchargeant des capacités haute tension à travers des éclateurs - deux électrodes sphériques séparées par un gap de gaz - dans un réseau de résistances et de capacités.

### 3.3.1.1. Génération d'une tension de choc de foudre

La figure 18, ci-dessous, montre le schéma de principe pour la génération capacitive d'une tension de choc de foudre. La capacité  $C_s$  est chargée sous la tension continue  $U_0$  puis déchargée lorsque la tension que peut tenir l'éclateur  $F$  est dépassée (ou bien en initiant volontairement le claquage de l'éclateur). La tension  $U_0$  se retrouve alors appliquée au circuit composé de la résistance de décharge  $R_e$ , de la résistance d'amortissement  $R_d$  et de la capacité  $C_b$  aux bornes de laquelle apparaît la tension de choc de foudre souhaitée  $u(t)$ .

La forme de  $u(t)$  est donnée par la relation suivante :

$$u(t) = \frac{U_0}{R_d C_b} * \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 - \tau_2} \left( \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) - \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \right) \quad (29)$$

Avec  $R_e C_b \gg R_d C_b$  on obtient :

$$\begin{aligned} \tau_1 &\approx R_e (C_s + C_b) \\ \tau_2 &\approx R_d \frac{C_s C_b}{C_s + C_b} \end{aligned} \quad (30)$$

Pour la tension de choc de foudre normalisée 1.20/50  $\mu s$  on a  $\tau_1=68.22 \mu s$  et  $\tau_2=0.405 \mu s$ .

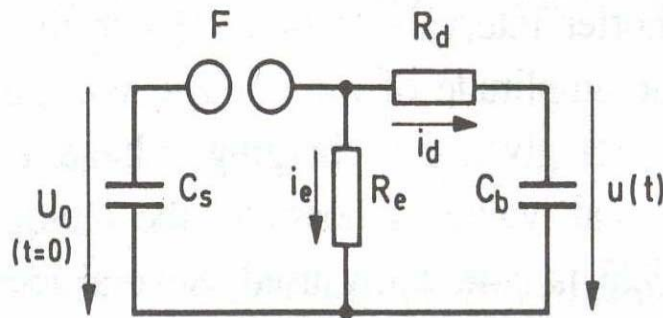


Figure 18 : Génération capacitive de la tension de choc de foudre.

Dans ce schéma, l'amplitude de la tension  $u(t)$  ne peut être augmentée que par un accroissement de l'espacement des sphères de l'éclateur  $F$ . Augmenter la tension continue  $U_0$  résulterait simplement en une charge plus rapide de la capacité  $C_s$ .

Dans le but d'obtenir une amplitude de la tension  $u(t)$  la plus élevée possible, pour une tension continue donnée, E. Marx a proposé en 1923 un circuit multiplicateur très utilisé de nos jours.

### 3.3.1.2. Le générateur de MARX

La figure 19, ci-dessous, montre le schéma d'un générateur de Marx à trois étages.

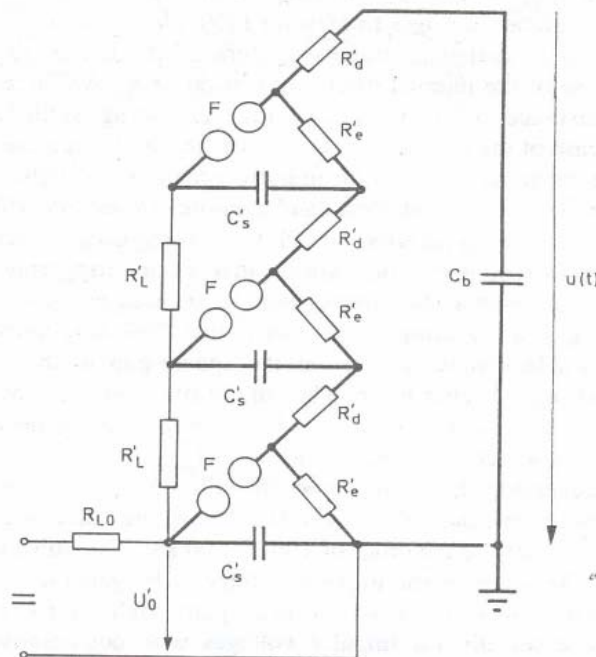


Figure 19 : Schéma d'un générateur de Marx à 3 étages.

Plusieurs capacités identiques sont chargées en parallèle et ensuite déchargées en séries, obtenant ainsi une tension de charge totale multipliée, correspondant au nombre d'étages.

Les capacités des étages  $C_s'$  sont chargées à la tension de charge de l'étage  $U_0'$ , via la résistance de charge élevée  $R_L'$  en parallèle.

Le circuit à  $n$  étages peut être réduit à un simple circuit équivalent à un étage où les relations suivantes sont valables :

$$U_0 = nU'_0 \quad (31)$$

$$R_d = nR'_d \quad (32)$$

$$C_s = \frac{1}{n}C'_s \quad (33)$$

$$R_e = nR'_e \quad (34)$$

Les caractéristiques du générateur de Marx utilisé sont :

- Capacité de charge  $Cs'$  : 150 nF ;
- Résistance de charge  $R_L'$  : 16 k $\Omega$  ;
- Résistance de front  $Rd'$  : 14.5 k $\Omega$  ;
- Résistance de queue  $Re'$  : 550  $\Omega$

L'annexe page 125 montre une photographie du générateur utilisé.

### 3.4. Stratégie d'essais

On appelle *stratégie d'essais* la procédure d'essais choisie en vue de l'évaluation statistique des résultats. En effet, la tenue diélectrique d'un système électrique a un caractère aléatoire. En d'autres termes, il n'existe pas de valeur exacte de la tension au-dessus ou au-dessous de laquelle on aura la certitude d'amorcer ou de tenir la contrainte mais dans toute une plage de tension où le système aura une probabilité d'amorçage  $p$ .

### 3.4.1. Classification des procédures d'essais

Dans la norme CEI60-1, on distingue trois classes de procédures.

- Classe 1 : Méthode des paliers multiples

Un essai de classe 1 consiste en l'application à chacun des  $n$  paliers de tension  $U_i$  ( $i=1, 2, \dots, n$ ) de  $m_i$  tensions sensiblement égales. Ceci s'applique généralement aux essais de choc, mais certains essais sous tension alternative ou continue font aussi partie de cette classe.

Les résultats d'essais sont les  $n$  nombres d'applications de tension  $m_i$  et les nombres correspondants de décharges disruptives  $d_i$  à chaque palier de tension  $U_i$ .

- Classe 2 : Essais de montée et descente

Un essai de classe 2 consiste en l'application de  $n$  groupes de  $m$  tensions sensiblement égales à un niveau de tension  $U_i$ . Le niveau de chaque groupe est augmenté ou diminué d'une faible quantité  $\Delta U$  donnée, par rapport au niveau précédent en fonction du résultat du précédent groupe d'applications de tension.

- Classe 3 : Méthode des décharges

Un essai de Classe 3 consiste en  $n$  répétitions d'une procédure conduisant à une décharge disruptive de l'objet en essai. La décharge disruptive peut être obtenue par une application continue de tensions croissantes, ou en conservant la tension jusqu'à l'obtention de la décharge disruptive. Les résultats sont traduits sous la forme de  $n$  valeurs de tension  $U_i$  ou temps  $t_i$  correspondant à l'apparition de la décharge disruptive.

### 3.4.2. Analyses des résultats d'essais

- Résultats des essais de Classe 1

Dans ce cas, la fréquence de décharge disruptive  $f_i = \frac{d_i}{m_i}$  au niveau de tension  $U_i$  est prise comme estimateur de la probabilité  $p(U_i)$  de décharge disruptive à ce niveau. Les  $n$  estimateurs de  $p(U_i)$  obtenus dans un essai de Classe 1 peuvent être ajustés à une fonction présumée  $p(U)$  de distribution de probabilité et les paramètres  $U_{50}$  et  $z$  déterminés.

Ceci peut être réalisé en portant  $f_i$  en fonction de  $U_i$  sur un papier graphique spécial qui donne une ligne droite quand les estimateurs de la probabilité obéissent à une fonction donnée  $p(U)$  de distribution de probabilité. Un exemple bien connu est celui du papier gauss-arithmétique, destiné à la Loi Normale, qui conduit à un tracé rectiligne quand les estimateurs répondent à la fonction de Gauss.

La détermination analytique peut également être réalisée par la méthode des moindres carrés ou du maximum de vraisemblance, ces méthodes conduisant à l'estimation des paramètres  $U_{50}$  et  $z$ .

- Résultats des essais de Classe 2

Un essai de Classe 2 conduit à un estimateur  $U_p$ ; la valeur de la tension de décharge correspondant à une probabilité de décharge  $p$ . L'estimateur,  $U_p^*$  de  $U_p$ , est donné par :

$$U_p^* = \sum \frac{k_i U_i}{n} \quad (35)$$

Où  $k_i$  est le nombre de groupes de tensions appliquées au niveau  $U_i$ .

Pour éviter des erreurs importantes, la valeur de niveau le plus bas considéré ne doit pas différer de  $U_p^*$  de plus de  $2 \Delta U$ .

- Résultats des essais de Classe 3

Le résultat d'un essai de Classe 3 est en général une série de  $n$  tensions  $U_i$  à partir de laquelle on peut déterminer les paramètres  $U_{50}$  et  $z$  d'une fonction de probabilité de décharge

disruptive. Pour une distribution gaussienne (ou normale), les estimateurs des paramètres  $U_{50}$  et  $z$  sont donnés par :

$$U_{50}^* = \sum \frac{U_i}{n} \quad (36)$$

$$z^* = \left[ \frac{\sum (U_i - U_{50}^*)^2}{n-1} \right]^{1/2} \quad (37)$$

### 3.4.3. Stratégie d'essais choisie

La stratégie d'essais choisie correspond à un essai de Classe 3. Il s'agit donc de  $n$  répétitions d'une procédure conduisant à une décharge disruptive de l'échantillon. En l'occurrence, la procédure est la suivante (voir aussi figure 20 ci-dessous) :

- Pour chaque échantillon, le niveau de tension du premier choc appliqué  $U_0$  correspond à environ 50 % de la tension d'amorçage théorique du gaz testé.
- Le niveau des chocs suivants est augmenté d'un palier  $\Delta V$  jusqu'au claquage avec un temps d'attente entre chocs d'environ 50 s.
- Une fois le claquage survenu au niveau  $U_n$ , l'échantillon est retiré à l'aide du vérin.
- On actionne ensuite le vérin suivant et l'on reproduit la procédure pour le nouvel échantillon.

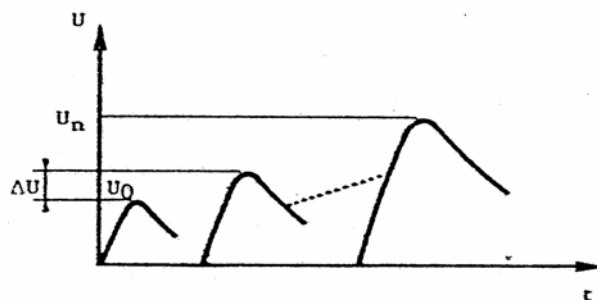


Figure 20 : Procédure d'essais.



## 3.5. Matériaux et contrôle

### 3.5.1. Réalisation du revêtement

Le revêtement a été réalisé à base de silicone isolant vulcanisé à chaud (EVC). Le procédé de mise en œuvre utilisé est le moulage par compression puis montée en température.

La réalisation se déroule en deux étapes.

- Première étape : réalisation de la sous-couche MSC (figure 22-a)

On mélange le silicone isolant avec du noir de carbone conducteur (diamètre des grains compris entre 3 et 5  $\mu\text{m}$ ). On applique, ensuite, un primaire d'adhérence (silane) sur l'électrode support préalablement dégraissée. Le dépôt est ensuite séché pendant une heure.

Cette électrode est ensuite placée dans un moule (figure 21) et constitue elle même le contre moule.

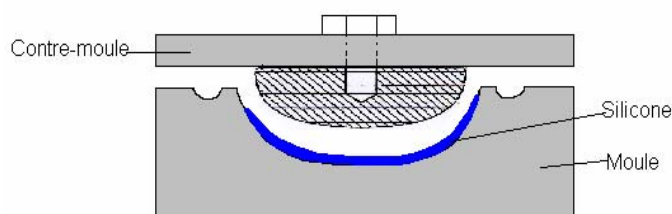


Figure 21 : Croquis du moule utilisé pour la réalisation du revêtement.

Le mélange silicone - noir de carbone est injecté dans le moule. Le revêtement est obtenu en comprimant la matière et en portant la température à 165 °C. L'électrode est ensuite retirée à l'aide de TEFLON qui sert d'agent de démoulage.

- Deuxième étape : réalisation de la couche BIP (figure 22-b)

La couche BIP, constituée du silicone isolant EVC, est moulée par dessus la sous-couche MSC toujours selon le même procédé de moulage.



a) Application de la sous-couche MSC.



b) Application de la couche BIP.

Figure 22 : Réalisation du revêtement.

## 3.5.2. Caractérisation électrique

### 3.5.2.1. Quelques définitions

- Le claquage électrique

Perte importante des propriétés isolantes des éprouvettes lorsque exposées à des contraintes électriques, provoquant dans le circuit d'essai le courant suffisant pour déclencher un disjoncteur approprié (CEI60243-1).

- Le contournement

Perte des propriétés isolantes du gaz ou du milieu liquide environnant une éprouvette et les électrodes lorsque exposées à des contraintes électriques, provoquant dans le circuit d'essai le courant suffisant pour faire déclencher un disjoncteur approprié (CEI60243-1).

- La tension de claquage ( $V_{BD}$ )

(Pour les essais avec augmentation continue de tension) Tension pour laquelle une éprouvette subit le claquage dans les conditions d'essai prescrites. (Pour les essais par paliers) Tension la plus élevée qu'une éprouvette supporte sans claquer pendant la durée et pour le niveau de tension correspondant à cet essai (CEI60243-1).

- La rigidité diélectrique ( $E_{BD}$ )

Quotient de la tension de claquage par la distance séparant les électrodes entre lesquelles est appliquée la tension dans les conditions d'essai prescrites (CEI60243-1).

- La résistance volumique ( $R_v$ )

La résistivité volumique (ou transversale) est le quotient de la tension continue appliquée entre deux électrodes placées sur deux faces opposées d'une éprouvette, par le courant circulant en régime établi entre ces électrodes, à l'exclusion du courant circulant en surface et en ne tenant pas compte des phénomènes de la polarisation éventuelle des électrodes (CEI93).

- La résistivité volumique ( $\rho$ )

Quotient de l'intensité du champ électrique continu par la densité du courant en régime établi dans un matériau isolant. Elle correspond pratiquement à la résistance transversale réduite à une unité de volume cubique (CEI93).

- La permittivité relative ( $\epsilon_r$ )

La permittivité relative  $\epsilon_r$  d'un isolant est le rapport  $C_x$  d'un condensateur, dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité  $C_0$  de la même disposition dans le vide :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (38)$$

La permittivité relative de l'air sec exempt de gaz carbonique à la pression atmosphérique normale est égale à 1.00053 de sorte qu'en pratique la capacité  $C_a$  du dispositif d'électrodes dans l'air peut être normalement utilisée au lieu de  $C_0$  pour déterminer la permittivité relative  $\epsilon_r$  avec une précision suffisante (CEI250). Dans le cas des diélectriques réels (donc imparfaits), on définit la permittivité relative complexe  $\epsilon_r^*$ . Cette notion permet d'analyser le défaut de quadrature entre le courant et la tension aux bornes d'un condensateur et donc d'introduire des pertes diélectriques :

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (39)$$

- L'angle de perte  $\delta$

L'angle de perte  $\delta$  d'un isolant est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte lorsque le diélectrique du condensateur se compose exclusivement du matériau isolant (CEI250).

- Le facteur de perte  $\text{tg}(\delta)$

Le facteur de perte  $\text{tg}(\delta)$  ou facteur de dissipation d'un isolant est la tangente de l'angle de perte  $\delta$  (CEI250). Il est aussi égal à  $\frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$ .

### 3.5.2.2. Les éprouvettes

Deux types d'éprouvettes ont été réalisés :

- Type 1 : sous-couche MSC, épaisseur environ 0.39 mm ;
- Type 2 : couche BIP, épaisseur environ 1.74 mm.

Les différentes couches ont été moulées sur des plaques support de 200\*200\*1 mm en inox.

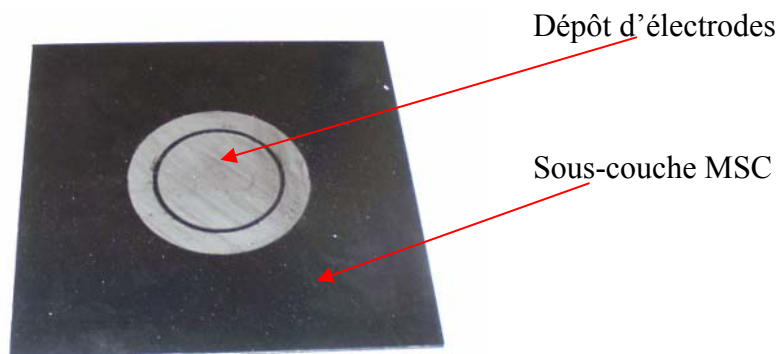


Figure 23 : Exemple d'éprouvette MSC.

### 3.5.2.3. Caractérisation de la couche BIP

#### 3.5.2.3.1. Mesure de la rigidité diélectrique ( $E_{BD}$ )

- Principe

On mesure la tension de claquage  $V_{BD}$  en utilisant la méthode de montée en tension par palier. Par définition, la rigidité diélectrique est le rapport entre la tension de claquage et l'épaisseur de l'isolant.

- Conditions expérimentales

L'éprouvette est placée entre deux électrodes ; une sous tension et l'autre à la masse (figure 24). La tension appliquée est une tension alternative de fréquence 50 Hz. Afin d'éviter les contournements dans l'air, les essais ont été réalisés en immergeant les éprouvettes dans une huile silicone isolante dont la tenue diélectrique est plus élevée que celle de l'air.

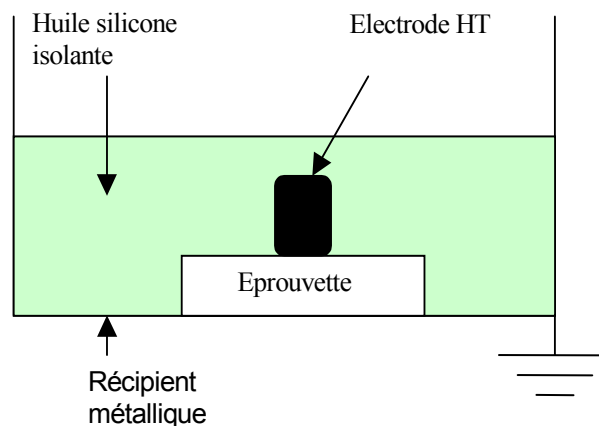


Figure 24 : Mesure de la rigidité diélectrique de la couche BIP.

- Mode opératoire (figure 25)

On détermine au préalable l'ordre de grandeur de la tension de claquage  $V'$  avec éprouvette qui ne sera pas prise en compte en appliquant une rampe de tension de 2 kV/s jusqu'au claquage. Pour l'éprouvette à tester, on applique la méthode de montée en tension par palier à partir d'un niveau  $V_0$  correspondant à 40 % environ de  $V'$ , avec une rampe de 2 kV/s jusqu'au claquage. Chaque palier de tension est maintenu pendant 20 s.

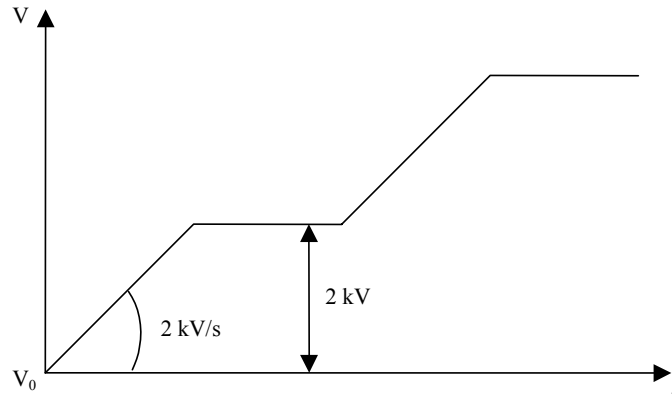


Figure 25 : Méthode des paliers de tension pour la mesure de la rigidité diélectrique..

o Résultats

Le tableau 3, ci-dessous, donne les résultats de mesures de la rigidité diélectrique de la couche BIP.

Epreuve N°1					
Tension de claquage (kV)		Tension de claquage moyenne (kV)	Ecart-type ( $\sigma$ )	$\sigma$ (%)	Rigidité moyenne (kV/mm)
Vbd1	27.6	27.5	0.4	1.4	15.8
Vbd2	28.1				
Vbd3	27.2				
Vbd4	27.2				
Vbd5	27.2				
Epreuve N°2					
Tension de claquage (kV)		Tension de claquage moyenne (kV)	Ecart-type ( $\sigma$ )	$\sigma$ (%)	Rigidité moyenne (kV/mm)
Vbd1	25.17	25.9	1.0	1.4	14.9
Vbd2	25.21				
Vbd3	26.63				
Vbd4	27.19				
Vbd5	25.21				

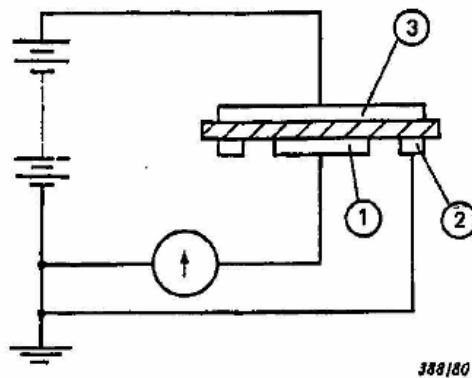
Tableau 3 : Détermination de la rigidité diélectrique de la couche BIP.

La rigidité diélectrique de la couche BIP pour une tension alternative 50 Hz et une épaisseur de 1.74 mm est d'environ 15 kV/mm.

3.5.2.3.2. Mesure de la résistivité volumique ( $\rho$ )

## o Principe

On détermine la résistance volumique  $R_v$  en mesurant le courant transversal selon le schéma de principe donné figure 26. L'éprouvette est placée entre deux électrodes cylindriques. Une des électrodes est mise à la terre (1) tandis que l'autre est mise sous tension (3). Pour s'affranchir des courants de surface, on utilise une troisième électrode de garde (2).



1 : Electrode gardée

2 : Electrode de garde

3 : Electrode haute tension.

Figure 26 : Principe de mesure de la résistivité volumique de la couche BIP.

Pour améliorer le contact entre les électrodes et les revêtements, un dépôt de peinture conductrice a été réalisé.

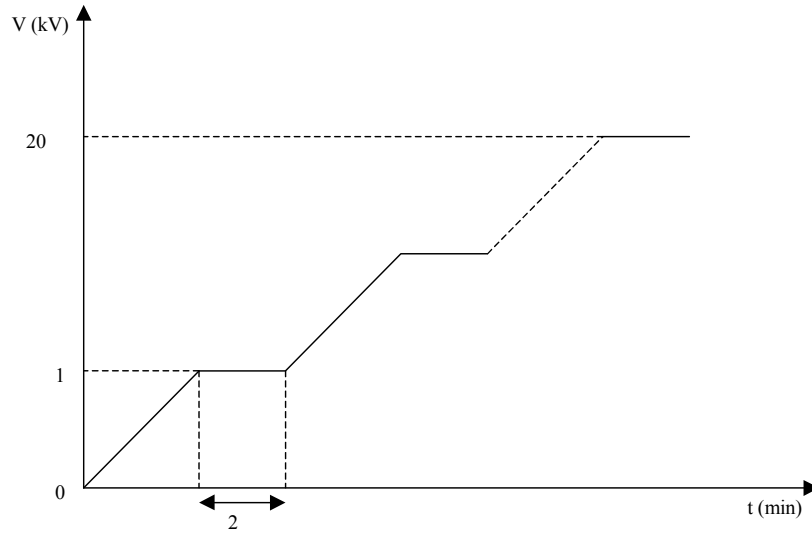
La résistivité volumique est donnée par la relation :

$$\rho = R_v \frac{S}{e} \quad (40)$$

$S$  est la surface de l'électrode gardée et  $e$  l'épaisseur de l'échantillon.

- Mode opératoire

Le mode opératoire est décrit sur la figure 27 :



*Figure 27 : Mode opératoire pour la mesure de résistivité volumique.*

La tension est augmentée progressivement de 0 à 20 kV par palier de 1 kV (chaque palier ayant une durée de 2 min).

- Résultats

Le tableau 4 montre les résultats obtenus pour deux éprouvettes à 25 et 90 °C. La figure 28 montre l'évolution de la résistivité volumique en fonction du électrique appliqué.



		Eprouvette n°1						Eprouvette n°2					
		25 °C			90 °C			25 °C			90 °C		
V (V)	E (kV/mm)	I (A)	R (Ω)	$\rho_v$ (Ω*m)	I (A)	R (Ω)	$\rho_v$ (Ω*m)	I (A)	R (Ω)	$\rho_v$ (Ω*m)	I (A)	R (Ω)	$\rho_v$ (Ω*m)
1,0,E+03	0,57	1,30E-11	7,69E+13	1,29E+14	1,60E-10	6,25E+12	1,05E+13	1,20E-11	8,3E+13	1,40E+14	1,20E-10	8,33E+12	1,40E+13
2,0,E+03	1,15	2,00E-11	1,00E+14	1,68E+14	3,00E-10	6,67E+12	1,12E+13	2,00E-11	1,0E+14	1,68E+14	4,00E-10	5,00E+12	8,39E+12
3,0,E+03	1,72	2,70E-11	1,11E+14	1,87E+14	8,00E-10	3,75E+12	6,30E+12	2,50E-11	1,2E+14	2,01E+14	8,00E-10	3,75E+12	6,30E+12
4,0,E+03	2,30	3,50E-11	1,14E+14	1,92E+14	1,10E-09	3,64E+12	6,10E+12	2,50E-11	1,6E+14	2,69E+14	1,20E-09	3,33E+12	5,60E+12
5,0,E+03	2,87	6,00E-11	8,33E+13	1,40E+14	1,40E-09	3,57E+12	6,00E+12	3,60E-11	1,4E+14	2,33E+14	1,50E-09	3,33E+12	5,60E+12
6,0,E+03	3,45	6,00E-11	1,00E+14	1,68E+14	1,80E-09	3,33E+12	5,60E+12	4,40E-11	1,4E+14	2,29E+14	1,80E-09	3,33E+12	5,60E+12
7,0,E+03	4,02	8,00E-11	8,75E+13	1,47E+14	2,20E-09	3,18E+12	5,34E+12	6,00E-11	1,2E+14	1,96E+14	2,20E-09	3,18E+12	5,34E+12
8,0,E+03	4,60	1,00E-10	8,00E+13	1,34E+14	2,50E-09	3,20E+12	5,37E+12	6,00E-11	1,3E+14	2,24E+14	2,60E-09	3,08E+12	5,17E+12
9,0,E+03	5,17	1,10E-10	8,18E+13	1,37E+14	3,00E-09	3,00E+12	5,04E+12	9,00E-11	1,0E+14	1,68E+14	3,10E-09	2,90E+12	4,87E+12
1,0,E+04	5,75	1,20E-10	8,33E+13	1,40E+14	3,40E-09	2,94E+12	4,94E+12	1,00E-10	1,0E+14	1,68E+14	3,50E-09	2,86E+12	4,80E+12
1,1,E+04	6,32	1,50E-10	7,33E+13	1,23E+14	3,90E-09	2,82E+12	4,73E+12	3,60E-10	3,1E+13	5,13E+13	4,00E-09	2,75E+12	4,62E+12
1,2,E+04	6,90	1,80E-10	6,67E+13	1,12E+14	4,40E-09	2,73E+12	4,58E+12	6,00E-10	2,0E+13	3,36E+13	6,00E-09	2,00E+12	3,36E+12
1,3,E+04	7,47	2,00E-10	6,50E+13	1,09E+14	6,00E-09	2,17E+12	3,64E+12	1,00E-09	1,3E+13	2,18E+13	6,00E-09	2,17E+12	3,64E+12
1,4,E+04	8,05	2,40E-10	5,83E+13	9,79E+13	7,00E-09	2,00E+12	3,36E+12	1,30E-09	1,1E+13	1,81E+13	7,00E-09	2,00E+12	3,36E+12
1,5,E+04	8,62	2,70E-10	5,56E+13	9,33E+13	8,00E-09	1,88E+12	3,15E+12	1,60E-09	9,4E+12	1,57E+13	8,00E-09	1,88E+12	3,15E+12
1,6,E+04	9,20	3,20E-10	5,00E+13	8,39E+13	9,00E-09	1,78E+12	2,98E+12	1,80E-09	8,9E+12	1,49E+13	6,00E-07	2,67E+10	4,48E+10
1,7,E+04	9,77	3,60E-10	4,72E+13	7,93E+13	4,00E-07	4,25E+10	7,13E+10	2,10E-09	8,1E+12	1,36E+13	1,20E-06	1,42E+10	2,38E+10
1,8,E+04	10,34	4,10E-10	4,39E+13	7,37E+13	1,00E-06	1,80E+10	3,02E+10	2,40E-09	7,5E+12	1,26E+13	2,00E-06	9,00E+09	1,51E+10
1,9,E+04	10,92	5,00E-10	3,80E+13	6,38E+13	1,80E-06	1,06E+10	1,77E+10	2,50E-09	7,6E+12	1,28E+13	2,60E-06	7,31E+09	1,23E+10
2,0,E+04	11,49	1,60E-07	1,25E+11	2,10E+11	2,20E-06	9,09E+09	1,53E+10	1,60E-07	1,3E+11	2,10E+11	3,00E-06	6,67E+09	1,12E+10

Tableau 4 : Détermination de la résistivité volumique de la couche BIP.

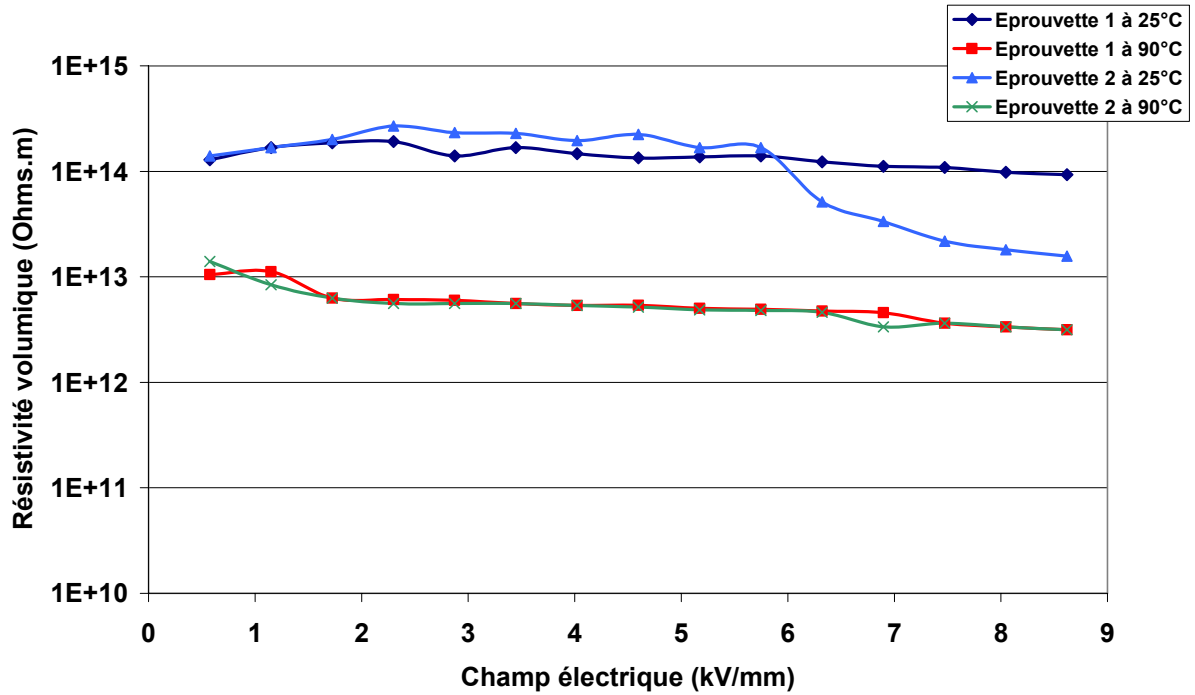


Figure 28 : Résistivité volumique de la couche isolante BIP en fonction du champ électrique.

La résistivité volumique de la couche BIP est de l'ordre de  $10^{14} \Omega.m$  à  $25^\circ C$  et diminue avec la température. Cette diminution s'explique par la relation qui lie la résistivité volumique à la température :

$$\rho = \rho_0 \exp\left(\frac{E_A}{kT}\right) \quad (41)$$

Avec  $E_A$  l'énergie d'activation (eV),  $k$  la constante de Boltzman et  $T$  la température absolue (K). Cette relation est une fonction décroissante avec la température.

3.5.2.3.3. Mesure de la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) / facteur de perte  $\text{tg}(\delta)$

- Matériel utilisé

Les essais ont été réalisés sur un banc de mesure BDS40 de chez NOVOCONTROL basé sur la méthode de mesure de phase et d'atténuation.

- Résultats

Les résultats sont donnés dans le tableau 5, ci-dessous.

Température (°C)	25		40	
f (Hz)	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$
1,00E+00	3,581	1,29E-03	3,528	1,20E-03
1,00E+01	3,590	1,34E-03	3,529	1,41E-03
5,00E+01	3,601	2,09E-03	3,534	2,25E-03
1,00E+02	3,617	2,78E-03	3,545	2,90E-03
1,00E+03	3,623	2,89E-03	3,546	3,19E-03
1,00E+04	3,636	3,25E-03	3,554	3,40E-03
1,00E+05	3,657	4,60E-03	3,569	6,02E-03
Température (°C)	50		60	
f (Hz)	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$
1,00E+00	3,457	1,13E-03	3,396	1,11E-03
1,00E+01	3,459	1,54E-03	3,398	1,66E-03
5,00E+01	3,466	2,42E-03	3,405	2,55E-03
1,00E+02	3,477	2,93E-03	3,417	3,08E-03
1,00E+03	3,479	2,83E-03	3,418	3,31E-03
1,00E+04	3,488	3,86E-03	3,429	4,64E-03
1,00E+05	3,507	8,56E-03	3,454	1,25E-02
Température (°C)	70		85	
f (Hz)	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$	$\epsilon_r$	$\text{tg}(\delta)$
1,00E+00	3,335	1,12E-03	3,255	1,13E-03
1,00E+01	3,338	1,76E-03	3,257	1,85E-03
5,00E+01	3,346	2,62E-03	3,264	2,69E-03
1,00E+02	3,357	3,12E-03	3,275	3,73E-03
1,00E+03	3,359	3,46E-03	3,278	4,27E-03
1,00E+04	3,371	5,83E-03	3,291	8,86E-03
1,00E+05	3,403	1,91E-02	3,344	3,61E-02

Tableau 5 : Détermination de la permittivité relative et du facteur de perte de la couche BIP.

Les figures 29 et 30 montrent l'évolution de respectivement la permittivité relative et du facteur de perte en fonction de la fréquence pour différentes températures.

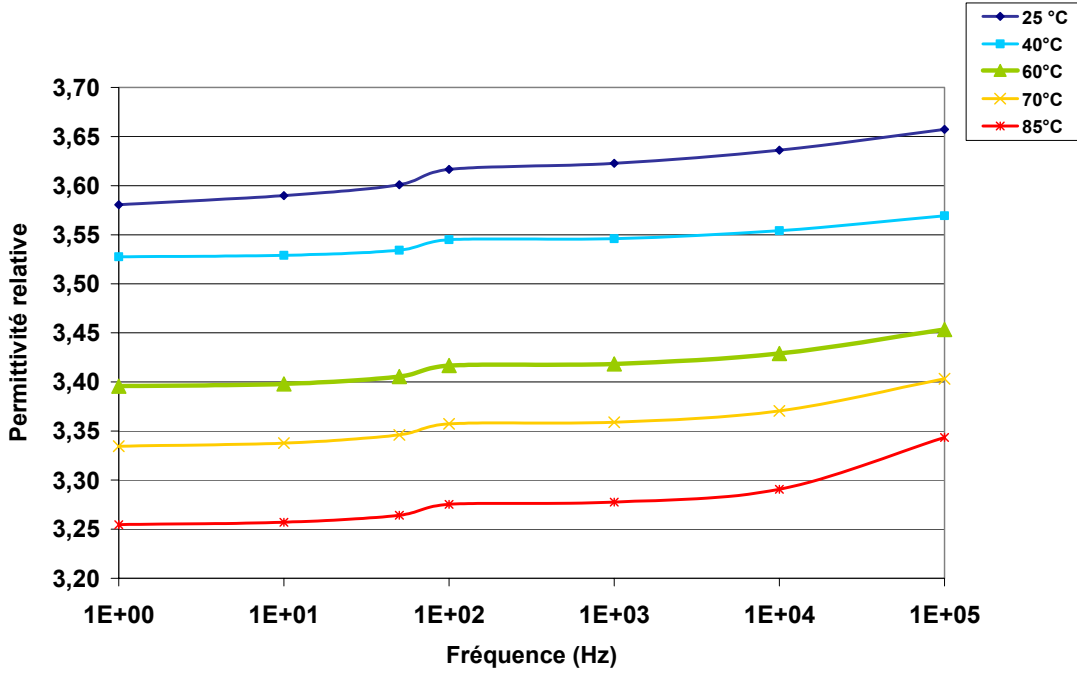


Figure 29 : Permittivité relative de la couche isolante BIP en fonction de la fréquence.

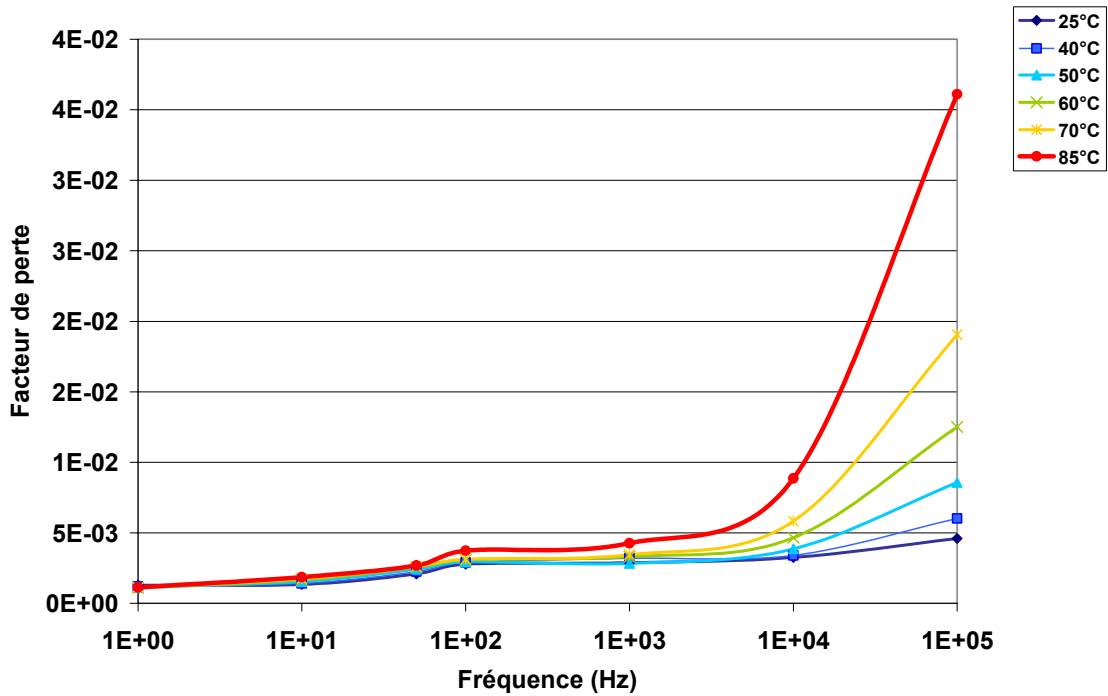


Figure 30 : Facteur de perte de la couche isolante BIP en fonction de la fréquence.

L'écart  $\Delta$  entre la valeur de la permittivité relative à 100 kHz et 1 Hz est de 0.076 à 25 °C. On peut dire que, sur cette gamme de fréquence, la permittivité relative est quasi constante. Ceci est valable pour les autres températures (40, 60, 70 et 85 °C). On peut, toutefois, noter un léger *décollement* de la permittivité à partir de 10 kHz. Ce phénomène s'accroît avec la température.

La permittivité relative diminue avec la température. A 50 Hz, elle passe de 3.6 environ pour 25 °C, à 3.26 environ pour 85 °C soit une diminution de 10 %. Une explication à ce phénomène pourrait être la dilatation du silicone avec la température due à un coefficient de dilatation important. En effet, la valeur  $C_x$  de la capacité mesurée est inversement proportionnelle à l'épaisseur du diélectrique.

Pour une fréquence proche de 50 Hz, le facteur de perte est de l'ordre de  $2 \cdot 10^{-3}$  à 25 °C. Il augmente légèrement avec la température ( $2.7 \cdot 10^{-3}$  à 85 °C). On remarque aussi un pic de perte à partir de 10 kHz.

### 3.5.2.4. Caractérisation de la sous-couche MSC

Pour cette sous-couche, la caractéristique la plus important est la résistivité volumique. Celle-ci a été mesurée selon le même principe et mode opératoire que pour la couche BIP (§3.5.2.3.2).

#### ○ Résultats

Les résultats de mesures sont donnés dans le tableau 6. La figure 31 montre l'évolution de la résistivité de la sous-couche en fonction du champ électrique appliqué.

<b>Résistivité volumique de la sous-couche MSC</b>			
<b>E (V/mm)</b>	<b>I (A)</b>	<b>R (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>\rho_v</math> (<math>\Omega \cdot m</math>)</b>
0.287	2.78E-02	17.9	135
0.575	5.30E-02	18.9	141
0.862	8.50E-02	17.6	132
1.149	1.10E-01	18.2	136
1.437	1.40E-01	17.9	134
1.724	1.72E-01	17.4	130
2.011	2.06E-01	16.9	127
2.299	2.38E-01	16.8	126
2.586	2.71E-01	16.6	124
2.874	3.15E-01	15.9	119
3.161	3.54E-01	15.5	116
3.448	3.97E-01	15.1	113
3.736	9.40E-01	6.90	51.7
4.023	1.06E+00	6.60	49.4
4.310	1.23E+00	6.10	45.6
4.598	1.36E+00	5.88	44.04
4.885	1.50E+00	5.67	42.4
5.172	1.69E+00	5.33	39.9
5.460	1.84E+00	5.16	38.7
5.747	1.96E+00	5.10	38.2

Tableau 6 : Détermination de la résistivité volumique de la sous-couche MSC.

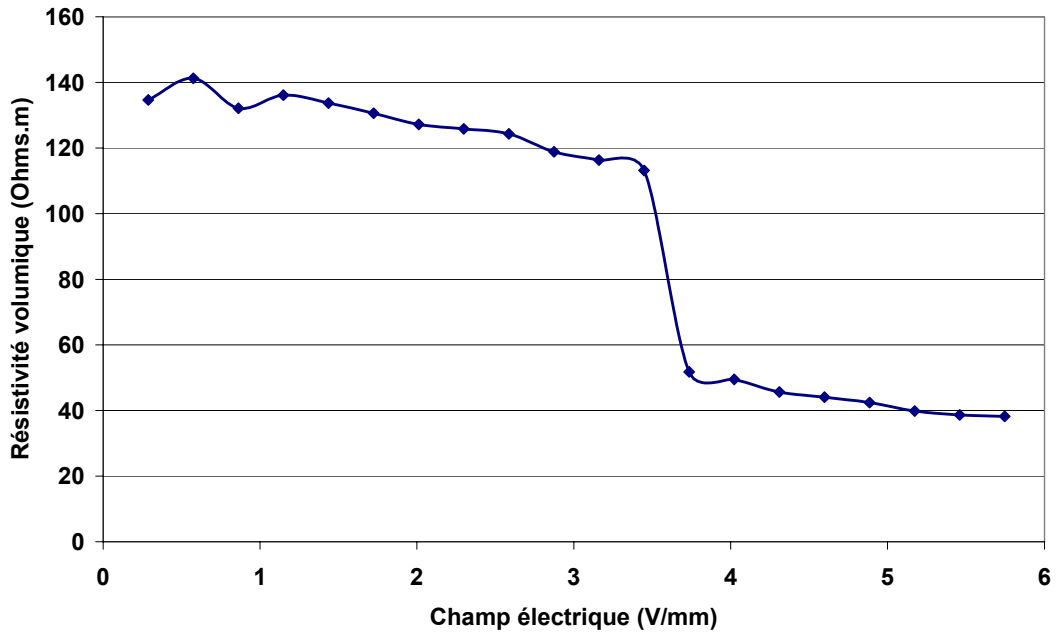


Figure 31 : Résistivité volumique de la sous-couche MSC en fonction du gradient électrique appliqué.

La résistivité volumique de la sous-couche MSC est comprise entre 40 et 140  $\Omega$ .m. C'est donc un matériau semi-conducteur. On peut aussi noter une chute de la résistivité volumique à partir d'un champ électrique de l'ordre de 3.5 V/mm.

### 3.6. Essais préliminaires

Pour ce qui est de la configuration des électrodes de tests, l'idéal serait que chaque type de revêtement soit appliqué sur l'électrode haute tension, puis sur l'électrode côté masse et enfin sur les deux électrodes. Cependant, pour des raisons évidentes de coût (la réalisation des revêtements et les essais haute tension étant très onéreux) nous avons procédé à des essais préliminaires afin de déterminer la configuration qui donne les meilleurs résultats quant à l'amélioration de la tenue diélectrique du système. Ces essais ont été réalisés selon la stratégie d'essais décrite au § 3.4.3 avec les conditions expérimentales suivantes :

- Gaz : SF<sub>6</sub> et N<sub>2</sub> ;
- Pression : 0.4 MPa ;
- Tension de choc de foudre (polarité positive et négative) ;

Les configurations testées sont représentées sur la figure 32 ci-dessous. Afin de comparer la tenue diélectrique du système avec et sans revêtement, nous avons effectué des tests "électrodes nues" (configurations A1, A2) avec des distances inter-électrodes "métal – métal" équivalentes aux configurations avec revêtement (B1, B2 et B3).

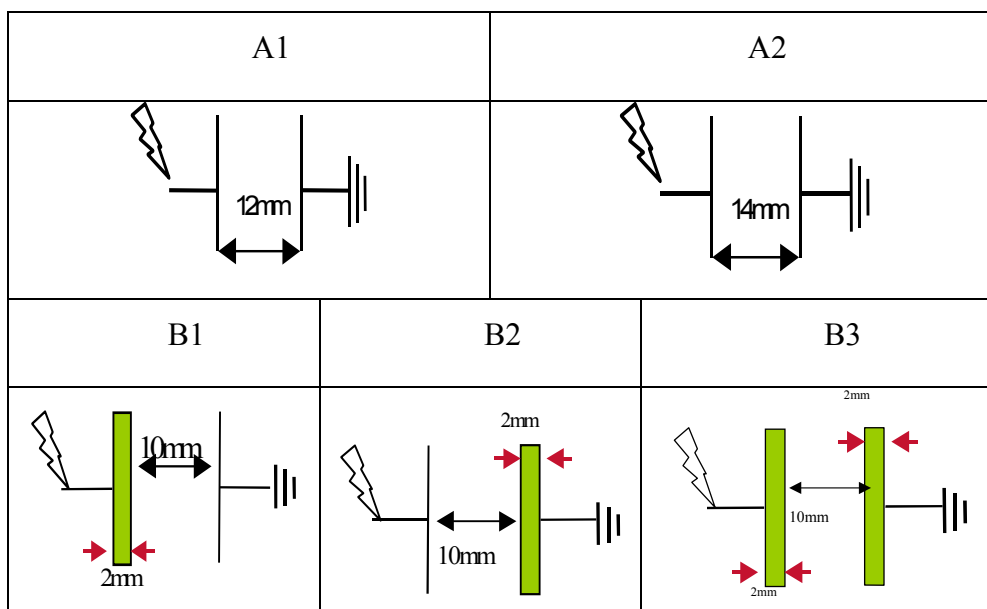


Figure 32 : Configurations testées lors des essais préliminaires.



La tenue diélectrique est donnée par la relation suivante :

$$E_{BD} = \frac{V_{BD}}{d_m} \quad (42)$$

Avec  $E_{BD}$  le champ électrique de claquage moyen du système en kV/mm,  $V_{BD}$  la tension de claquage moyenne en kV et  $d_m$  la distance inter-électrodes "métal – métal" en mm.

### 3.6.1. Résultats des essais

Les résultats de ces essais préliminaires sont donnés dans le tableau 7, ci-dessous.

Gaz	Polarité de la tension	Configuration	Tension de claquage moyenne (kV)	Champ électrique de claquage moyen du système (kV/mm)	Ecart-type (%)
N <sub>2</sub>	Positive	A1	163.8	13.7	12.3
		A2	179.6	12.8	7.6
		B1	207.5	17.3	3.9
		B2	223.3	18.6	3.1
		B3	231.6	16.6	11.9
	Négative	A1	164.2	13.7	8.7
		A2	207.4	14.8	5.4
		B1	199.9	16.7	14.1
		B2	204.4	17	9.8
		B3	220.5	15.8	7.6
SF <sub>6</sub>	Positive	A1	349.1	29.1	4.7
		A2	371.5	26.5	3.7
		B1	292.1	24.3	8.4
		B2	344.3	28.7	2.5
		B3	361.3	25.8	0.7
	Négative	A1	390.5	32.5	7.5
		A2	452.6	32.3	5.1
		B1	381	31.7	4.2
		B2	284.8	23.7	9.8
		B3	400.6	28.6	3.9

Tableau 7 : Résultats des essais préliminaires.

Si l'on trace le champ électrique de claquage moyen du système en fonction de la distance inter-électrodes "métal – métal" avec une précision d'un écart-type, on obtient les graphiques suivants :

*Pour l'azote :*

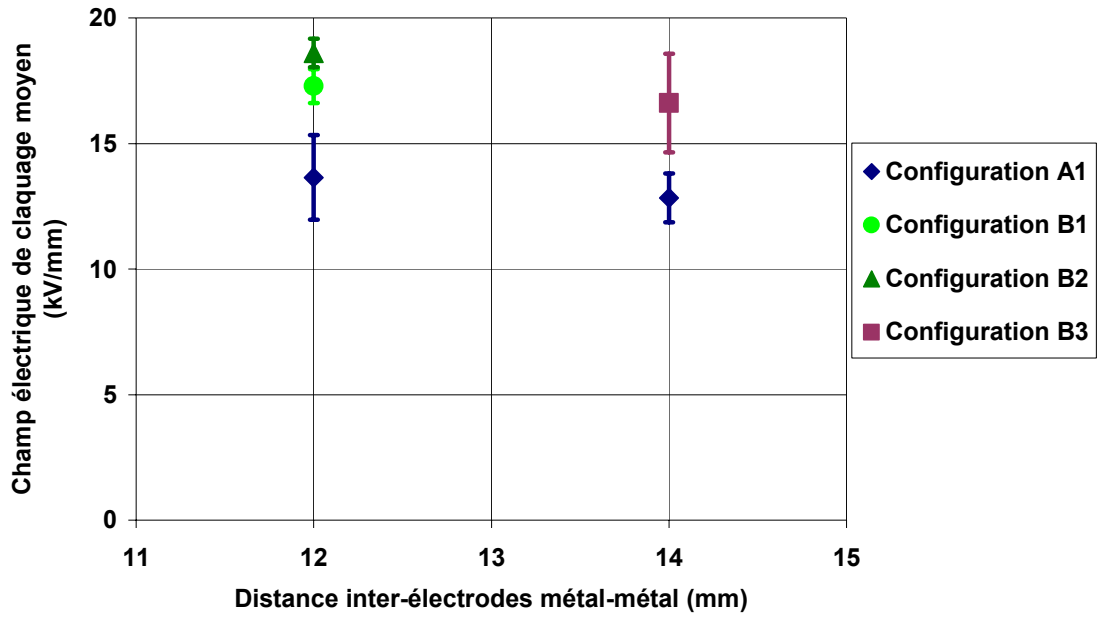


Figure 33 : Résultats des essais préliminaires pour le N<sub>2</sub> en polarité positive.

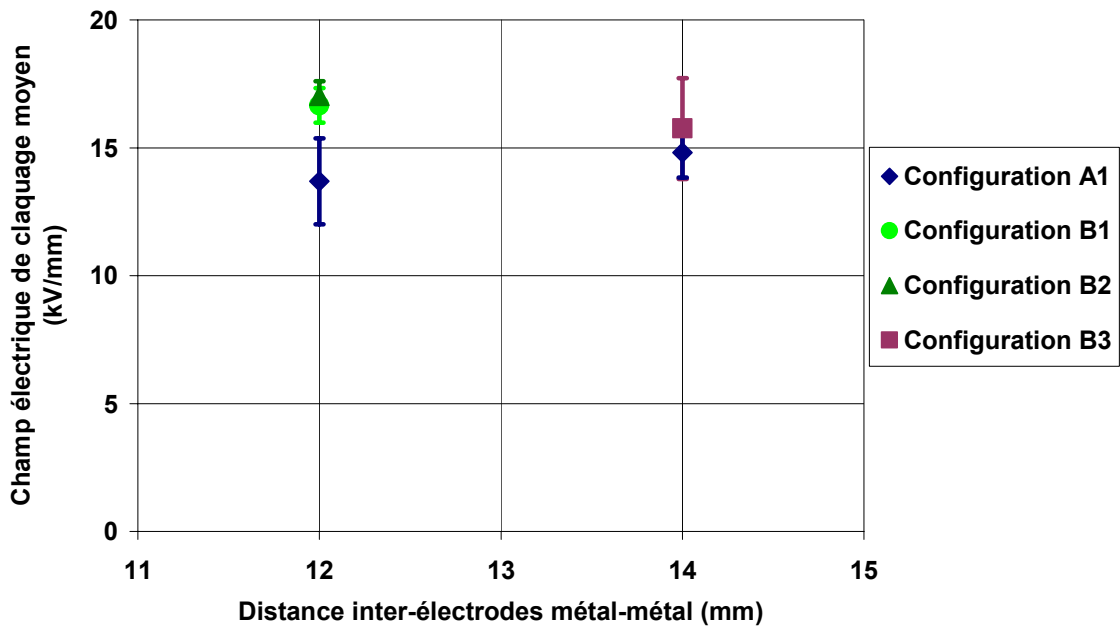


Figure 34 : Résultats des essais préliminaires pour le N<sub>2</sub> en polarité négative.

D'après les figures, ci-dessus, la configuration B2 "électrode côté masse revêtue" pour le N<sub>2</sub> semble donner le meilleur résultat.

*Pour le SF<sub>6</sub> :*

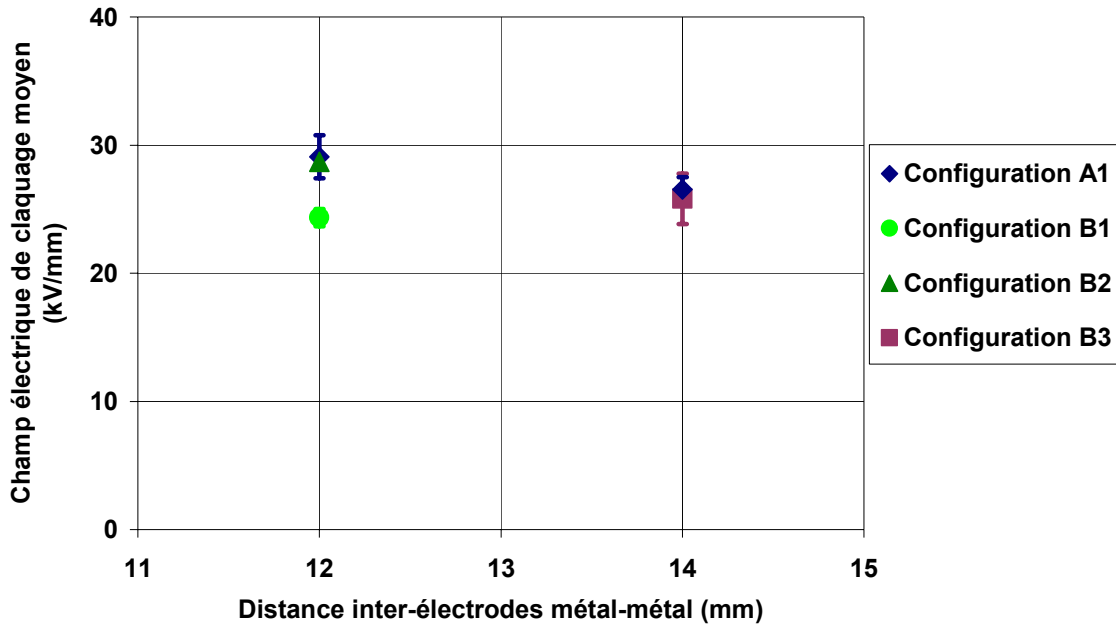


Figure 35 : Résultats des essais préliminaires pour le SF<sub>6</sub> en polarité positive.

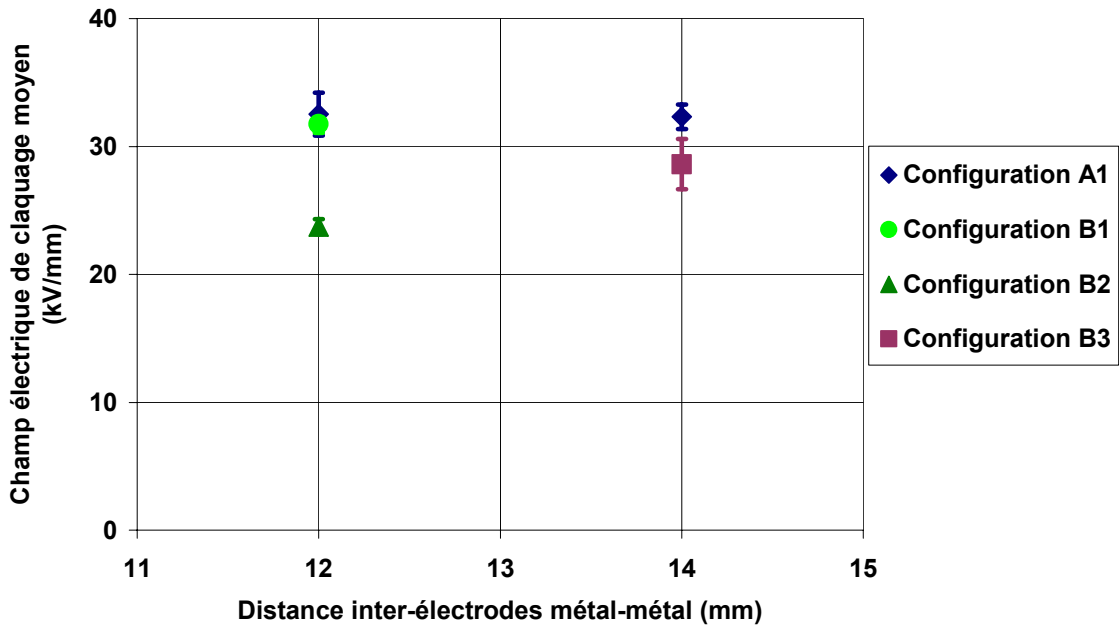


Figure 36 : Résultats des essais préliminaires pour le SF<sub>6</sub> en polarité négative.

Dans le cas du SF<sub>6</sub>, aucune des trois configurations B1, B2 ou B3 ne semble apporter une amélioration.

### 3.6.2. Conclusion des essais préliminaires

Lors de ces essais préliminaires, nous avons tenté de mettre en évidence la configuration susceptible de donner le meilleur résultat en terme d'amélioration de la tenue diélectrique du système, parmi les trois configurations possibles (revêtement appliqué sur l'électrode haute tension ou sur l'électrode côté masse ou bien sur les deux électrodes). Les résultats ont montré que le champ de claquage moyen du système en présence d'azote est amélioré lorsque le revêtement est appliqué sur l'électrode côté masse.

Nous retiendrons donc cette configuration pour l'étude diélectrique détaillée de l'isolation hybride en présence d'azote.

### 3.7. Mesure de l'humidité dans la cellule de tests

L'humidité contenue dans un gaz isolant influence la tenue diélectrique de ce gaz [32]. C'est donc un paramètre important qu'il faut être capable de mesurer. Cependant, cette mesure est assez difficile à effectuer lorsque la quantité d'humidité contenue dans le gaz est très faible (quelques dizaines voire quelques centaines de ppmV). Nous avons, par conséquent, utilisé l'appareil le mieux adapté qui est l'hygromètre à condensation dont le principe est décrit par la suite.

Nous allons, dans un premier temps, donner quelques définitions relatives à l'hygrométrie qu'il est nécessaire de connaître afin de mieux appréhender la mesure de l'humidité :

- Gaz humide

Un gaz humide est un mélange de gaz sec et de vapeur d'eau. Cette dernière étant de l'eau à l'état gazeux.

- Gaz saturé

Un gaz saturé correspond à un gaz humide, à une température et à une pression données, dont la quantité de vapeur d'eau est telle que toute quantité d'eau supplémentaire ne peut apparaître que sous forme liquide ou solide.

- Pression partielle de vapeur d'eau ( $p_v$ )

Dans un mélange de gaz parfaits, la pression totale est la somme des pressions partielles des constituants du mélange (relation de Dalton). En considérant le gaz humide comme le mélange du gaz sec et de la vapeur d'eau, on peut dire que la pression totale du gaz humide est la somme de la pression partielle du gaz sec  $p_g$  et de la pression partielle de la vapeur d'eau  $p_v$ .

$$p = p_g + p_v \quad (43)$$

- Pression de vapeur saturante - Etat de saturation

C'est la pression de vapeur dans un état d'équilibre avec une surface plane d'eau liquide ou de glace à la même température et à la même pression. En d'autres termes, c'est la valeur maximale que peut atteindre la pression partielle de la vapeur d'eau  $p_v$  à cette température. Au-delà de cette valeur, il y a condensation. On dit que l'état de saturation est atteint.

- Température de rosée  $T_d$  et température de gelée  $T_f$

Lorsqu'on refroidit le gaz humide, en maintenant le rapport de mélange constant, on atteint l'état de saturation pour une température appelée *température de rosée* ( $T_d$ ) lorsque celle-ci est supérieure à 0 °C, ou *température de gelée* ( $T_f$ ) lorsqu'elle est inférieure à 0 °C.

- Rapport de mélange

C'est le rapport  $r$  de la masse de vapeur d'eau à la masse du gaz sec porteur.

- Humidité absolue

C'est le rapport  $f$  entre la masse de vapeur d'eau et le volume total du gaz en  $\text{g/m}^3$ .

- Humidité relative (HR)

Elle est définie comme le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante.

- Concentration en volume (C)

C'est le rapport entre la pression de vapeur et la pression totale du mélange. Elle s'exprime en part par million (ppmV).

Principe de fonctionnement de l'hygromètre à condensation (figure 37) :

Le principe de fonctionnement repose sur la mesure de la température du point de rosée. Le gaz dont on veut mesurer le taux d'humidité circule au-dessus d'un miroir métallique. Ce miroir est refroidi (par une alimentation thermo-élément Peltier) jusqu'à la température à laquelle une fine pellicule de condensation commence à se former à la surface. Cette "couche" de condensation est détectée optiquement et le miroir est alors maintenu à la température très précise à laquelle la couche de condensât est stabilisée; ce qui constitue par définition la température du point de rosée. La température du miroir est mesurée à l'aide d'un thermomètre à résistance platine Pt 100.

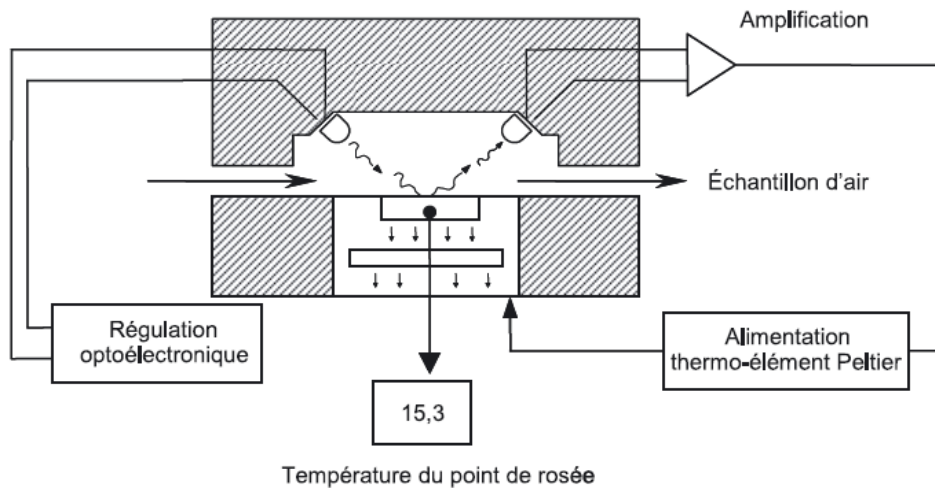


Figure 37 : Schéma de principe d'un Hygromètre à condensation.

Pour effectuer la mesure de l'humidité dans la cellule de tests, nous avons dû réaliser une boucle de régulation de la pression pour que cette dernière soit maintenue constante lors de la mesure. Pour cela, une pompe de circulation de gaz a été insérée dans la boucle. La figure 38, ci-dessous, montre le montage réalisé.

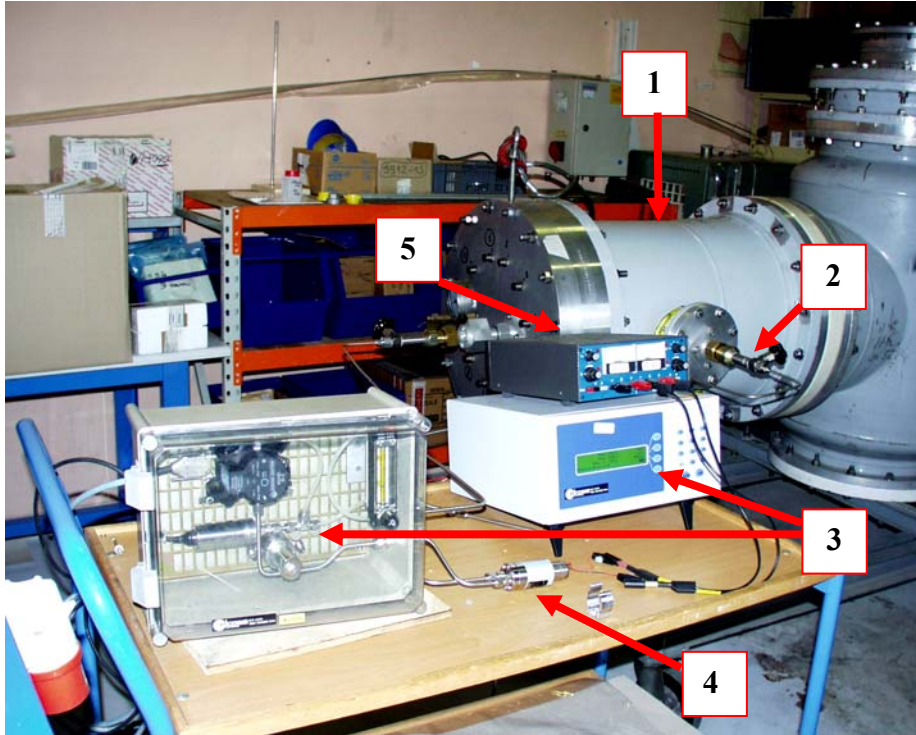


Figure 38 : Montage pour la mesure de l'humidité dans la cellule de tests.

Avec :

- (1) La cellule de tests ;
- (2) La vanne de régulation ;
- (3) La cellule et le moniteur de mesure ;
- (4) La pompe de circulation du gaz ;
- (5) L'alimentation électrique de cette pompe.

### 3.8. Conclusion

Nous venons de voir les aspects expérimentaux des essais diélectriques. Le profil des électrodes a été optimisé pour obtenir un champ électrique aussi uniforme que possible au centre de l'espace inter-électrodes en tenant compte de la géométrie de la cellule de tests. Le choix de la tension et de la stratégie d'essais est expliqué aux § 3.3 et 3.4.

Le revêtement est réalisé par moulage en compression et monté en température jusqu'à 165 °C. La résistivité volumique de la sous-couche semi-conductrice MSC est comprise entre 40 et 140  $\Omega$ .m. Les caractéristiques électriques de la couche isolante BIP sont :

- Rigidité diélectrique de 15 kV/mm pour une tension alternative 50 Hz et une épaisseur d'échantillon de 1.75 mm ;
- Résistivité volumique de  $10^{14}$   $\Omega$ .m pour une température de 25°C ;
- Permittivité relative de 3.6 pour une tension alternative 50 Hz et une température de 25 °C ;
- Facteur de perte de  $2*10^{-3}$  pour une fréquence de 50 Hz et une température de 25 °C.

Enfin, des essais diélectriques préliminaires ont montré que la configuration "électrode côté HT nues – électrodes côté masse revêtue" est susceptible de donner les meilleurs résultats en terme de tenue diélectrique en présence d'azote.



# **CHAPITRE 4**

## **RESULTATS ET DISCUSSIONS**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats des essais diélectriques. Nous commencerons par les résultats de essais *électrodes nues* qui serviront de référence. Dans la deuxième partie, nous exposerons les résultats des essais avec revêtement. Les gaz utilisés sont le N<sub>2</sub> et le SF<sub>6</sub>.

## 4.1. Essais électrodes nues

Avant de tester l'influence du revêtement sur la tenue diélectrique du système à isolation gazeuse nous avons tout d'abord procédé à des tests *électrodes nues* pour caractériser ce système.

### 4.1.1. Conditions expérimentales

Rappel des conditions expérimentales :

- Tension appliquée : Onde de choc de foudre 1.20/50  $\mu$ s ;
- Gaz : N<sub>2</sub> et SF<sub>6</sub> ;
- Pression d'essais : 0.4 MPa absolu ;
- Distance inter-électrodes  $d$  : 10, 12 et 14 mm ;
- Profil des électrodes : type Rogowski ;
- Rugosité des électrodes : 1.6  $\mu$ m en moyenne ;
- Facteur d'utilisation du champ électrique  $F_U$  : 0.89, 0.87 et 0.84 pour respectivement  $d=10, 12$  et  $14$  mm;
- Taux d'humidité mesuré dans la cellule de tests : 290 ppmV (partie par million en volume) ;

Le profil des électrodes a été optimisé pour obtenir un champ uniforme au centre de l'espace inter-électrodes en tenant compte de la forme de la cellule de tests (§3.2). Pour caractériser cette uniformité du champ électrique, on définit le facteur  $F_U$  dit *facteur d'utilisation du champ électrique* qui est le rapport entre le champ moyen et le champ maximum dans l'espace inter-électrodes. Ce facteur est compris entre 0 et 1 ; le champ électrique étant d'autant plus uniforme dans cet espace qu'il est proche de 1. Le taux d'humidité dans la cellule est mesuré à l'aide d'un hygromètre à condensation (§3.7).

## 4.1.2. Résultats

Le tableau 8, ci-dessous, donne les résultats des essais électrodes nues pour le N<sub>2</sub> et le SF<sub>6</sub>.

Gaz	N2						SF6					
	+			-			+			-		
Polarité												
Distance inter-électrodes "d" (mm)	10	12	14	10	12	14	10	12	14	10	12	14
Echantillon 1	123,9	166,5	169,7	134,3	179,3	220,9	239,6	359,8	382,5	330,5	419	443,9
Echantillon 2	135,4	159	187,8	100,2	150,5	222	272,6	372,2	392,9	302,4	366,7	452,1
Echantillon 3	135,4	167,5	184,6	121,5	177,2	198,5	284	351,5	361,8	289,2	374,9	430,1
Echantillon 4	118,2	191	200,6	137,5	150,5	204,9	269,3	330,8	372,2	269,3	355,6	496,2
Echantillon 5	123,7	129,1	165,4	148,2	176,1	199,6	272,6	349,4	359,8	289,2	399,7	441,1
Echantillon 6	153,5	169,7	169,7	142,9	151,5	198,5	302,4	330,8	359,8	289,2	427,3	452,1
<b>Tension de claquage moyenne (kV)</b>	<b>131,7</b>	<b>163,8</b>	<b>179,6</b>	<b>130,8</b>	<b>164,2</b>	<b>207,4</b>	<b>273,4</b>	<b>349,1</b>	<b>371,5</b>	<b>295,0</b>	<b>390,5</b>	<b>452,6</b>
<b>Champ électrique de claquage moyen (kV/mm)</b>	<b>13,2</b>	<b>13,7</b>	<b>12,8</b>	<b>13,1</b>	<b>13,7</b>	<b>14,8</b>	<b>27,3</b>	<b>29,1</b>	<b>26,5</b>	<b>29,5</b>	<b>32,5</b>	<b>32,3</b>
<b>Ecart-type (%)</b>	<b>9,7</b>	<b>12,3</b>	<b>7,6</b>	<b>13,4</b>	<b>8,9</b>	<b>5,4</b>	<b>7,5</b>	<b>4,7</b>	<b>3,7</b>	<b>6,9</b>	<b>7,5</b>	<b>5,1</b>
<b>Ecart-type (kV/mm)</b>	<b>1,3</b>	<b>1,7</b>	<b>1,0</b>	<b>1,7</b>	<b>1,2</b>	<b>0,8</b>	<b>2,1</b>	<b>1,4</b>	<b>1,0</b>	<b>2,0</b>	<b>2,4</b>	<b>1,6</b>

Tableau 8 : Résultats des essais diélectriques électrodes nues.

Le champ électrique de claquage moyen  $E_{BD}$  en kV/mm est donné par l'expression suivante :

$$E_{BD} = \frac{V_{BD}}{d} \quad (44)$$

Où  $V_{BD}$  est la tension de claquage moyenne en kV et  $d$  est la distance inter-électrodes en mm.

La première remarque que nous pouvons faire concerne la dispersion des résultats. L'écart-type est particulièrement élevé dans le cas du N<sub>2</sub> (compris entre 5.4 et 13.4 %). Dans le cas du SF<sub>6</sub>, la dispersion est plus faible (écart-type compris entre 3.7 et 7.5 %). L'ionisation démarre localement (électron germe, chocs ionisants, avalanche, ...). Il s'agit donc d'un phénomène à la dimension moléculaire. A ce niveau là, les distances entre molécules connaissent une dispersion importante par rapport à la valeur moyenne prise de façon macroscopique :  $n\sigma\lambda = l$  (voir chapitre 2, §2.3.5). Chacun de ces trois termes (à gauche) peut connaître une fluctuation importante. La molécule du SF<sub>6</sub> étant plus grosse que la molécule du N<sub>2</sub>, les fluctuations de  $n\sigma\lambda$  sont moins fortes avec un  $\sigma$  (section efficace) plus grand à pression constante.

Le champ électrique de claquage moyen du SF<sub>6</sub> est environ 2 fois plus élevé que celui du N<sub>2</sub>.

### 4.1.2.1. Validation des critères de claquage

Nous allons appliquer les critères de claquage que nous avons développés au chapitre 2.

#### 4.1.2.1.1. Cas du N<sub>2</sub>

Pour le N<sub>2</sub>, nous avons déduit le critère de claquage suivant :

$$V_D = \frac{dn\sigma}{Ln\left(\frac{dn\sigma}{C}\right)} V_C \quad (45)$$

Où  $V_D$  est la tension de claquage,  $d$  est la distance inter-électrodes,  $n$  est le nombre de molécules par m<sup>3</sup>,  $\sigma$  est la section efficace d'ionisation,  $V_C$  est la tension d'ionisation et  $C$  est un nombre constant défini au minimum de Paschen.

Application numérique pour une pression de 0.4 MPa et une distance  $d$  de 10 mm :

$$\begin{aligned} \sigma &= 8 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2 \\ n &\approx 10^{26} \text{ molécules / m}^3 \\ V_C &= 15,51 \text{ V} \\ V_D &= 132 \text{ kV} \end{aligned} \quad (46)$$

Cette valeur est en accord avec les résultats expérimentaux donnés dans le tableau 8.

Au premier ordre, la valeur moyenne de la section efficace  $\sigma$  paraît constante depuis le minimum de Paschen : avec les valeurs calculées ici, on décrit bien toute la courbe de Paschen jusqu'à notre propre valeur expérimentale. Cependant, cette valeur moyenne est liée au phénomène de dispersion inévitable due à l'initiation de la décharge aux dimensions moléculaires. On sait par ailleurs que  $\sigma$  pour un même matériau dépend fortement du processus mis en jeu (donc de l'énergie) : par exemple, dans des processus de réactions chimiques du N<sub>2</sub>, on trouve souvent la valeur de  $\sigma=43 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ .

#### 4.1.2.1.2. Cas du SF<sub>6</sub>

Pour le SF<sub>6</sub>,  $\sigma$  variant avec  $n$ , on obtient le critère suivant :

$$V_D = \frac{dn\sigma_0 \left(\frac{n_0}{n}\right)^\beta}{Ln \left[ \frac{dn\sigma_0 \left(\frac{n_0}{n}\right)^\beta}{C} \right]} V_C \quad (47)$$

Où  $\beta=0,1$   $\sigma_0$  et  $n_0$  sont respectivement la section efficace et le nombre de molécules au minimum de Paschen. Comme pour le N<sub>2</sub>, toute la courbe de Paschen est tracée avec ces valeurs : on notera cependant l'influence de l'aspect électronégatif du SF<sub>6</sub> qui donne une section efficace plus grande et légèrement décroissante avec la pression.

Pour une pression de 0.4 MPa et une distance  $d$  de 10 mm, on obtient la tension de claquage suivante :

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 40.10^{-20} \text{ m}^2 \\ V_D &= 300 \text{ kV} \end{aligned} \quad (48)$$

Cette tension est du même ordre de grandeur que la tension donnée dans le tableau 8 en polarité négative (295 kV +/- 6.9 %).

#### 4.1.2.2. Influence de la polarité de la tension

Nous allons évaluer l'influence de la polarité sur la tenue diélectrique du N<sub>2</sub> et du SF<sub>6</sub>.

##### 4.1.2.2.1. Cas du N<sub>2</sub>

La figure 39 montre la tenue diélectrique du système isolé au N<sub>2</sub> pour une distance inter-électrodes de 10 (en bleu foncé), 12 (en bleu clair) et 14mm (en vert) en polarité positive et négative. La précision des résultats est donnée sous la forme d'une barre de +/- un écart-type.

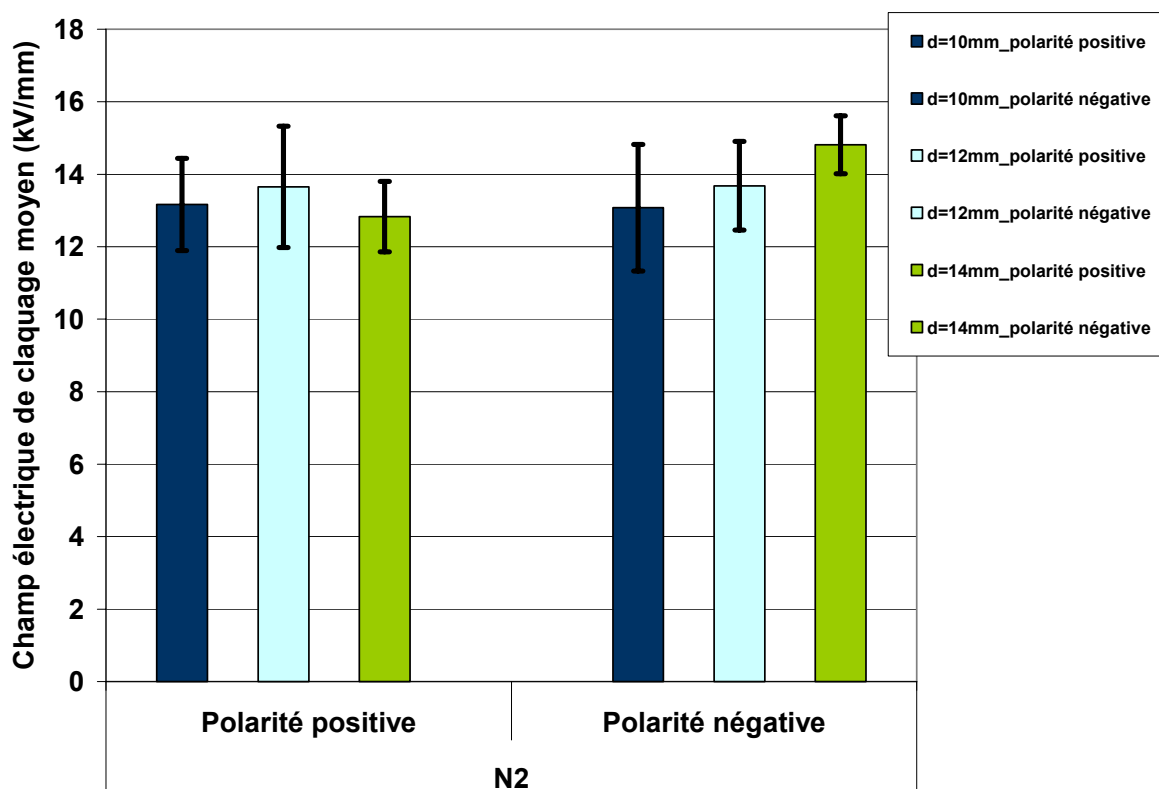


Figure 39 : Tenue diélectrique du système sans revêtement isolé au  $N_2$ .

Sur la figure, ci-dessus, en tenant compte des écarts type, on peut voir que le champ électrique de claquage moyen du système isolé au  $N_2$ , avec une distance inter-électrodes de 10 mm et un coefficient  $F_U$  de 0.89, est quasiment le même en polarité positive et négative. Cette observation va dans le sens de ce qui est avancé dans [32] où il est reporté qu'en situation de champ uniforme, la rigidité diélectrique d'un gaz n'est influencée ni par la forme ni par la polarité de la tension appliquée. Il est en de même pour une distance inter-électrodes de 12 mm avec un coefficient  $F_U$  de 0.87.

Par contre, pour une distance inter-électrodes de 14 mm engendrant un coefficient  $F_U$  de 0.84, (champ moins homogène ou plus divergent dans la zone entre les électrodes) le champ électrique de claquage moyen est légèrement plus élevé en polarité négative qu'en polarité positive. Cela signifie que le système est légèrement dissymétrique.

Nous pensons que cette dissymétrie est due à la configuration de la cellule de tests. En effet, le produit  $E.S$  du champ électrique local  $E$  par la surface  $S$  où ce champ est appliqué est un paramètre à prendre en compte [36]. Plus ce produit est grand et plus le claquage électrique se produira à des valeurs de champs plus faibles : en d'autres termes, on aura une probabilité plus grande de trouver "la cellule d'initiation" là où les conditions d'initiation de la décharge

disruptive sont réunies (électron germe initié par un champ local intense dû à des effets de pointes, ...).

La figure 40, ci-dessous, montre le résultat de la simulation de la distribution du champ électrique dans le système.

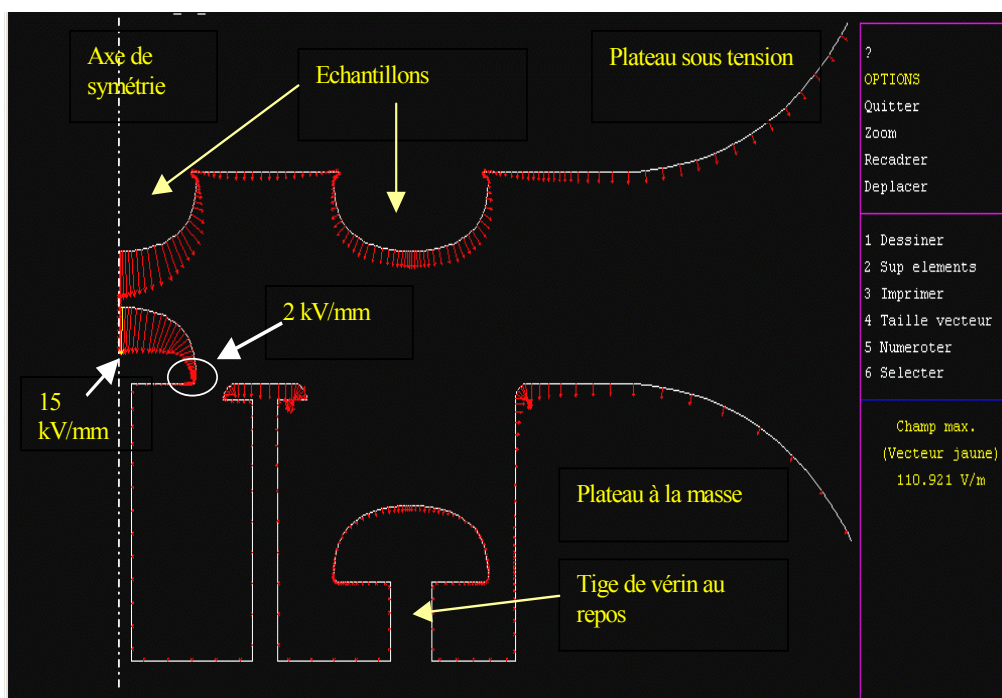


Figure 40 : Distribution du champ électrique dans le système électrodes nues.

Si l'on fait l'intégrale du produit  $E.S$  dans les zones à champ fort, le plateau sous tension présente un produit  $E.S$  moyen supérieur au plateau côté masse qui n'a qu'une faible partie soumise au champ fort. Le plateau sous tension influencera donc davantage le claquage électrique que le plateau à la masse. De plus, la figure 40 représente une géométrie simplifiée du système avec deux échantillons alors que, dans la réalité, le plateau côté HT en comporte 12.

En polarité positive, c'est-à-dire lorsque la polarité de la tension appliquée sur le plateau HT est positive, les charges d'espace négatives dans le gaz se dirigent vers ce plateau et renforcent très rapidement le champ électrique tout au tour. Ces charges d'espace négatives sont essentiellement des électrons bien plus mobiles que les ions négatifs.

De même, en polarité négative, c'est-à-dire lorsque la polarité de la tension appliquée sur le plateau HT est négative, c'est le plateau côté masse qui attire les électrons. En situation parfaitement symétrique, le champ électrique de claquage serait le même dans les deux cas de



figure. Cependant, comme nous venons de le voir, en pratique, le produit  $E.S$  moyen du plateau côté HT est supérieur à celui du plateau côté masse. Le plateau HT, lorsqu'il est porté à la polarité positive, attirera donc davantage et plus vite les électrons que le plateau côté masse. Le champ électrique de claquage sera par conséquent légèrement plus faible lorsque la polarité de la tension appliquée sur le plateau HT est positive.

#### 4.1.2.2.2. Cas du SF<sub>6</sub>

La figure 41, ci-dessous, montre l'évolution du champ électrique de claquage moyen du SF<sub>6</sub> pour des distances  $d$  de 10, 12 et 14 mm en polarité positive et négative. La précision des résultats est donnée sous la forme d'une barre de +/- un écart-type.

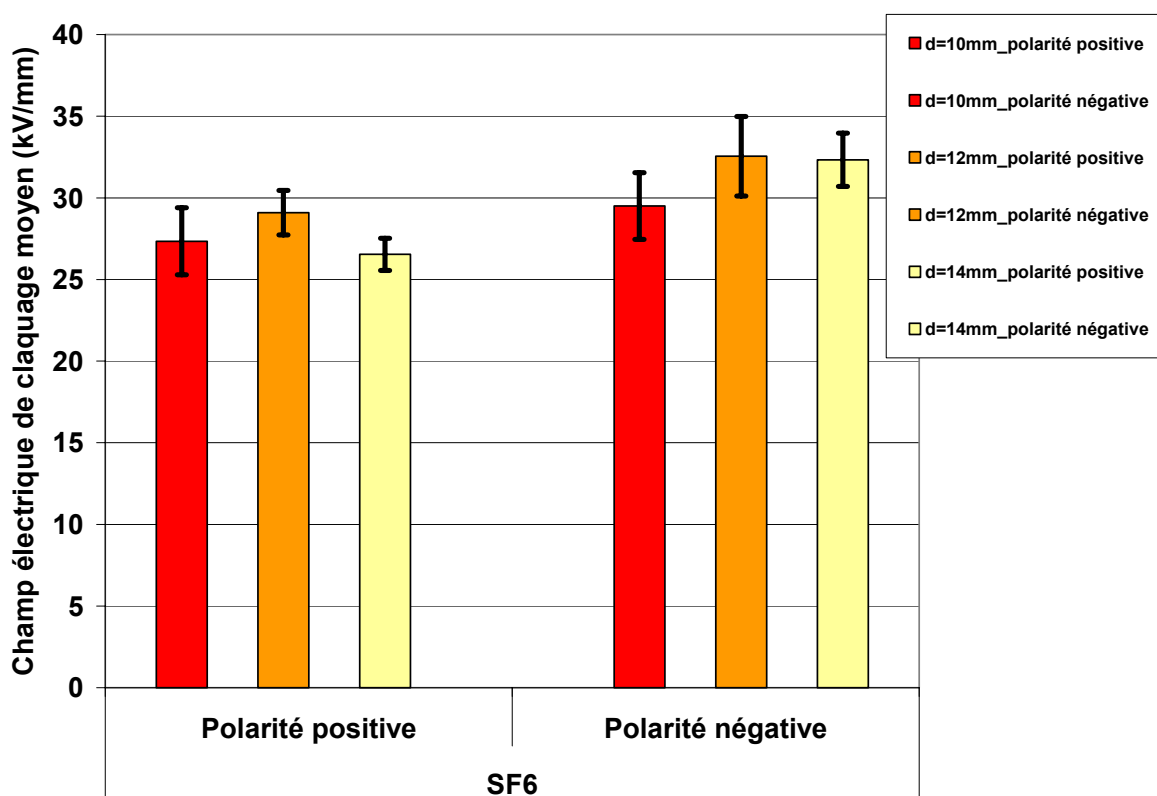


Figure 41 : Tenue diélectrique du système sans revêtement isolé au SF<sub>6</sub>.

On peut constater, qu'excepté pour la distance  $d$  de 10 mm où l'influence de la polarité est "noyée" dans l'écart-type, le champ électrique de claquage moyen du SF<sub>6</sub> est plus élevé en polarité négative qu'en polarité positive. Ceci s'explique par la dissymétrie de la cellule de tests comme nous l'avons vu précédemment. De plus, compte tenu du caractère électronégatif du SF<sub>6</sub>, l'influence de cette dissymétrie commence à partir d'une distance  $d$  de 12 mm alors que pour le N<sub>2</sub> elle se manifeste à partir d'une distance  $d$  de 14 mm.

### 4.1.2.3. Influence de la distance inter-électrodes

Nous allons maintenant voir l'influence de la distance inter-électrodes sur le champ électrique de claquage moyen.

#### 4.1.2.3.1. Cas du $N_2$

Les figures 42 et 43, ci-dessous, montrent l'évolution du champ électrique de claquage moyen en fonction de la distance inter-électrodes pour le  $N_2$  en polarité positive et négative. La précision des résultats est donnée sous la forme d'une barre de +/- un écart-type.

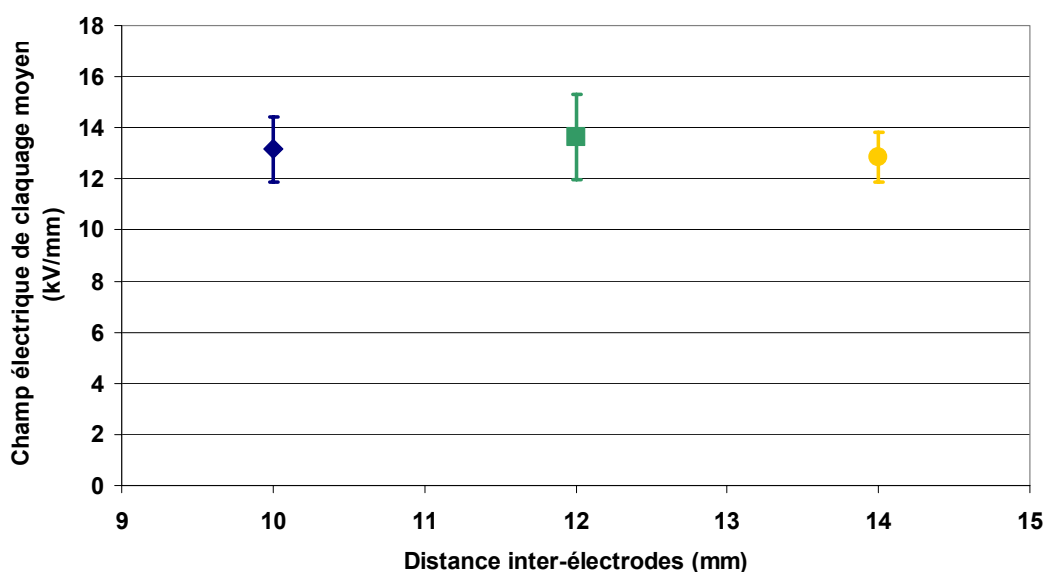


Figure 42 : Champ électrique de claquage moyen du  $N_2$  en polarité positive.

En ne tenant pas compte des écarts-types, on peut constater, que le champ électrique de claquage moyen a tendance à passer par un maximum pour une distance  $d$  de 12 mm. On peut aussi remarquer que la dispersion des résultats est plus faible pour une distance  $d$  de 14 mm.

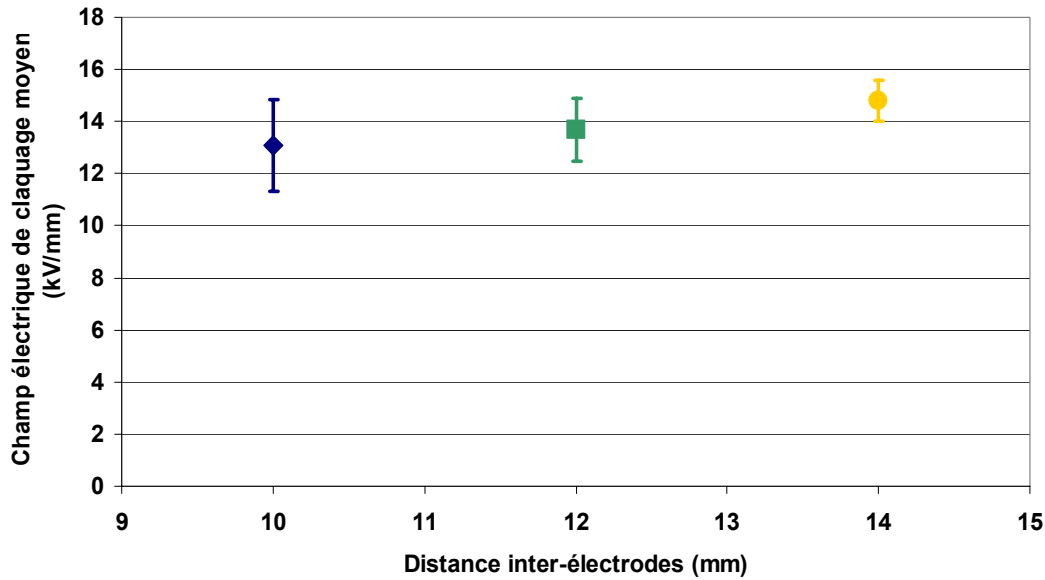


Figure 43 : Champ électrique de claquage moyen du  $N_2$  en polarité négative.

En polarité négative, le champ électrique de claquage moyen semble être une fonction croissante de la distance  $d$  (pour la plage étudiée). A l'instar de la polarité positive, on peut aussi remarquer que la dispersion des résultats diminue avec la distance  $d$ .

Ceci peut aussi s'expliquer par la dissymétrie de la cellule. Plus la distance  $d$  est grande plus le champ électrique est non homogène et plus la dissymétrie de la cellule est amplifiée.

#### 4.1.2.3.2. Cas du $SF_6$

Les figures 44 et 45 représentent l'évolution du champ électrique de claquage moyen du  $SF_6$  en fonction de la distance  $d$  en polarité positive et négative.

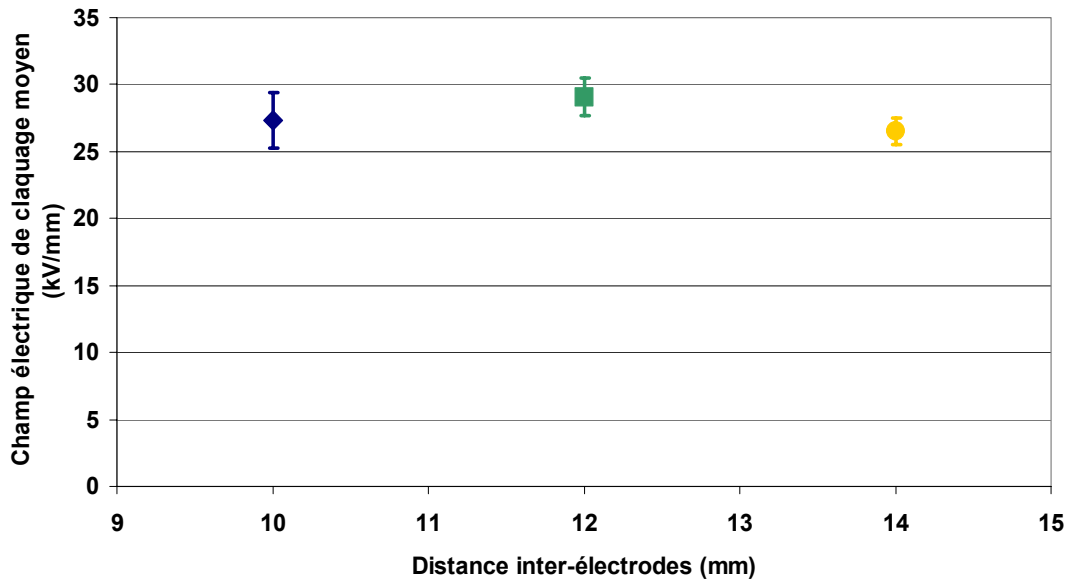


Figure 44 : Champ électrique de claquage moyen du  $SF_6$  en polarité positive.

De même que pour le  $N_2$ , le champ électrique de claquage moyen du  $SF_6$ , en polarité positive, présente un maximum pour une distance  $d$  de 12 mm et la dispersion des résultats diminue avec  $d$ .

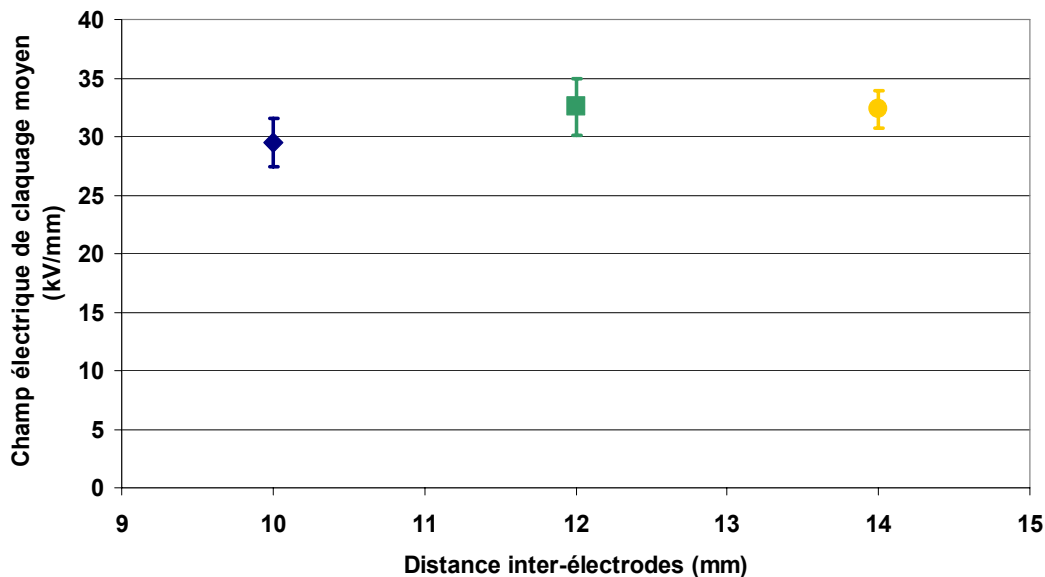
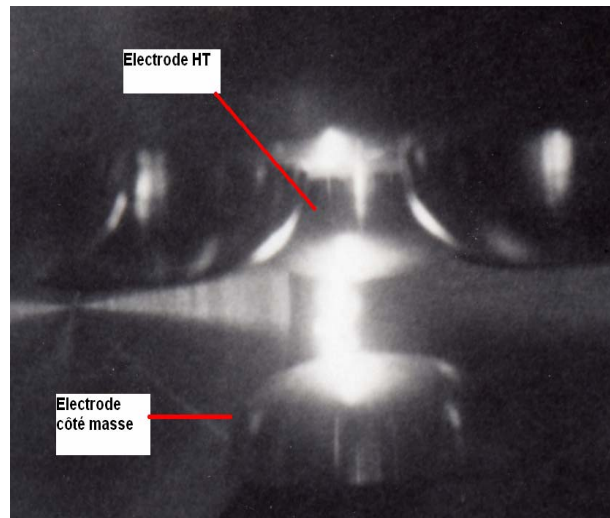


Figure 45 : Champ électrique de claquage moyen du  $SF_6$  en polarité négative.

En polarité négative, le champ électrique de claquage moyen du  $SF_6$  est une fonction croissante de  $d$ .

### Observations expérimentales

Lors du claquage électrique, la décharge a eu lieu comme prévu quasiment au centre de l'électrode côté HT et de l'électrode côté masse (figure 46). De plus, nous avons observé des traces d'amorçage matérialisées par des impacts au centre des électrodes. Ceci permet de valider l'optimisation du profil des électrodes (§ 3.2).



*Figure 46 : Photographie d'un claquage électrique dans la configuration électrodes nues.*

## 4.2. Essais avec revêtement

Le revêtement est constitué :

- De la sous-couche semi-conductrice à base de silicone isolant chargée de noir de carbone (sous-couche MSC) d'environ 0.2mm d'épaisseur ;
- De la couche de silicone isolant (couche BIP) d'environ 1.5 mm d'épaisseur.



*Figure 47 : Photographie d'une électrode revêtue.*

Rappel des conditions expérimentales :

- Tension appliquée : Onde de choc de foudre 1.20/50  $\mu$ s ;
- Gaz utilisé :  $N_2$ ,  $SF_6$  ;
- Epaisseur de gaz : 10 mm ;
- Pression d'essais : 0.4 MPa absolu ;
- Profil des électrodes : type Rogowski ;
- Rugosité des électrodes : 1.6  $\mu$ m en moyenne ;
- Facteur d'utilisation du champ électrique  $F_U$  : 0.89 ;
- Taux d'humidité mesuré dans la cellule de tests : 133 ppmV.

### 4.2.1. Résultats

Le tableau 9, ci-dessous, donne les résultats des essais avec revêtement pour le N<sub>2</sub> et le SF<sub>6</sub> :



Configuration des électrodes				
GAZ	N <sub>2</sub>		SF <sub>6</sub>	
Distance inter-électrodes « métal-métal » (mm)	11,5		11,5	
Polarité	+	-	+	-
Echantillon 1	117,9	119,5	324,6	353,6
Echantillon 2	182	163,3	272,9	349,4
Echantillon 3	105,5	141,9	260,5	339,1
Echantillon 4	105,5	99,2	281,2	335,2
Echantillon 5	175,8	172,9	300,3	335,8
Echantillon 6	117,9	113,1	269,7	360,1
<b>Tension de claquage moyenne du système (kV)</b>	<b>137,3</b>	<b>139,4</b>	<b>284,9</b>	<b>345,5</b>
<b>Champ électrique de claquage moyen du système (kV/mm)</b>	<b>11,9</b>	<b>12,1</b>	<b>24,8</b>	<b>30,0</b>
<b>Ecart-type (%)</b>	<b>25,6</b>	<b>21</b>	<b>9,7</b>	<b>3</b>
<b>Ecart-type (kV/mm)</b>	<b>3,0</b>	<b>2,5</b>	<b>2,4</b>	<b>0,9</b>

Tableau 9 : Résultats des essais diélectriques avec revêtement.

Pour évaluer l'influence du revêtement sur la tenue diélectrique du système, il faut que la distance  $d$  métal – métal soit la même dans les deux configurations avec et sans revêtement. Dans la configuration avec revêtement, cette distance est de 11.5 mm (épaisseur de gaz 10 mm et épaisseur du revêtement 1.5 mm). Nous avons donc déterminé le champ électrique de claquage moyen de la configuration sans revêtement pour une distance  $d$  de 11.5 mm par interpolation des résultats obtenus avec les distances  $d$  de 10, 12 et 14 mm en polarité positive et négative pour les deux gaz. Pour cela, nous avons déterminé les équations des courbes de tendance pour les distances  $d$  de 10, 12 et 14 mm. Nous avons ensuite calculé le champ électrique de claquage moyen pour une distance  $d$  de 11.5 mm à l'aide de ces équations.

La figure 48 donne un exemple de courbe de tendance pour le N<sub>2</sub> en polarité positive et le tableau 10 donne le résultat de l'interpolation.

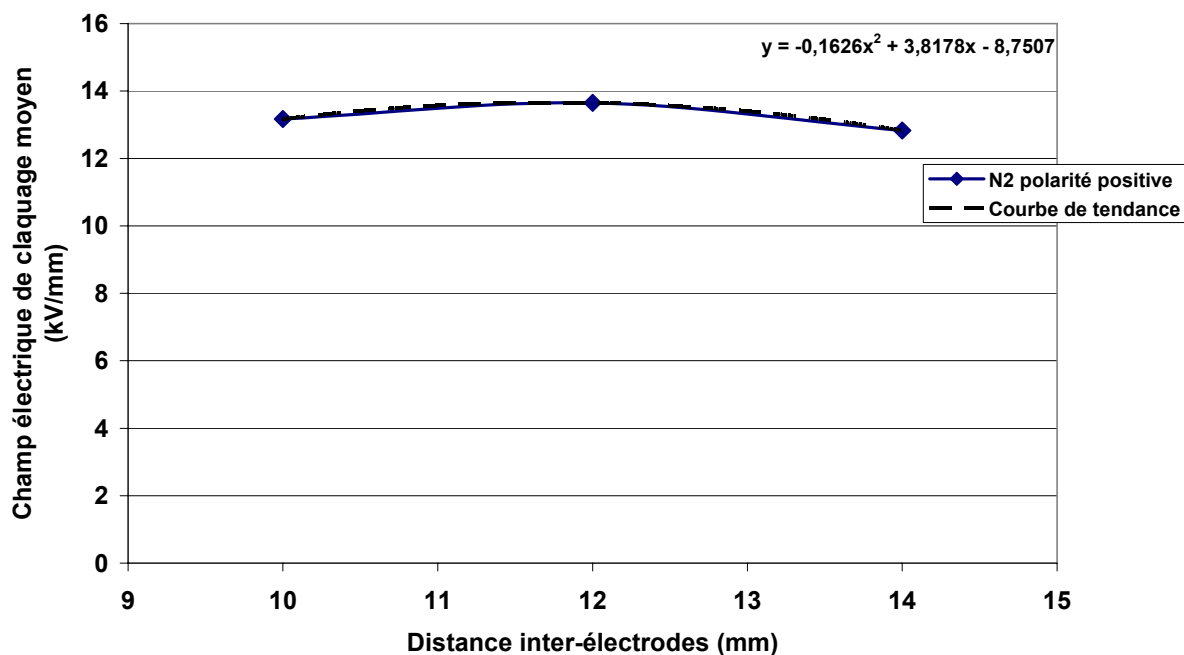


Figure 48 : Exemple de courbe de tendance dans la configuration sans revêtement.

Champ électrique de claquage moyen (kV/mm)			
N <sub>2</sub>	Polarité	Positive	13.7
		Négative	13.6
SF <sub>6</sub>	Polarité	Positive	29.1
		Négative	31.1

Tableau 10 : Champ électrique de claquage moyen pour  $d=11.5$ mm électrodes nues.



4.2.1.1. Cas du N<sub>2</sub>

Le tableau 11, ci-dessous, résume les résultats obtenus avec le N<sub>2</sub>.



GAZ	N2			
Configuration des électrodes				
Distance inter-électrodes « métal-métal » (mm)	11,5		11,5	
Polarité	+	-	+	-
Champ électrique de claquage moyen du système (kV/mm)	13,7	13,6	11,9	12,1
Champ électrique de claquage moyen dans le gaz (kV/mm)	13,7	13,6	13,2	13,4
Ecart-type (%)	13,8	11,6	25,6	21

Tableau 11 : Récapitulatif des résultats obtenus avec le N<sub>2</sub> dans le cas avec revêtement.

Dans l'hypothèse d'une distribution capacitive du champ électrique, le champ électrique de claquage moyen dans le gaz  $E_{BDg}$  est donné par la relation suivante :

$$E_{BDg} = \frac{V_{BD}}{d_g + \frac{e}{\epsilon_r}} \quad (49)$$

Avec  $V_{BD}$  la tension de claquage moyenne du système,  $d_g$  l'épaisseur de gaz,  $e$  l'épaisseur du revêtement et  $\epsilon_r$  la permittivité relative du revêtement.

L'ajout du revêtement en présence de N<sub>2</sub> dans les conditions d'essais précédemment citées semble augmenter la dispersion des résultats (on passe d'un écart-type compris entre 5.4-13.4 % à 21-25.6 %).

La figure 49, donne l'évolution du champ électrique de claquage moyen du système pour les configurations avec et sans revêtement en polarité positive et négative pour le N<sub>2</sub>. Les configurations sans revêtement sont représentées en bleu foncé et en bleu clair pour respectivement la polarité positive et négative. Quant aux configurations avec revêtement, elles figurent en vert foncé et vert clair pour respectivement la polarité positive et négative.

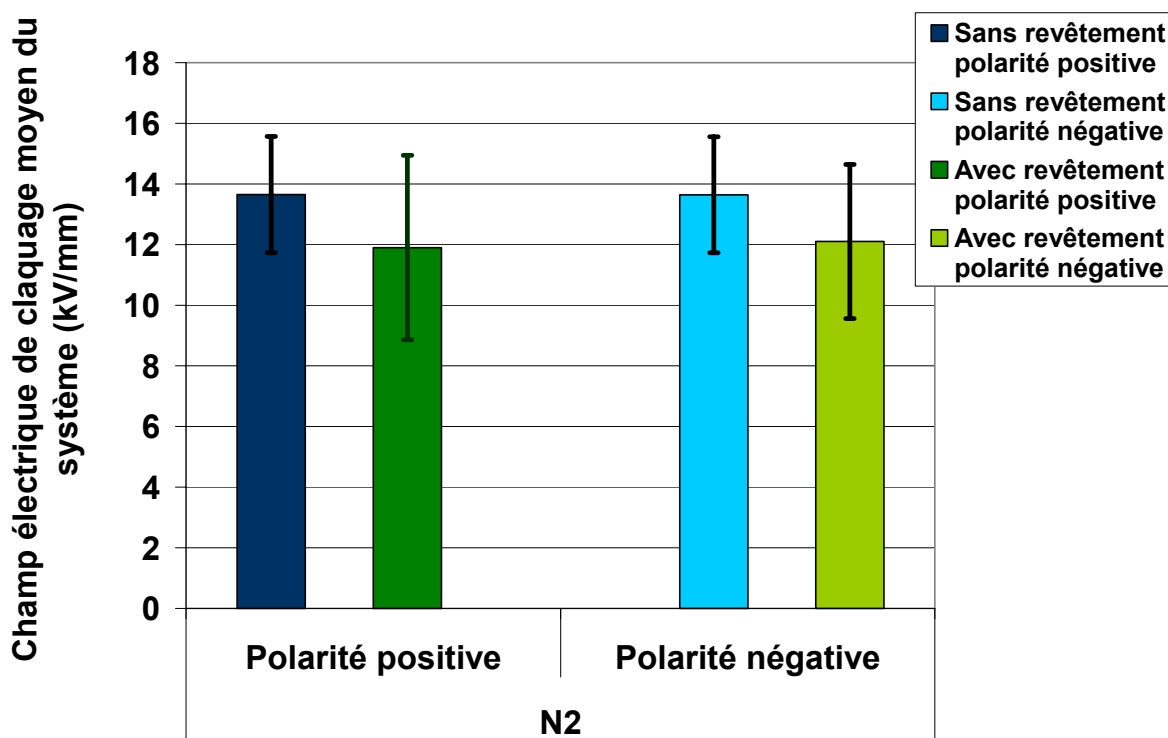


Figure 49 : Champ électrique de claquage moyen du système pour le  $N_2$  dans le cas avec revêtement.

En ne raisonnant que sur le champ électrique de claquage moyen du système, on peut dire que l'ajout du revêtement diminue la tenue diélectrique du système que ce soit en polarité positive ou négative. Par contre, si l'on tient compte des écarts-types, on peut dire que la tenue diélectrique du système n'est pas influencée par le revêtement.

Nous allons nous intéresser au champ électrique de claquage moyen dans le gaz pour les configurations avec revêtement.

Si l'on trace l'évolution du champ électrique de claquage moyen dans le gaz pour les configurations avec et sans revêtement, on obtient la figure 50.

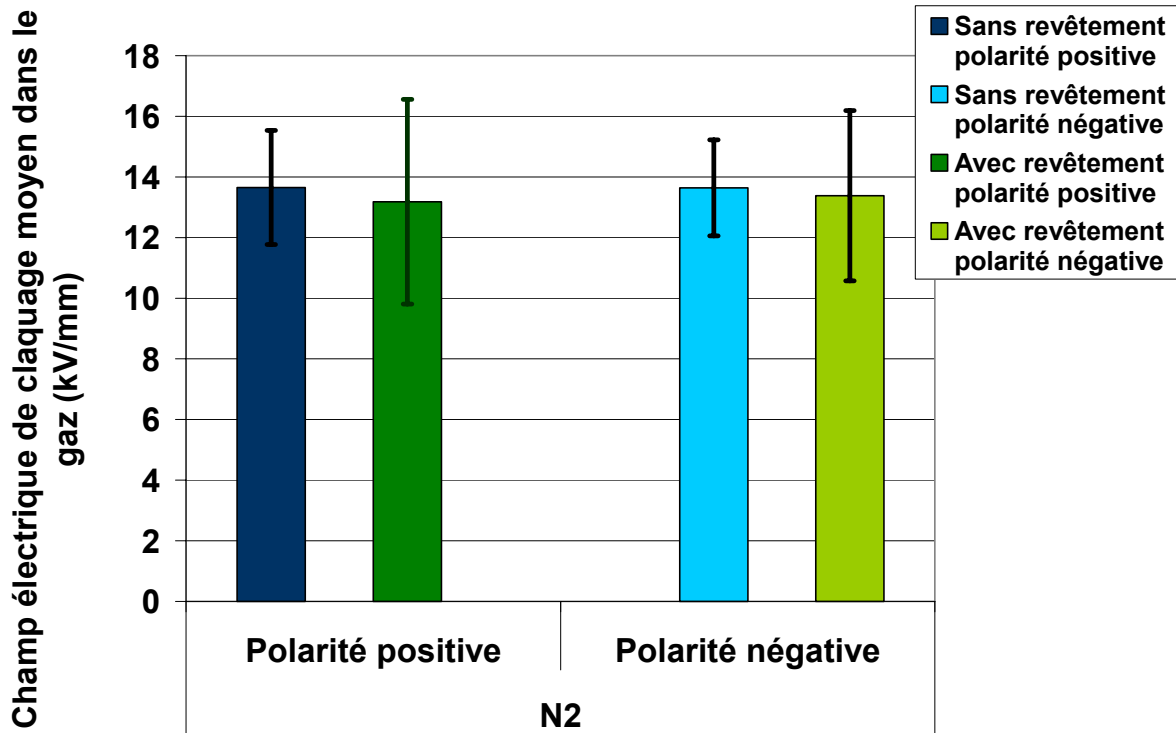


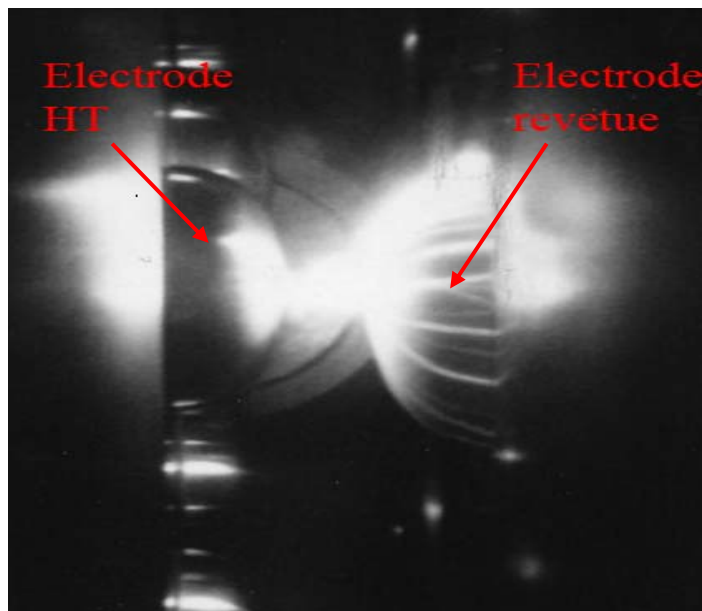
Figure 50 : Champ électrique de claquage dans le gaz pour le  $N_2$  dans le cas avec revêtement.

On peut voir sur la figure, ci-dessus, que le champ électrique de claquage moyen dans le gaz est, compte tenu des écarts-types, quasiment le même quelle que soit la configuration ou la polarité.

Nous sommes donc bien dans une situation de distribution du champ électrique du type capacitif. Cela signifie que, dans les configurations avec revêtement, la tenue diélectrique du système est régie par la tenue diélectrique du gaz. En d'autres termes, le fait d'appliquer un revêtement sur un conducteur (en l'occurrence l'électrode côté masse) renforce le champ électrique dans le gaz. Par conséquent, le claquage électrique a lieu pour une tension plus faible par rapport au même système sans revêtement.

Les observations expérimentales ci-après nous renseignent sur le processus de claquage.

Dans le cas du  $N_2$  nous avons observé lors du claquage électrique un phénomène de cheminement à la surface du revêtement mais pas de trace de perforation au sommet de ce revêtement (figure 51).



*Figure 51 : Photographie du phénomène de cheminement en surface du revêtement.*

On peut constater, sur la figure ci-dessus, que la décharge électrique s'établit entre le sommet des électrodes. Sur l'électrode revêtue côté masse, on voit bien le phénomène de cheminement en surface sous la forme de plusieurs filaments lumineux.

Nous avons aussi observé des impacts au centre de l'électrode côté HT et sur le plateau support côté masse (figure 52).



Figure 52 : Exemple d'impact de claquage sur le plateau côté masse.

Nous pensons que, durant la procédure de test (application de plusieurs tensions de chocs de niveau croissant jusqu'au claquage), le gaz s'ionise. Les charges d'espace libres dans le gaz se déposent sur la surface du revêtement sous l'effet du champ électrique. Lorsque la tenue diélectrique du gaz est atteinte, le claquage de ce dernier se produit. La décharge se propage ensuite à l'aide de la charge d'espace sur la surface du revêtement jusqu'au potentiel zéro ; d'où la présence d'impacts sur le plateau côté masse.

En analysant les électrodes revêtues de plus près, nous avons observé plusieurs traces de perforation sur les bords (figure 53).

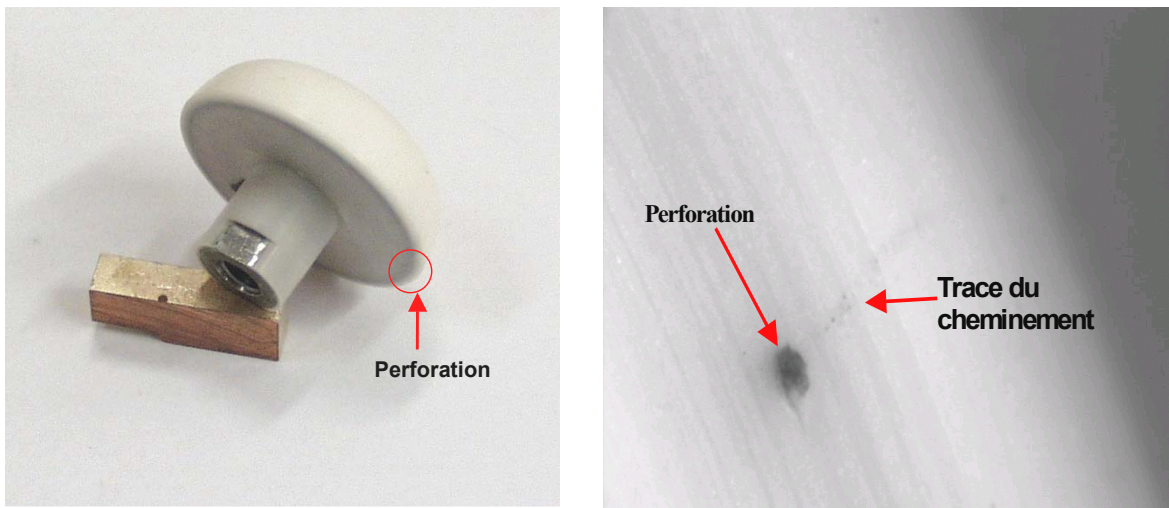


Figure 53 : Analyse d'une électrode revêtue après claquage au microscope binoculaire.

Nous avons donc effectué une coupe transversale d'une électrode revêtue pour analyser ces traces. La figure 54 montre cette intersection vue au microscope binoculaire.

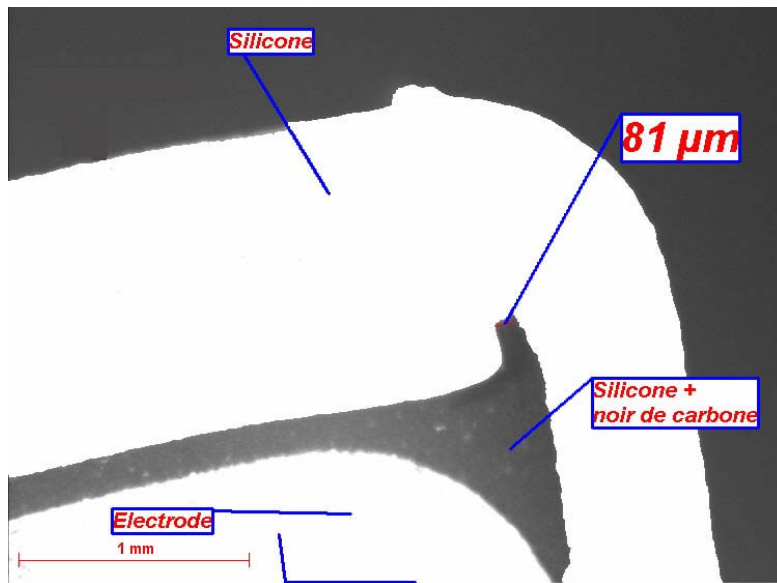


Figure 54 : Vue en coupe d'une micro pointe dans le revêtement.

On peut remarquer la présence d'une micro pointe d'environ  $81\mu\text{m}$  d'épaisseur due à la mise en œuvre de la sous-couche semi-conductrice MSC. Celle-ci pourrait être à l'origine du claquage en émettant des électrons dans le gaz par effet de champ.

Nous allons estimer le nombre d'électrons que peut émettre cette micro pointe à l'aide de la loi d'émission par effet de champ de Fowler-Nordheim décrite au chapitre 2 :

$$J_{FN} = A_{FN} (E_C)^2 \exp\left(-\frac{\beta_{FN}}{E_C}\right) \quad (50)$$

Avec  $E_C$  le champ électrique réel à la cathode (au niveau de la micro pointe). La forme de ce champ et de la tension appliquée est donnée par les relations suivantes :

$$E_C(t) = \frac{V(t)}{r}$$

et

$$V(t) = V_0 \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)\right) * \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (51)$$

Où  $r$  est le rayon de courbure de la micro pointe,  $V(t)$  la tension de choc de foudre avec  $V_0$  la valeur crête,  $\tau_1=1.2\mu\text{s}$  et  $\tau_2=50\mu\text{s}$ .

Dans ce cas le nombre d'électrons émis  $N_e$  est :

$$N_e = \frac{S \int_{\tau_1}^{\tau_2} J_{FN}(t) dt}{q} \quad (52)$$

Avec  $S$  la surface d'émission de la micro pointe.

Application numérique pour une tension de claquage de  $V_0=100\text{ kV}$  :

- $r=81*10^{-6}\text{ m}$  ;
- $S\approx r^2\approx 6*10^{-9}\text{ m}^2$  ;
- $N_e\approx 15000$  électrons.

Le claquage électrique du gaz peut donc être dû à la présence de cette micro pointe.

#### 4.2.1.2. Cas du SF<sub>6</sub>

Le tableau 12, ci-dessous, résume les résultats obtenus avec le SF<sub>6</sub>.


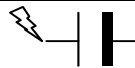

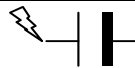
GAZ	SF6			
				
Configuration des électrodes				
Distance inter-électrodes « métal-métal » (mm)	11,5		11,5	
Polarité	+	-	+	-
Champ électrique de claquage moyen du système (kV/mm)	29,1	31,1	24,8	30,0
Champ électrique de claquage moyen dans le gaz (kV/mm)	29,1	31,1	27,3	33,2
Ecart-type (%)	7,5	7	9,7	3

Tableau 12 : Récapitulatif des résultats obtenus avec le SF<sub>6</sub> dans le cas avec revêtement.

Ici aussi, le champ électrique de claquage moyen dans le gaz est calculé sur la base d'une distribution capacitive du champ électrique.

Pour le SF<sub>6</sub>, la dispersion des résultats n'a pas beaucoup changé (on passe d'un écart-type de 3.7-7.5% à 3-9.7%).

La figure 55, ci-dessous, montre l'évolution du champ électrique de claquage du système pour les configurations avec et sans revêtement.

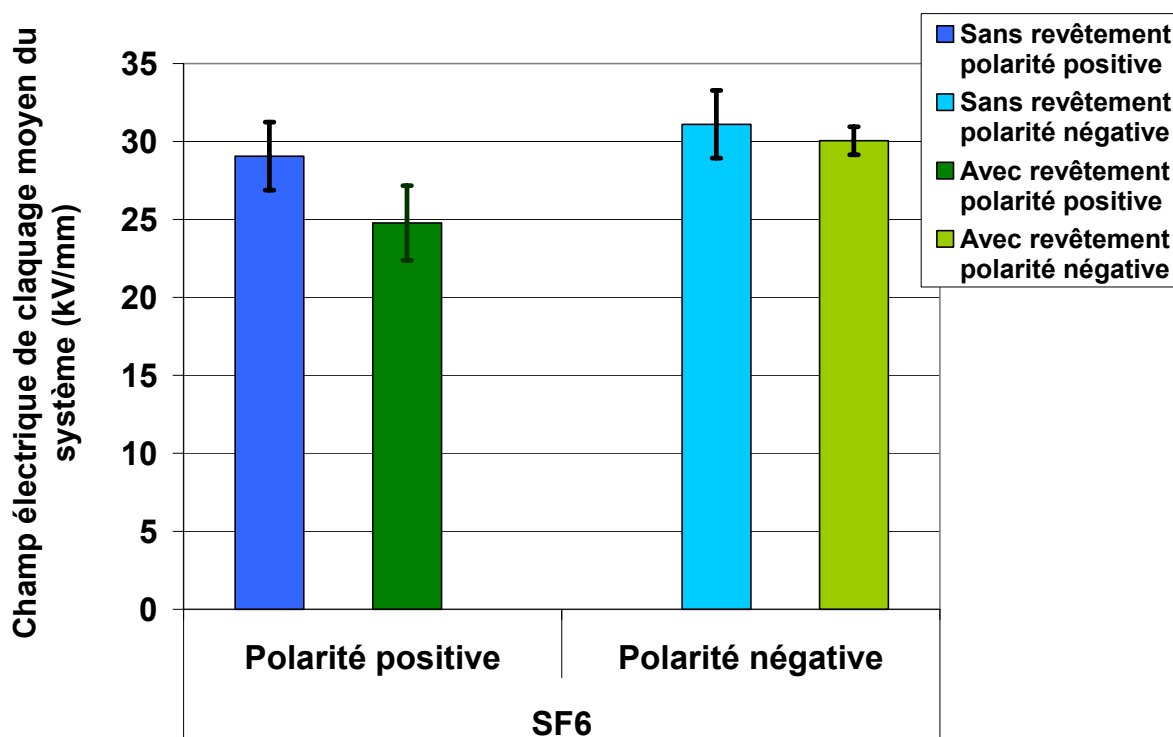


Figure 55 : Champ électrique de claquage moyen du système pour le SF<sub>6</sub> dans le cas avec revêtement.

En polarité positive, le champ électrique de claquage moyen du système est plus faible dans la configuration avec revêtement que dans la configuration sans revêtement et ce même en tenant compte de la dispersion des résultats. En polarité négative, on peut faire le même constat. Cependant, les écarts-types sont tels que les deux configurations paraissent équivalentes.

Nous allons maintenant nous intéresser au champ électrique dans le gaz lors du claquage dans l'hypothèse d'une distribution capacitive du champ électrique. Si l'on compare le champ de claquage dans le gaz pour les deux configurations on obtient le graphique de la figure 56.



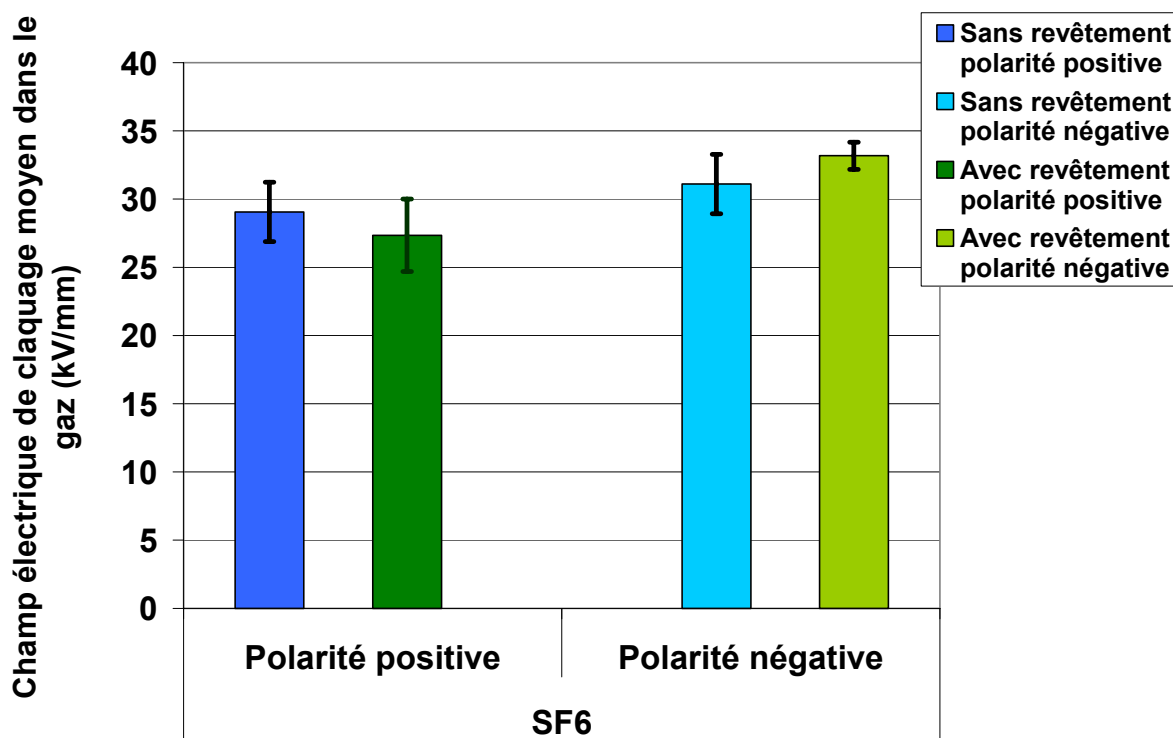


Figure 56 : Champ électrique de claquage moyen dans le gaz pour le  $SF_6$  dans le cas avec revêtement.

On peut voir sur la figure, ci-dessus, qu'en polarité positive, compte tenu des écarts-types, le champ électrique de claquage est quasiment le même dans les situations avec et sans revêtement. Par contre, en polarité négative, le champ électrique de claquage est plus élevé dans la configuration avec revêtement que dans la configuration sans revêtement. Ceci reste vrai même en tenant compte de la dispersion des résultats.

Une explication de cette augmentation du champ électrique de claquage dans le gaz pour la configuration avec revêtement en polarité négative pourrait être la suivante : les électrons bien plus mobiles que les ions positifs, vont venir rapidement se déposer sur la surface de l'isolant solide provoquant un champ inverse au champ appliqué dans le gaz (voir hypothèse 2 du chapitre 2 page 42). On n'est donc plus dans un système capacitif pur, mais dans un système influencé par la charge d'espace piégée sur la surface et qui crée un champ inverse non négligeable. En polarité positive, le phénomène de dépôt de charges positives sur l'isolant solide est trop lent par rapport au temps de l'établissement de la disruption du gaz.

Tout ceci montre qu'on peut accroître le champ de claquage en régime non capacitif.

### Observations expérimentales

Dans le cas du  $SF_6$ , nous n'avons pas observé de cheminement à la surface du revêtement contrairement au  $N_2$ . En analysant les échantillons après claquage, nous avons observé, dans la configuration électrode côté masse revêtue, la présence d'une perforation (figure 57) aux environs du centre de l'électrode avec revêtement et un impact au centre de l'électrode côté HT.

Nous n'avons pas observé de traces de perforation sur les bords des électrodes revêtues. Ce constat confirme l'hypothèse selon laquelle le claquage électrique est initié dans le gaz et non par les électrodes ou la sous-couche semi-conductrice MSC contrairement à ce que laissait supposer les traces de perforations sur les bords dans le cas du  $N_2$ .



*Figure 57 : Perforation du revêtement dans le cas du  $SF_6$ .*

### 4.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des essais diélectriques d'un système isolé par gaz sous pression avec et sans revêtement. Les gaz testés sont l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) et l'azote ( $\text{N}_2$ ) sous une pression de 0.4 MPa. Dans un premier temps, nous avons réalisé des essais sans revêtement pour comparer les tenues diélectriques des deux gaz et obtenir une référence pour les essais avec revêtement. Pour chaque gaz, trois distances inter-électrodes (10, 12 et 14 mm) ont été testées afin d'évaluer l'influence de la distribution du champ électrique (uniformité du champ) caractérisée par le coefficient d'utilisation du champ  $F_U$  (rapport entre le champ moyen et le champ maximum dans l'espace inter-électrodes) de respectivement 0.89, 0.87 et 0.84. Les paramètres d'essais sont : tension de choc de foudre 1.20/50  $\mu\text{s}$  (polarité positive et négative), rugosité des électrodes 1.6  $\mu\text{m}$ , taux d'humidité dans la cellule de tests de 290 ppmV (partie par million en volume). Nous avons ensuite effectué des essais avec un revêtement à base de silicone isolant appliqué sur l'électrode côté masse. Ce revêtement est constitué de deux couches : une sous-couche semi-conductrice (MSC) d'une épaisseur d'environ 0.2 mm et une couche isolante (BIP) d'une épaisseur d'environ 1.5 mm. L'épaisseur de  $\text{N}_2$  et de  $\text{SF}_6$  est fixée à 10 mm. Ces essais ont été menés dans les mêmes conditions que les essais électrodes nues avec un taux d'humidité de 133 ppmV.

Les résultats des essais diélectriques sans revêtement, montrent une grande dispersion des résultats dans le cas du  $\text{N}_2$  (jusqu'à 13.4 %) alors que pour le  $\text{SF}_6$ , la dispersion des résultats est plus faible (écart-type compris entre 3.7 et 7.5 %). Nous pensons que ces dispersions sont liées à la dimension moléculaire du processus de claquage. Ainsi, la différence entre la dispersion des deux gaz peut s'expliquer par la taille de la molécule de  $\text{SF}_6$  qui est plus grande que celle du  $\text{N}_2$ . La tenue diélectrique du  $\text{SF}_6$  est environ deux fois plus élevée que celle du  $\text{N}_2$ .

Les critères de claquage, développés au chapitre 2, valident bien les valeurs expérimentales. Dans le cas du  $\text{N}_2$ , pour une distance inter-électrodes  $d$  de 10 mm et une pression de 0.4 MPa, la tension de claquage moyenne pratique est de 131.7 kV avec un écart-type de 9.7 % pour une tension calculée de 132 kV. Pour le  $\text{SF}_6$ , dans les mêmes conditions, la tension moyenne de claquage expérimentale est de 295 kV avec un écart-type de 6.9 % pour une tension calculée de 300 kV.

En étudiant l'influence de la polarité de la tension de choc de foudre sur la tenue diélectrique du système on obtient les résultats suivants :

- Dans le cas du  $N_2$ , il s'avère que pour une distance  $d$  de 10 mm engendrant un coefficient  $F_U$  de 0.89, le champ électrique de claquage moyen du système est quasiment le même en polarité positive et négative. Ceci va dans le sens de ce qui est avancé par Ségur [32] qui dit qu'en situation de champ uniforme, la tenue diélectrique d'un système isolé par gaz sous pression n'est influencée ni par la forme ni par la polarité de la tension appliquée. Il est en de même pour une distance  $d$  de 12 mm avec  $F_U$  de 0.87. En revanche, pour une distance  $d$  de 14 mm, avec  $F_U$  de 0.84, le champ électrique de claquage moyen est légèrement plus élevé en polarité négative qu'en polarité positive.
- Pour le  $SF_6$ , avec une distance  $d$  de 10 mm, l'influence de la polarité semble être "noyée" dans l'écart-type. Par contre, à l'instar du  $N_2$ , pour une distance  $d$  de 12 et 14 mm, le champ électrique de claquage moyen du système est plus élevé en polarité négative qu'en polarité positive.

Cette dissymétrie entre la polarité positive et négative est due à la configuration de la cellule de tests et la différence de mobilité entre les électrons et les ions. En effet, un paramètre important est le produit  $E.S$  du champ électrique local  $E$  par la surface  $S$  où ce champ est appliqué. Plus ce produit est grand et plus on attirera davantage d'électrons ou d'ions selon la polarité de l'électrode. Lorsque la polarité de la tension appliquée sur le plateau HT est positive, ce dernier attire des électrons et le plateau côté masse attire des ions positifs. Lorsque la polarité est négative, c'est le phénomène inverse. Dans un système parfaitement symétrique, il n'y aurait pas de différence entre la tension de claquage en polarité positive et négative. Or, le côté HT présente un produit  $E.S$  supérieur à celui du plateau côté masse ce qui explique que la tension de claquage soit plus faible en polarité positive qu'en polarité négative. De plus, du fait du caractère électronégatif du  $SF_6$ , l'effet de cette dissymétrie semble se manifester à partir d'une distance  $d$  de 12 mm contre 14 mm pour le  $N_2$ .

En ce qui concerne l'influence de la distance inter-électrodes  $d$  sur la tenue diélectrique du système sans revêtement, on obtient les résultats suivants :

- Pour le  $N_2$  en polarité positive, le champ électrique de claquage moyen semble passer par un maximum pour une distance  $d$  de 12 mm. En polarité négative, ce champ semble être une fonction croissante de la distance  $d$ . Nous avons aussi

observé que la dispersion des résultats semble diminuer avec la distance  $d$  pour les deux polarités.

- Dans le cas du SF<sub>6</sub>, en polarité positive, comme pour le N<sub>2</sub>, le champ électrique de claquage moyen semble passer par un maximum pour  $d=12\text{mm}$ . En polarité négative, ce champ est une fonction croissante de la distance  $d$ . La dispersion des résultats semble aussi diminuer avec  $d$  pour les deux polarités.

De plus, les observations expérimentales permettent de valider la conception du profil des électrodes. En effet, le claquage électrique a eu lieu au centre des électrodes sous la forme d'une décharge diffuse.

Les résultats des essais diélectriques avec revêtement en présence de N<sub>2</sub> montrent les résultats suivants :

- L'ajout du revêtement a eu pour effet une augmentation de la dispersion des résultats par rapport à la configuration sans revêtement. L'écart-type est compris entre 21 et 25.6 % alors qu'il était compris entre 5.4 et 13.4 % pour les essais électrodes nues.
- Le champ électrique de claquage moyen du système semble diminuer avec la présence du revêtement pour les deux polarités. Cependant, compte tenu des écarts-types relativement importants, on peut dire que le revêtement n'a pas eu d'influence sur la tenue diélectrique du système. Lorsqu'on calcule le champ électrique de claquage moyen dans le gaz, dans l'hypothèse d'une distribution capacitive des charges, on s'aperçoit qu'il est le même dans les deux configurations.
- Lors du claquage électrique, nous avons observé un phénomène de cheminement en surface du revêtement et des impacts d'amorçage au centre de l'électrode nues côté HT ainsi que sur le plateau support côté masse.

Tout ceci montre que nous sommes bien en situation de distribution des charges du type capacitif (hypothèse 1 du chapitre 2 page 41). La tenue diélectrique du système hybride est donc régie par le gaz. Lorsque le champ électrique de claquage de ce dernier est atteint, la décharge s'initie dans le gaz qui devient alors totalement conducteur. Dans ce cas, toute la tension est appliquée sur l'épaisseur du revêtement. Si la rigidité diélectrique intrinsèque du revêtement est telle que la tension peut être supportée, la décharge se prolonge à la surface du

revêtement par l'intermédiaire des charges qui y sont fixées jusqu'à la masse. D'où la présence d'impacts sur le plateau support côté masse.

Pour le SF<sub>6</sub>, les résultats obtenus sont les suivants :

- Le revêtement n'a pas eu d'influence sur la dispersion des résultats. L'écart-type obtenu est compris entre 3.7 et 7.5 % alors qu'il est compris entre 3 et 9.7 % pour les essais sans revêtement.
- Le champ électrique de claquage moyen du système hybride est légèrement plus faible par rapport au système sans revêtement en polarité positive et négative.
- Le champ électrique de claquage moyen dans le gaz en polarité positive est quasiment le même dans les configurations avec et sans revêtement compte tenu de la dispersion des résultats. En polarité négative, ce champ est plus élevé dans le cas avec revêtement que sans revêtement.

Ceci est dû aux charges d'espace (principalement des électrons beaucoup plus mobiles que les ions négatifs) qui, sous l'effet du champ électrique, se fixent sur la surface du revêtement. La tenue diélectrique du SF<sub>6</sub> est telle qu'un grand nombre d'électrons est créé durant la procédure de tests avant le claquage. Ces électrons créent un champ électrique inverse au champ appliqué et retardent ainsi le claquage (hypothèse 2 du chapitre 2 page 42).

On ne peut conclure sans faire une réflexion sur l'initiation de la décharge qui semble dans notre cas venir du gaz. Nous avons pourtant pris des précautions (obscurité totale, température faible ne donnant aucune ionisation sur le plan théorique, humidité contrôlée ...). Beaucoup d'auteurs ont fait des hypothèses pour expliquer l'initiation au sein du gaz lui-même [32]. Nous pensons que l'origine de l'électron germe est due à un phénomène quantique assisté par un très fort champ électrique local que ce soit au niveau du contact métal-gaz ou revêtement-gaz. On indique dans le cas métal-vide des hauteurs de barrière de plusieurs eV infranchissables par effet tunnel avec les champs que nous avons appliqués. Cependant, il faut considérer la présence du gaz et non du vide ; alors, on peut donc bien imaginer des zones microscopiques où l'interaction métal-gaz peut engendrer des électrons germes (voir chapitre 2 page 40). De même, l'interaction locale et nanoscopique revêtement-gaz peut aboutir à la création d'électrons germes de manière plus aisée et aléatoire vu nos résultats.

## CONCLUSIONS GENERALES ET PERSPECTIVES

Ce travail avait pour but d'étudier l'influence d'un revêtement isolant sur la tenue diélectrique d'un système isolé par un gaz sous pression. Ce revêtement, appliqué sur le conducteur côté masse, est constitué de deux couches : une sous-couche semi-conductrice d'épaisseur 0.5 mm à base de silicone isolant mélangé avec du noir de carbone et une couche isolante à base de silicone d'épaisseur 1.5 mm. Les gaz utilisés sont l'hexafluorure de soufre ( $\text{SF}_6$ ) et l'azote ( $\text{N}_2$ ) sous une pression de 0.4 MPa.

Les résultats des essais diélectriques sans revêtement nous ont permis de valider les valeurs de tenue diélectrique des deux gaz données dans la littérature. Ainsi, la tenue diélectrique du  $\text{SF}_6$  est environ deux fois celle du  $\text{N}_2$ . Les critères de claquage simples établis au chapitre 2 permettent de valider les données expérimentales.

Les essais avec revêtement en présence de  $\text{N}_2$  montrent que l'ajout du revêtement augmente la dispersion des résultats et diminue légèrement la tenue diélectrique du système par rapport à la situation sans revêtement. Le champ électrique de claquage moyen dans le gaz, calculé avec l'hypothèse d'une distribution des charges du type capacitif, est quasiment le même dans les deux configurations avec et sans revêtement. De plus, le claquage s'est traduit par un phénomène de cheminement à la surface du revêtement. Tout ceci montre que le claquage du système hybride est régi par la tenue diélectrique du  $\text{N}_2$  et les pièges de surface du revêtement. En effet, dans les conditions d'essais réalisés (épaisseur de gaz 10mm, pression de remplissage 0.4 MPa, épaisseur de revêtement 2 mm), lorsque le champ appliqué est tel que la tenue diélectrique du  $\text{N}_2$  est atteinte, la décharge disruptive s'initie dans le gaz et se propage à la surface du revêtement jusqu'au potentiel zéro.

En présence de  $\text{SF}_6$ , l'ajout du revêtement n'a quasiment pas d'effet sur la dispersion des résultats. La tenue diélectrique du système hybride en polarité positive est plus faible que celle du même système sans revêtement. En polarité négative, la tenue diélectrique est la même dans les deux configurations. Le champ électrique de claquage moyen dans le gaz, toujours calculé dans l'hypothèse d'une distribution des charges du type capacitif, est légèrement plus élevé dans la configuration avec revêtement en polarité négative. Ceci est probablement dû aux électrons libres dans le gaz qui, en se déposant sur la surface du revêtement, créent un champ inverse au champ appliqué.

L'hypothèse à la base du concept de l'isolation hybride est d'agir sur l'injection d'électrons des conducteurs vers le gaz sous l'effet du champ électrique. Alors le claquage serait gouverné par l'électrode. Ceci est possible si le gaz ne contient pas de charges germe. Les résultats des essais diélectriques montrent que le claquage du système hybride se produit avant que le phénomène d'injection ne devienne significatif. Par conséquent, l'application d'un revêtement sur les conducteurs a pour effet de diminuer la tenue diélectrique du système car le gaz est davantage contraint (distribution des charges du type capacitif). Ces essais ont été réalisés dans des conditions expérimentales se rapprochant le plus possible des conditions normales d'utilisation d'un système isolé par un gaz sous pression. En particulier la pression de remplissage est fixée à 0.4 MPa et la rugosité des électrodes à 1.6  $\mu\text{m}$ . Dans [31], on dit que l'influence de l'état de surface des électrodes sur la tenue diélectrique d'un système à isolation gazeuse commence à partir d'un produit  $p \cdot h$  de la pression par la rugosité des électrodes de l'ordre de 4 kPa.mm pour le SF<sub>6</sub> et de l'ordre de 40 kPa.mm pour l'air. Dans notre cas ce produit vaut 0.64 kPa.mm. Par conséquent, s'il on souhaite s'approcher des conditions d'apparition de l'effet des électrodes avec la rugosité donnée de 1.6  $\mu\text{m}$ , il faudrait augmenter la pression d'environ un facteur six dans le cas du SF<sub>6</sub>.

Les résultats des essais avec revêtement en présence de SF<sub>6</sub> en polarité négative montrent une légère amélioration de la tenue diélectrique du système par rapport au même système sans revêtement. Il est donc possible d'augmenter la tenue diélectrique d'un système à isolation gazeuse par l'utilisation de l'isolation hybride. Les paramètres importants semblent être, la propreté (présence d'impuretés) du gaz, le degré d'ionisation du gaz et surtout les charges qui se déposent à l'interface gaz-revêtement. On sait de manière générale que tout contact entre deux matériaux de natures différentes crée une zone de double couche de charge (d'un côté positif, de l'autre négatif). Ainsi, par cette réflexion, nous atteignons un domaine difficile à maîtriser : quelle structure doit-on réaliser pour créer une double couche où les deux types de charges seraient piégées profondément ? L'hexafluorure de soufre est électronégatif et piège les électrons, d'où son succès. Si on veut utiliser l'azote, il faut un revêtement qui crée une liaison forte (type Oxyde) avec le N<sub>2</sub>.



## NOTE SUR LA FORMULATION D'UNE COUCHE DE RESISTIVITE NON LINEAIRE EN FONCTION DU CHAMP ELECTRIQUE APPLIQUE

Nous avons vu que l'interface gaz-revêtement jouait un rôle important dans le claquage du système hybride. En particulier, la tension de cheminement à la surface du revêtement est une caractéristique importante. Dans une configuration où le revêtement et le gaz seraient mis en parallèle (figure 58), l'utilisation d'une couche de résistivité non linéaire en fonction du champ appliqué (couche MNL), peut s'avérer intéressante.

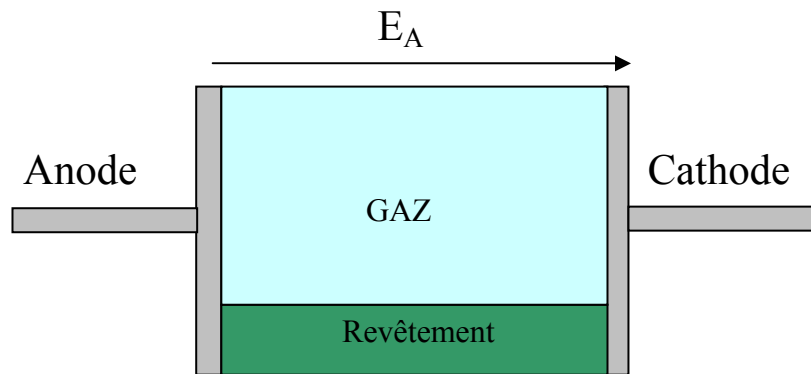


Figure 58 : Exemple de revêtement et gaz mis en parallèle.

Le principe de la couche MNL repose sur celui des varistances. Au-dessous d'un certain champ électrique appliqué, la couche est isolante. Au-dessus de ce champ critique, elle devient conductrice et la tension aux bornes du revêtement est limitée à une certaine tension seuil  $V_s$ . Le phénomène de cheminement peut être évité si  $V_s$  reste inférieure à la tension à partir de laquelle le cheminement se produit.

Pour obtenir une telle couche, il faut mélanger le polymère isolant (silicone par exemple) avec une poudre provenant d'une varistance qui présente l'effet de non linéarité.

## A. Rappel sur les varistances à base de ZnO

### (a) Préparation

Les caractéristiques des varistances à base d'oxyde de zinc (ZnO) dépendent étroitement des procédés de fabrication. Elles sont constituées principalement de ZnO (90 % en masse) et d'un mélange d'autres oxydes (oxydes de bismuth  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ , de cobalt CoO, de manganèse MnO, d'anti-moine  $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , etc.). Ces différents oxydes de pureté et de granulométrie soigneusement contrôlées, sont mélangés en phase aqueuse. Le mélange obtenu est ensuite séché, traité thermiquement (vers 700 °C), puis re-broyé. Après y avoir introduit des liants organiques, la poudre est compactée sous forme de disques. Les pièces ainsi réalisées sont traitées thermiquement à une température de l'ordre de 600 °C afin d'éliminer les liants organiques, puis, elles sont frittées à très haute température (vers 1200 °C) de façon à densifier l'ensemble et à obtenir l'effet de non linéarité recherché.

Les pastilles sont ensuite revêtues, sur leur pourtour, d'une couche généralement de nature vitreuse, qui favorise la tenue à long terme, puis d'une couche de résine, assurant la tenue diélectrique de la varistance. Elles sont également métallisées, sur chacune des faces parallèles, par projection d'aluminium en fusion (figure 59).

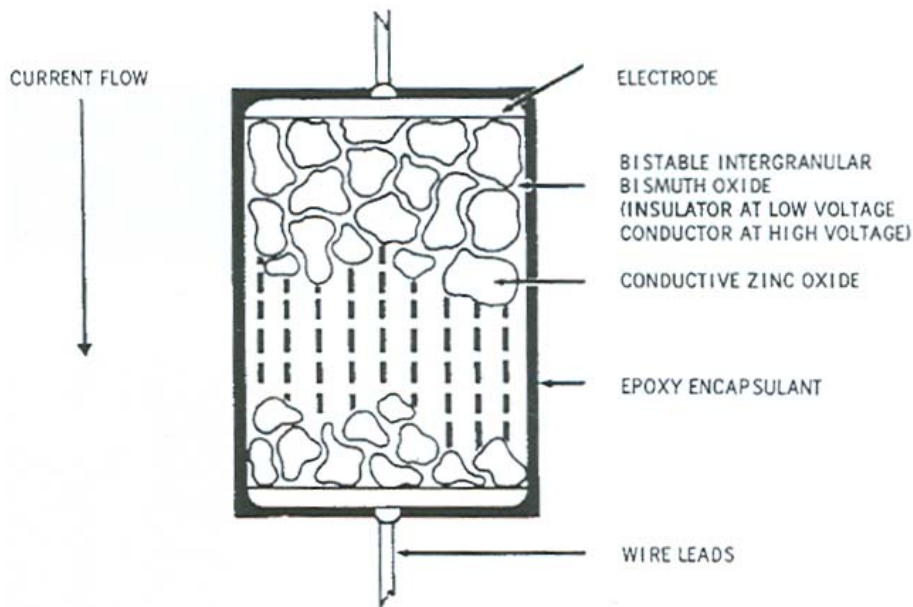


Figure 59 : Exemple de structure d'une varistance à base de ZnO.

## (b) Microstructure d'une varistance frittée

Elle est constituée de trois éléments (voir figure 60) :

- Les grains d'oxyde de zinc, dont la taille moyenne peut être de  $20\ \mu\text{m}$  ;
- Des couches inter granulaires d'une phase très riche en oxyde de bismuth et d'épaisseur très variable (au plus quelques micromètres, mais parfois inférieure à la résolution des microscopes à balayage les plus performants, soit environ  $1\ \text{nm}$ ) ;
- Des petits grains de phases isolantes précipitées entre les grains d'oxyde de zinc, et de taille voisine de  $5\ \mu\text{m}$ .

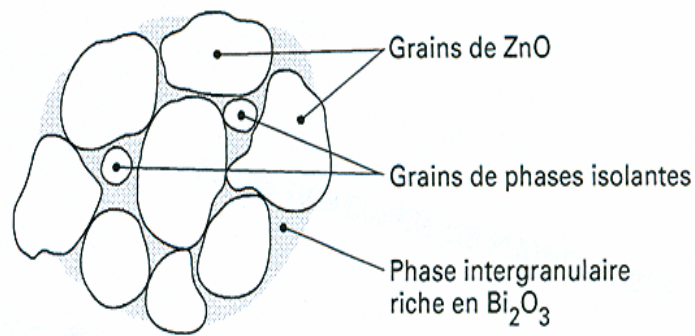


Figure 60 : Microstructure schématisée d'une varistance à base de ZnO.

### (c) Propriétés électriques

La caractéristique  $J(V)$  (figure 61) de ces varistances se divise en quatre parties :

- Dans la région I, la conduction est ohmique ; le coefficient de variation de la tension avec la température vaut de 0.5 à 1 %/K. On y mesure une résistivité voisine de  $10^8 \Omega.m$  ;
- La région II est une région de transition de domaine de tension très variable (environ trois décades en densité de courant) ; la conductance y est aussi thermiquement activée ;
- La région III, seule, présente le caractère de varistance : le coefficient de non linéarité  $\alpha$ , mesuré, en général, à 25 °C entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$  A/cm<sup>2</sup> et parfois entre  $10^{-3}$  et  $10^3$  A/cm<sup>2</sup>, y atteint respectivement des valeurs de 70 et de 30. La tension de seuil  $V_s$  est définie dans cette région ;
- Dans la région IV, apparaît une saturation : la caractéristique  $J(V)$  tend à redevenir ohmique, avec la résistance de la phase principale de ZnO (environ  $10^{-2} \Omega.m$ ).

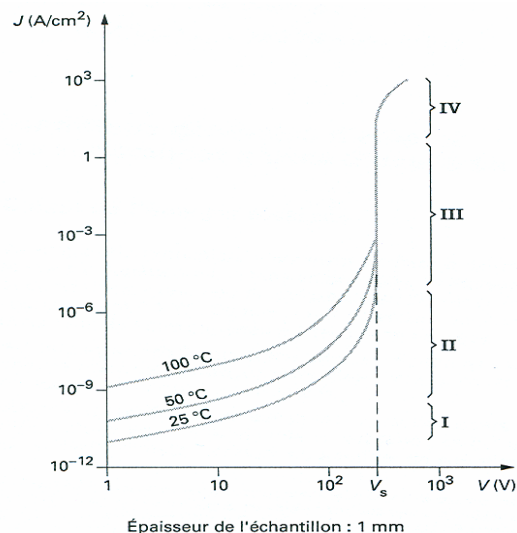


Figure 61 : Caractéristique  $J(V)$  des varistances à ZnO.

Ces propriétés électriques résultent de deux critères :

- La conductivité du ZnO : sa formulation réelle est  $Zn_{1+x}O$  : il est semi-conducteur de type  $N$ , la conductivité étant due aux ions  $Zn^+$  interstitiels. Leur concentration varie suivant les traitements thermiques ; pour des échantillons frittés au-dessus de  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , elle impose des conductivités de l'ordre de  $0.1/(\Omega.m)$  ;
- La limitation de la conduction par des barrières de potentiel de type électrostatique aux joints de grains : les difficultés d'une analyse précise de la structure physico-chimique des joints de grains n'ont pas permis de proposer le modèle théorique de la conduction électrique dans ce matériau polycristallin, plus de dix ans après sa découverte.

Les caractéristiques expérimentales font apparaître une conduction aux environs de  $3\text{ V}$  par barrière. Si l'on considère que la chute de tension  $V_b$  est la même sur la totalité des joints de grains et qu'elle est une constante du matériau, alors la tension de seuil  $V_s$  du composant est donnée par :

$$V_s = N_b V_b = \frac{d}{\bar{g}} V_b \quad (53)$$

Avec  $N_b$  le nombre de joints de grains rencontrés dans le sens du champ électrique,  $d$  l'épaisseur du composant et  $\bar{g}$  la granulométrie moyenne.

## B. Influence du rapport de mélange

### (a) Eprouvettes

Cinq feuilles de dimensions 280\*280\*0.5 mm avec des rapports de mélange de 45, 50, 55, 60 et 70 % en masse d'une poudre à base de ZnO ont été réalisées.

Ces feuilles sont obtenues de la manière suivante :

- On calcule le volume  $V$  de silicone nécessaire pour la réalisation d'une feuille ;
- On pèse la masse  $M$  de ce volume  $V$  ;
- Pour le premier taux de mélange par exemple, on mélange une quantité de silicone correspondant à 55 % de  $M$  et une quantité de la poudre de ZnO correspondant à 45 % de  $M$ .

Le mélange se fait par un procédé de calandrage à froid. Deux cylindres en contact disposés verticalement sont mis en rotation. Le silicone de base sous forme de gomme est poussé entre ces deux cylindres tandis que la poudre à base de ZnO est sous-poudrée par-dessus.

Afin d'évaluer l'influence de l'homogénéité du mélange, chaque feuille est découpée en quatre. On obtient ainsi quatre échantillons pour chaque rapport de mélange (figure 62).

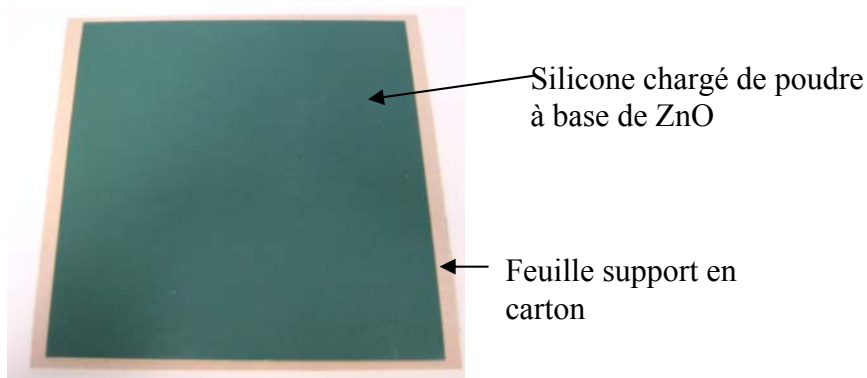


Figure 62 : Feuille de silicone chargée de poudre à base de ZnO.

## (b) Montage et mode opératoire

Le montage réalisé est le montage classique de mesure de la résistivité volumique (figure 63) dont le schéma de principe est donné au chapitre 3, § 3.5.2.3.2.

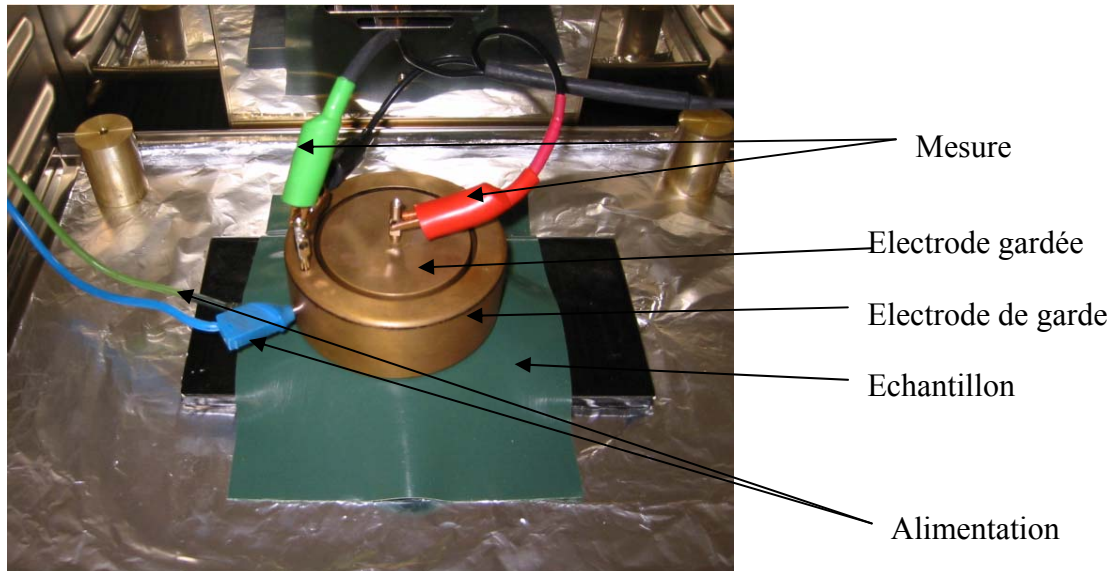


Figure 63 : Mesure de la résistivité volumique de la couche MNL.

Le matériel utilisé :

- Alimentation : source de tension de 1 kV max ;
- Mesure : multimètre en position ampèremètre.

La tension est augmentée progressivement de 0 jusqu'à 100 V par palier de 10 V et un temps de 1min entre deux paliers. De 100 V à 1 kV, elle est augmentée par palier de 20 V.

La figure 64 montre un exemple de caractéristique courant – tension. On voit, sur cette figure, que jusqu'à une tension d'environ 140 V, le courant est très faible (inférieur au  $\mu\text{A}$ ). A partir de cette tension, le courant croît légèrement de l'ordre de la centaine de  $\mu\text{A}$ . A partir d'une tension d'environ 240 V, le courant n'est plus limité que par le débit maximum de la source. Le seuil de non linéarité correspond à cette tension.

Caractéristique courant-tension de l'échantillon N°1 pour un rapport de mélange de 45%.

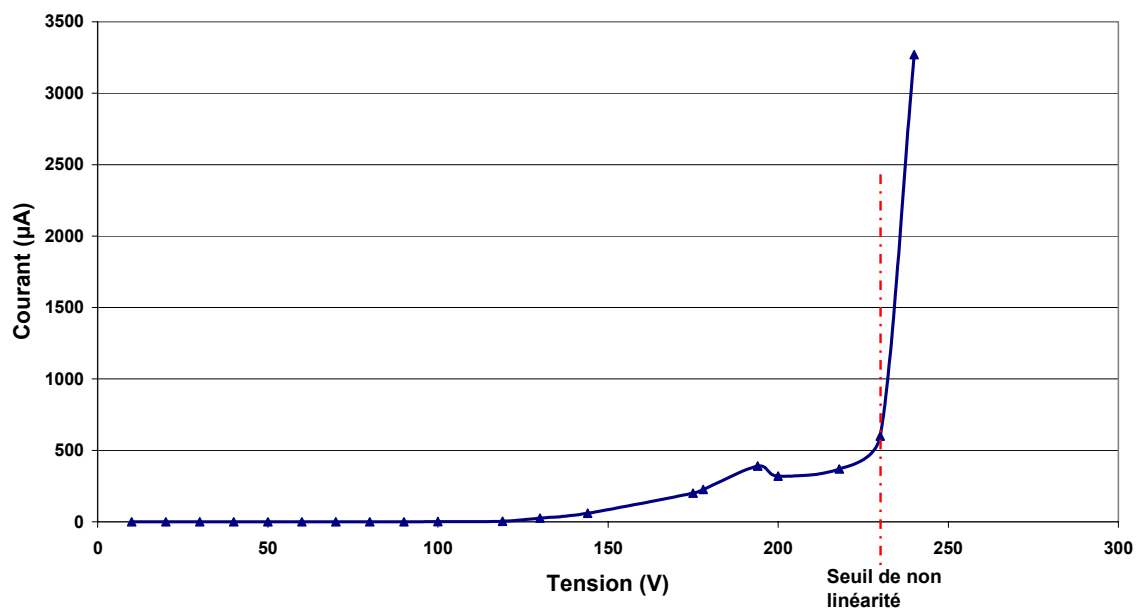


Figure 64 : Exemple de mesure du seuil de non linéarité.

### (c) Résultats

Le tableau 13, ci-dessous, montre les résultats obtenus.

Taux de charge en poudre de ZnO (% en poids)	Echantillons	Epaisseur (mm)	Tension de seuil Vs (kV)	Champ électrique de seuil (kV/mm)	Champ électrique de seuil moyen (kV/mm)	Ecart-type	Ecart-type (%)
45	Echant.1	0,46	0,24	0,52	0,98	0,40	41
	Echant.2	0,6	0,76	1,27			
	Echant.3	0,65	0,88	1,35			
	Echant.4	0,6	0,47	0,78			
50	Echant.1	0,61	0,52	0,85	0,68	0,48	71
	Echant.2	0,55	0,27	0,49			
	Echant.3	0,6	0,63	1,05			
	Echant.4	0,61	0,2	0,33			
55	Echant.1	0,58	0,37	0,64	0,93	0,28	30
	Echant.2	0,62	0,78	1,26			
	Echant.3	0,63	0,6	0,95			
	Echant.4	0,6	0,52	0,87			
60	Echant.1	0,6	0,56	0,93	0,73	0,29	40
	Echant.2	0,62	0,55	0,89			
	Echant.3	0,6	0,32	0,53			
	Echant.4	0,61	0,34	0,56			
70	Echant.1	0,63	0,36	0,57	0,70	0,22	31
	Echant.2	0,63	0,56	0,89			
	Echant.3	0,63	0,48	0,76			
	Echant.4	0,62	0,36	0,58			

Tableau 13 : Résultats des essais de caractérisation de la couche MNL.



La figure 65, ci-dessous, montre l'évolution du champ électrique moyen du seuil de non linéarité et l'écart-type en fonction du taux de charge en poudre à base de ZnO.

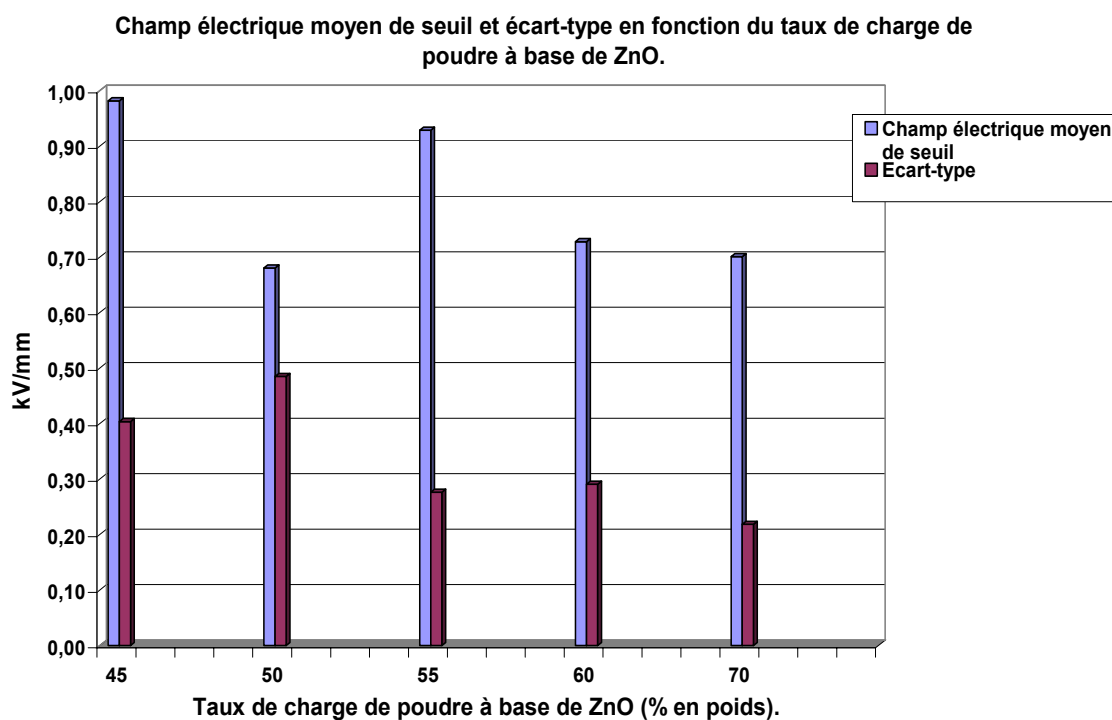


Figure 65 : Seuil de non linéarité en fonction du taux de charge.

On peut constater que le champ électrique de seuil moyen et l'écart-type ont tendance à diminuer avec le taux de charge en poudre à base de ZnO. L'homogénéité du mélange dans le volume semble avoir une grande influence sur les résultats.

## ANNEXES

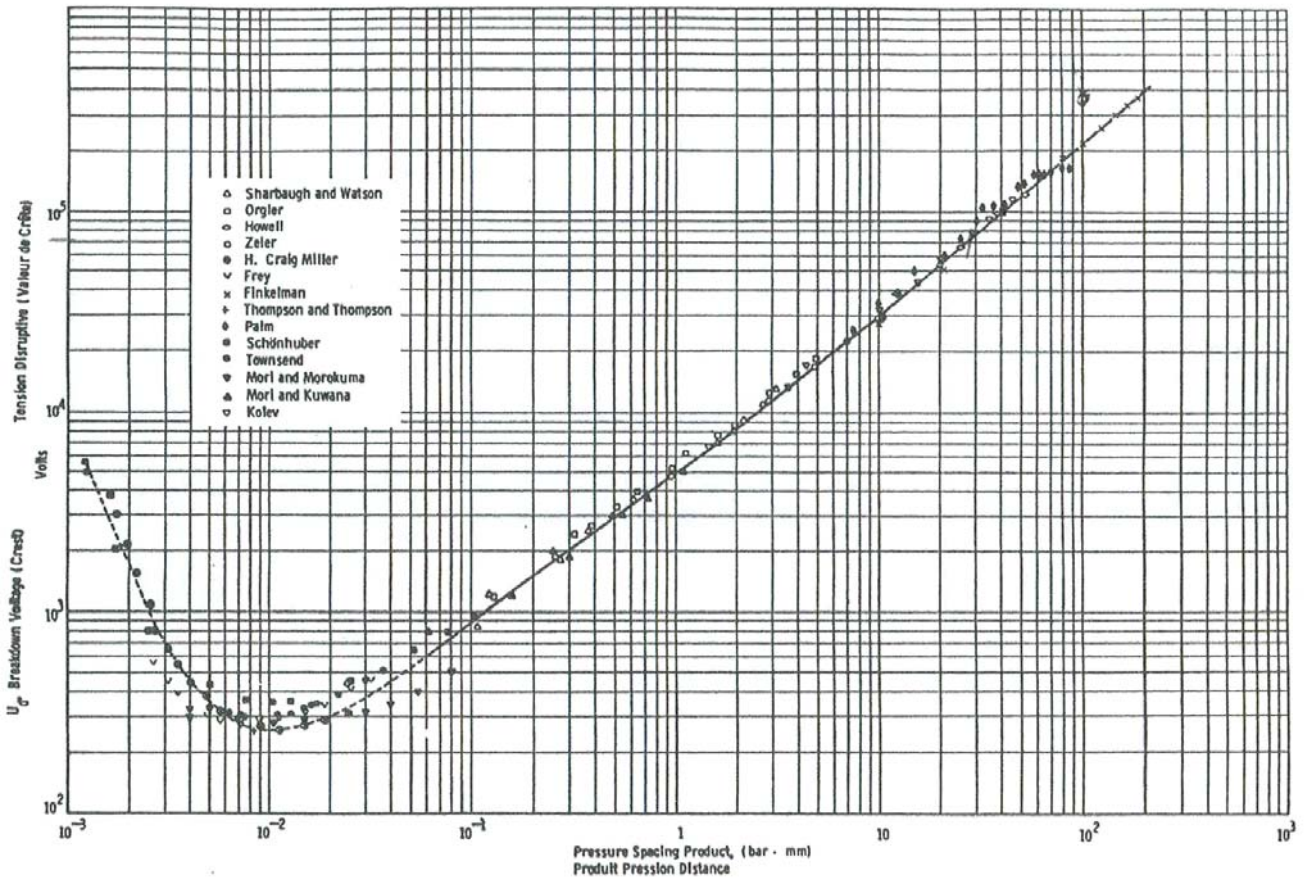
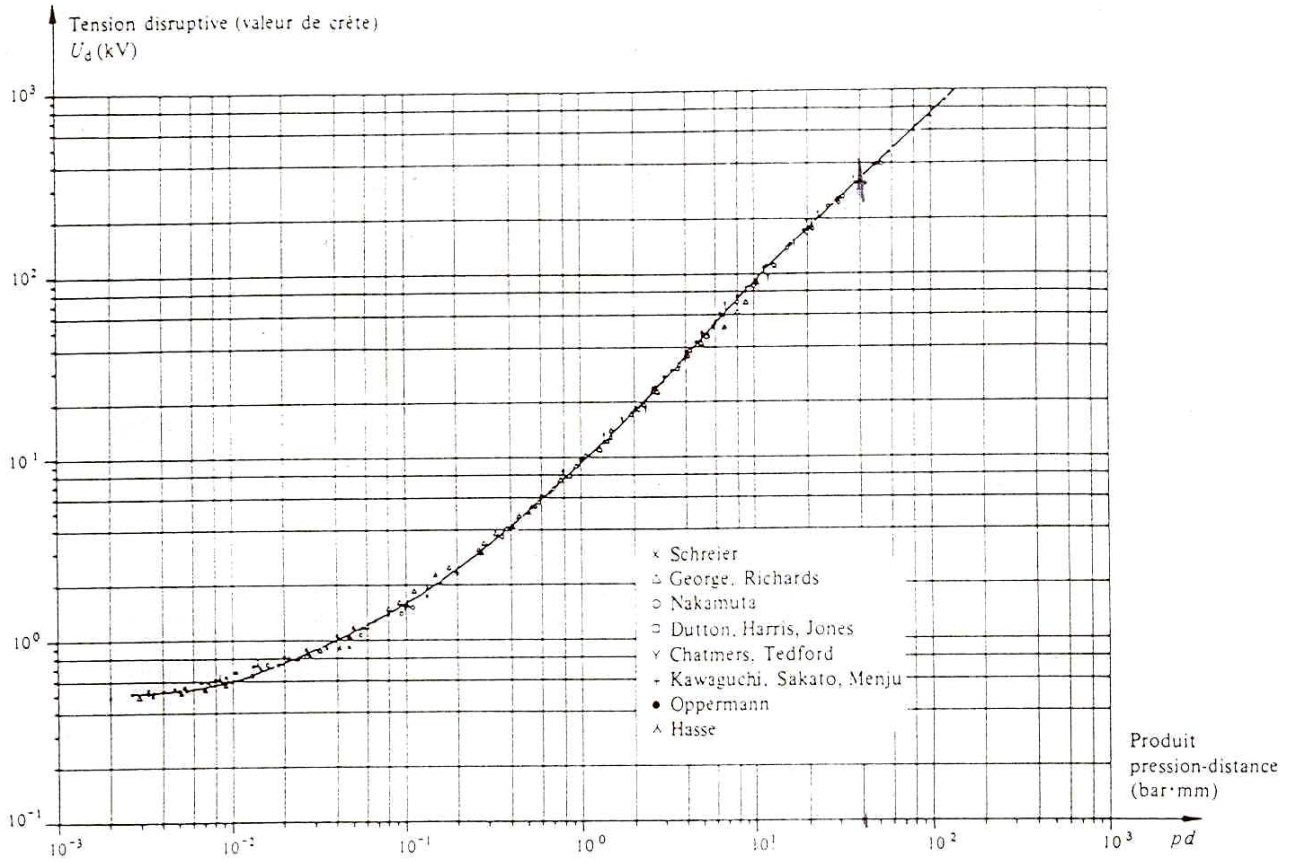


FIGURE B1  
 Courbe de Paschen pour l'azote en échelles logarithmiques. Température 25 °C.  
 Paschen Curve for Nitrogen in log-log scale. Temperature 25 °C.

Figure 66 : Courbe de Paschen pour le  $N_2$ .



Courbe de Paschen pour le  $SF_6$  en échelles logarithmiques. Température 25°C [262].

Figure 67 : Courbe de Paschen pour le  $SF_6$ .

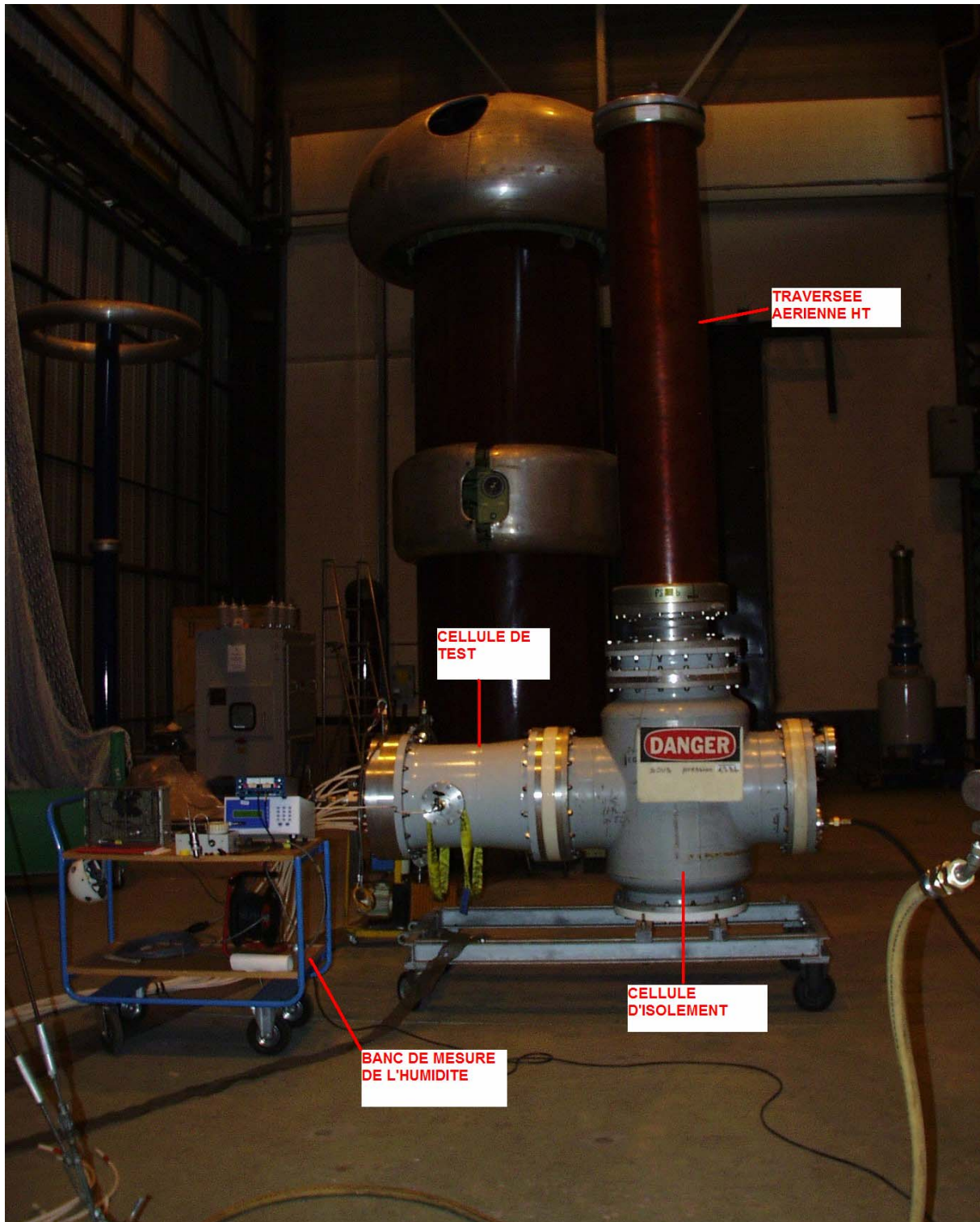


Figure 68 : Maquette d'essais en station diélectrique HT.

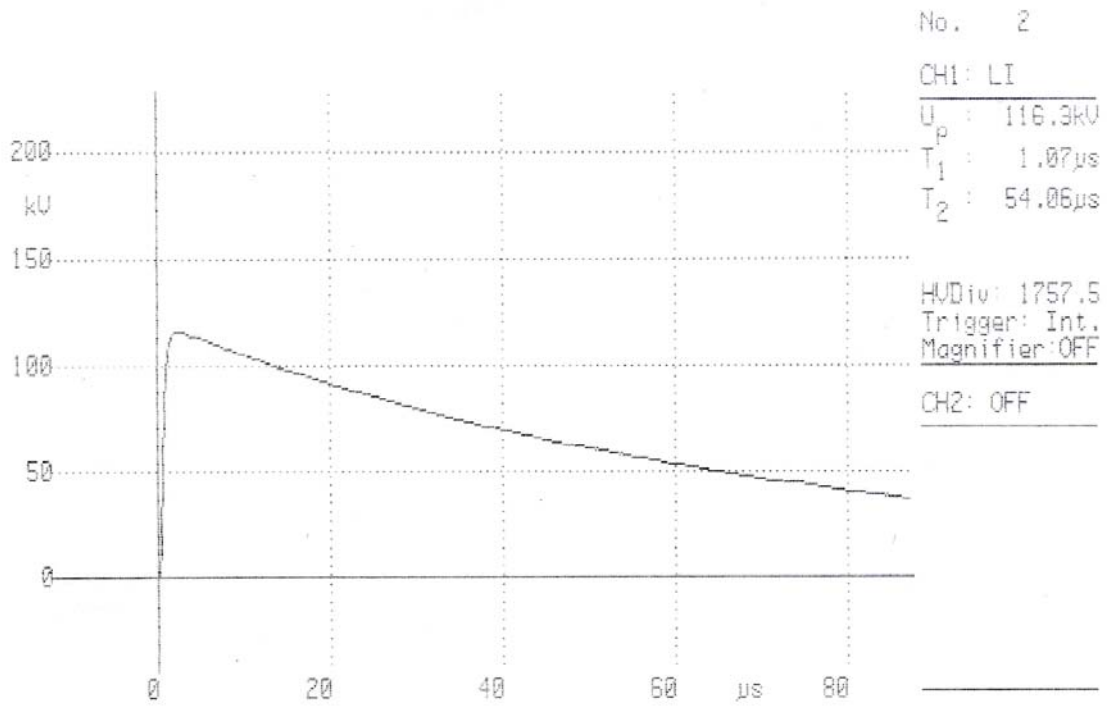


Figure 69 : Forme de la tension de choc appliquée dans la pratique.





Figure 70 : Générateur de Marx..

---

**REFERENCES**

- [1] *"Postes à haute et très haute tensions. Postes sous enveloppe métallique (PSEM)"*, J.P Taillebois, Techniques de l'Ingénieur, D4590.
- [2] *"Atmospheric lifetimes of long-lived halogenated species"*, R. A. Ravishankara, S. Solomon, A. A. Turnipseed, R. F. Warren, Science, Vol. 259, No. 5092, pp. 194-199, January. 8, 1993.
- [3] *"Summary for policymakers and technical summary of the working group I report"*, IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change-IPCC 1995, 1995.
- [4] *"Barriers effect in air-gaps under DC voltage"*, L. Ming, M. Leijon, T. Bengtsson, Proc. Nordic Ins. Symp., pp. 7.2/315-24, Vaasa, Finland, June 13-14, 1994.
- [5] *"Influence of a dielectric barrier on the DC and AC breakdown strength of a point-to-plane gap in air"*, P. A. Bruyn, R. G. van Heeswijk, Conf. Rec., IEEE Int. Symp. Electr. Ins., pp. 234-238, Montreal, Canada, June 11-13, 1984.
- [6] *"Influence of barriers on the lightning and switching impulse strength of mean air gaps in point/plane arrangements"*, A. Beroual, A. Boubakeur, IEEE Trans. Diel. And Electr. Ins., Vol. 26, No. 6, pp. 1130-1139, 1991.
- [7] *"Barrier effect in dielectrics"*, S. M. Lebedev, O. S. Gefle, D. P. Agoris, Yu P. Pokholkov, 6<sup>th</sup> Int. Conf. Prop. And Appl. Diel. Mat, pp. 895-898, Xi'an, China, June 21-26, 2000.
- [8] *"Factors influencing barrier effects in air-gaps"*, L. Ming, M. Leijon, T. Bengtsson, Proc. Int. Symp. High Volt. Eng., pp. No. 2168, Graz, Austria, August 28-Septembre 1, 1995.
- [9] *"Barriers effect on electrical breakdown in air gaps : a theoretical approach"*, F. V. Topalis, L. Stathopoulos, Proc. Int. Symp. High Volt. Eng., pp. No. 2147, Graz, Austria, August 28-Septembre 1, 1995.

- [10] “*Impulse breakdown of compressed gases between dielectric-covered electrodes*”, J. M. K. MacAlpine, A. H. Cookson, Proc. IEE, Vol. 117, No. 3, march 1970.
- [11] “*Impulse Breakdown of Covered Cylinders in SF<sub>6</sub> and SF<sub>6</sub>-Gas Mixtures*”, J.D Morgan, M. Abdellah, IEEE Trans. Electr. Ins., Vol. 23, No. 3, June 1988.
- [12] “*Impulse breakdown characteristics of coated electrodes in SF<sub>6</sub> gas*”, M. Honda, H. Okubo, H. Aoyagi, A. Inui, IEEE/PES Summer meeting, Vol. 2, No. 3, pp. 699-708, Seattle, 1987.
- [13] “*The effect of a thin electrode coating on the AC breakdown of SF<sub>6</sub>*”, A. E. Vlastos, S. Rusck, Int. Symp. High Volt. Eng. III, 1979.
- [14] “*Influence of electrode coating on the breakdown voltage of SF<sub>6</sub>*”, E. Gochenbach, IEE Conf., Publ. 165, pp. 181-184, August, 1978.
- [15] “*Dielectric coating for gas-insulated high-voltage equipment*”, V.N. Borin, I.M Bortnik, Electrical Technology, pp. 38-48, January 1982.
- [16] “*Influence of coatings on the impulse breakdown of SF<sub>6</sub> for electrodes with different surface roughness*”, 7<sup>th</sup> Gas discharges and their applications, pp. 273-276, September 1982.
- [17] “*Insulation performance of dielectric-coated electrodes in sulphur hexafluoride gas*”, IEEE Trans. Electr. Ins., Vol. EI-10, No. 4, December, 1975.
- [18] “*Impulse breakdown of gas-insulated gaps (10%SF<sub>6</sub>/90%N<sub>2</sub>) with thick coated electrodes*”, G. Salge, M. Piomontesi, C. Heitz, F. König, IEEE Annual Report - Conf. Electr. Ins. And Diel. Phenomena, 2000.
- [19] “*Electric field control by polymer foam*”, U. Fromm, Li Ming, T. Walfridsson, L. Kron, A. Liu, R. Windmar, Vasteras, Conduction and Breakdown in Solid Dielectrics, 1998. ICSD '98. Proc. 6<sup>th</sup> IEEE Int. Conf. Solid Dielectrics, 1998.



- [20] “*Electrical Discharge in an Air Gap with Dielectric-Covered Electrodes*”, V. Serdyuk, S. M. Gubanski, J. Blennow, M. Sjöberg, IEEE Annual Report – Conf. Electr. Ins. Diel. Phenomena, 2000.
- [21] “*Impulse performance of air gaps in series with thick insulating layers*”, G. Baldo, G. Pesavento, 5<sup>th</sup> Int. Symp. High Volt. Eng., Braunschweig, pp. 14-25, 1987.
- [22] “*Insulation Performance of Dielectric-Coated Electrodes in Sulphur Hexafluoride Gas*”, D. J. Chee-hing, K. D. Srivastava, IEE Trans., Vol. EI-10, No. 4, pp. 119-124, December, 1975.
- [23] “*Improvement of SF<sub>6</sub> Gas Insulation System by Applying Thick Dielectric-Layered Electrode and its Application to High Voltage Equipment*”, H. Hama, K. Inami, T. Ootsuka, Y. Shimizu, E. Nagao, K. Oosumi, M. Yoshimura, Gaseous Dielectrics X, pp. 319-328, 2004.
- [24] “*Effect of Different Dielectric Coatings in Divergent Fields*”, S. Stangherlin, C. Rein, G. Salge, F. Koenig, Gaseous Dielectrics X, pp. 339-345, 2004.
- [25] “*Effect of the Electrode Coating and the Field Utilization Factor on the Insulation Property of Carbon Dioxide Gas under AC Voltage*”, S. Matsumoto, N. Yokoyama, K. Kiyama, S. Ohtsuka, M. Hikita, Gaseous Dielectrics X, pp. 347-352, 2004.
- [26] R.H Fowler, L. Nordheim, Proc. R. Soc. A, Vol. 119, p 173, 1928
- [27] “*Mécanismes et critères de la rupture diélectrique dans les gaz. Mesure des grandeurs caractéristiques de la décharge. Etude bibliographique*”, A. Rein, ELECTRA N°32.
- [28] “*Electrical breakdown of gases*”, J.M Meek, J.D Craggs, The International Series of Monographs on Physics, Clarendon Press, 1953.
- [29] “*Electron avalanches and breakdown in gases*”, H. Raether, Butterwords, London, 1964.

- [30] “Criteria of spark breakdown in sulphur hexafluoride”, A. Pedersen, IEEE Trans. on Power Appar. Syst., pp. 2043-48, 1970.
- [31] “Review of high-voltage gas breakdown and insulators in compressed gas”, A. Cookson, IEE Proc., Vol. 128, Pt. A, No. 4, May 1981.
- [32] “Gaz isolants”, P. Ségur, Techniques de l’ingénieur, D 2 530.
- [33] “Influence of the repeating times of applying voltage on the field emission”, E. Takahashi, A. Ebe, K. Ogata, Y. Hayashi., IEEE, Conf. on Electr. Ins. Diel. Phenomena Annual report, San Francisco, October, 1996.
- [34] “The Effect of Surface Roughness on Breakdown in SF<sub>6</sub>”, A. Pedersen, IEEE Trans., PAS-94, pp. 1769-1774, 1975.
- [35] “Onset or Breakdown Voltage Reduction by Electrode Surface Roughness in Air and SF<sub>6</sub>”, S. Berger et al., IEEE, Vol. PAS-95, No. 4, pp. 1073-1079, 1976.
- [36] “Area effect on the electrical breakdown of compressed SF<sub>6</sub> insulated systems”, C. Masetti, B. Parmigiani, 3<sup>rd</sup> Int. Symp. High Volt. Eng., pp. 32-15, Milan, 1979.
- [37] “Electrical breakdown for uniform fields in compressed gases”, A. Cookson, Proc. IEE, 117, (1), pp. 269-280.
- [38] “Compressed gas insulation in large coaxial systems”, H. C. Jr. Doepken, IEE Trans., PAS-88, pp. 364-369.
- [39] “Calculation of Breakdown Voltage of Short Air Gaps”, H. R. Hiziroglu, S. A. Sebo, IEEE Annual Report – Conf. Electr. Ins. Dielectr. Phenomena, 2000.
- [40] “Onset Voltage of Corona in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures”, M. M. El-Bahy, IEEE Annual Report – Conf. Electr. Ins. Dielectr. Phenomena, 2000.
- [41] “Protection contre les perturbations”, M. Graciet, J. Pinel, Techniques de l’ingénieur D 5 171.

- [42] “*Parafoudres*”, F. Maciela, Techniques de l’ingénieur D 4 755.
- [43] “*The Change of Starting Potential of short Gap Discharge as a function of Time in  $N_2+NO$  Gases*”, K. Itoyama, T. Nishimura, T. Yanobe, IEEE Annual Report - Conf. Electr. Ins. Diel. Phenomena, Mineapolis, October, 1997.
- [44] “*Numerical Modeling of an Electron Avalanche in Oxygen by a Particle Method*”, C. Soria, F. Pontiga, A. Castellanos, IEEE Annual Report - Conf. Electr. Ins. Diel. Phenomena, Mineapolis, October, 1997.
- [45] “*Calculation of Discharge Inception Voltages in Argon +  $SF_6$  mixtures*”, H. R. Hiziroglu, M. S. Dincer, IEEE Annual Report - Conf. Electr. Ins. Diel. Phenomena, Mineapolis, October, 1998.
- [46] “*Computer Simulation of Transient Discharges in Oxygen Using a Variable-Size Particle-Mesh Method*”, C. Soria, F. Pontiga, A. Castellanos, IEEE Annual Report - Conf. Electr. Ins. Diel. Phenomena, Mineapolis, October, 1998.

---

**TITRE en Français****ETUDE DIELECTRIQUE D'UNE ISOLATION HYBRIDE GAZ-SOLIDE POUR APPAREILLAGE HAUTE TENSION.****RESUME**

---

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche d'une alternative à l'utilisation du gaz hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) dans l'appareillage électrique Haute Tension et plus particulièrement les postes à isolation gazeuse. Ce gaz possède de bonnes propriétés diélectriques mais son potentiel de réchauffement global (GWP) est estimé à 23900 fois celui du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Malheureusement, les gaz dits simples tels que l'azote (N<sub>2</sub>) présentent une tenue diélectrique deux à trois fois plus faible que celle du SF<sub>6</sub>.

Dans le but d'améliorer la tenue diélectrique du système, on se propose d'appliquer sur les conducteurs un revêtement isolant à base de silicone constitué d'une sous-couche semi-conductrice d'épaisseur 0.5 mm et d'une couche isolante d'épaisseur 1.5 mm, afin de limiter ou supprimer le rôle des électrons du métal.

Les essais diélectriques réalisés sous une tension de choc de foudre dans des conditions expérimentales proches de la pratique industrielle montrent qu'en présence de N<sub>2</sub> la tenue diélectrique du système avec revêtement est régie par le gaz. Par conséquent, l'application du revêtement sur les conducteurs diminue la tenue diélectrique du système (effet capacitif).

Ces essais montrent, cependant, qu'il est possible d'améliorer la tenue diélectrique du système avec le revêtement, en présence de SF<sub>6</sub> en polarité négative. Les paramètres importants semblent être la propreté du gaz, le degré d'ionisation du gaz et surtout les charges qui se déposent à l'interface gaz-revêtement qui, dans certaines conditions, ont un effet bénéfique : ce dernier résultat donne une piste aux travaux futurs.

---

**TITRE en anglais****DIELECTRIC STUDY OF A GAS-SOLID HYBRID INSULATION FOR HIGH VOLTAGE APPARATUS.**

---

**RESUME en anglais**

This work deals with a way of substituting the sulphur hexafluoride gas (SF<sub>6</sub>) used in High Voltage apparatus especially in Gas Insulated Substations (GIS). This gas has good dielectric properties but its Global Warming Potential (GWP) is estimated to 23,900 times greater than the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Unfortunately, simple gases such as nitrogen (N<sub>2</sub>) present a dielectric withstand two or three times lower than SF<sub>6</sub>.

To improve the system dielectric withstand, an insulating coating based on silicone and composed of a first 0.5 mm thick semi-conducting layer and a second 1.5 mm thick insulating layer is applied on the system's conductors in order to limit or suppress the role of electrons emitted by the metal.

The experimental investigations, made with Lightning Impulse Voltage and under conditions close to the industrial practice, show that with N<sub>2</sub> the coated system dielectric withstand is controlled by the gas. Consequently, applying an insulating coating on the conductors reduces the system dielectric withstand (capacitive effect).

These investigations show, however, that it is possible to improve the system dielectric withstand with the coating in case of SF<sub>6</sub> under negative Lightning Impulse Voltage. The gas cleanliness, the gas ionisation and most of all the charges which remain on the gas-coating interface seem to be important parameters. These charges have under certain conditions a beneficial effect. This last result gives a track for further work.

---

**DISCIPLINE**

ELECTRONIQUE, OPTRONIQUE ET SYSTEMES

---

**MOTS-CLES / KEY-WORDS**

Isolation gazeuse, haute tension, tenue diélectrique, SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, revêtement isolant, interface isolant solide – gaz.

Gaseous Insulation, High Voltage, Dielectric Withstand, SF<sub>6</sub>, N<sub>2</sub>, Insulating Coating, Solid-gas Interface.

---

**INTITULE ET ADRESSE DE L'U.F.R. OU DU LABORATOIRE :**

Institut d'Electronique du Sud – Groupe Energie et Matériaux, Université Montpellier II  
CC079, Place Eugène Bataillon  
34095 Montpellier Cedex 05