



HAL
open science

Caractérisation de matériaux écologiques en vue du remplacement du SF6 dans les systèmes d'isolation moyenne tension

Ngoc Minh Nguyen

► **To cite this version:**

Ngoc Minh Nguyen. Caractérisation de matériaux écologiques en vue du remplacement du SF6 dans les systèmes d'isolation moyenne tension. Autre. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : 2011GRENT035 . tel-00629505

HAL Id: tel-00629505

<https://theses.hal.science/tel-00629505>

Submitted on 6 Oct 2011

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

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

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie électrique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Ngoc Minh NGUYEN

Thèse dirigée par M. **Olivier LESAINT** et
codirigée par Mme. **Nelly BONIFACI** et M. **André DENAT**

préparée au sein du **Laboratoire de Génie électrique de Grenoble**
dans l'**École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique &
Traitement du Signal**

**Caractérisation de matériaux écologiques
en vue du remplacement du SF₆ dans les
systèmes d'isolation moyenne tension**

Thèse soutenue publiquement le **8 Mars 2011**,
devant le jury composé de :

M. Serge AGNEL

Professeur à l'Université de Montpellier 2, Président

M. François BURET

Professeur à l'Ecole Centrale de Lyon, Rapporteur

M. Mohammed YOUSFI

Directeur de recherche, CNRS Toulouse, Rapporteur

M. Mehrdad HASSANZADEH

Ingénieur de recherche, Schneider Electric Montpellier, Examineur

M. Olivier LESAINT

Directeur de recherche, CNRS Grenoble, Directeur de thèse

Mme. Nelly BONIFACI

Chargé de recherche, CNRS Grenoble, Co-encadrant

M. André DENAT

Directeur de recherche, CNRS Grenoble, Membre-invité



A ma famille

A ma femme Đỗ Nguyệt Minh

REMERCIEMENTS

Cette thèse a été effectuée au sein de l'équipe Matériaux Diélectriques et Electrostatique (MDE) du laboratoire Génie électrique de Grenoble (G2Elab).

Tout d'abord, je voudrais adresser mes sincères remerciements, de tout mon cœur, à mes trois encadrant au laboratoire G2Elab, Olivier LESAIN, Nelly BONIFACI et André DENAT. Ils m'ont donné plusieurs idées, conseils et encouragements pour accomplir ce travail et ils m'ont toujours supporté dès le début jusqu'à la fin. Je suis touché de tous ce qu'ils ont fait pour moi pendant les années au laboratoire.

Je tiens à remercier Monsieur Serge AGNEL d'avoir accepté de présider le jury. Je tiens également à remercier Monsieur François BURET et Monsieur Mohammed YOUSFI d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime également ma gratitude à Monsieur Mehrdad HASSANZADEH de Schneider Electric Montpellier d'avoir suivi ce travail dès le début et d'avoir participé au jury. Il a apporté plusieurs contributions à cette thèse, notamment au point de vue industriel.

Mes remerciements s'adressent également à tous les personnels de l'équipe MDE, notamment Lucian SARAGOSSI, Alain TISSERAND, Jean-Luc PALENZUELA, François MONTANVERT, Claire ROUX, Geneviève TEISSEDRE et Julien BAMBEGGER. Ils m'ont aidé plusieurs fois à résoudre différents problèmes techniques ou administratifs pendant la thèse.

Je tiens à remercier les personnels du service DRC de Schneider Electric Montpellier (ex Areva T&D), notamment Wassim DAOUD et Sylvain MARTINEZ, d'avoir m'accueilli chaleureusement pendant mes plusieurs séjour à Montpellier.

Je remercie chaleureusement tous les collègues doctorants, post-doc, stagiaires... de l'équipe MDE, qui ont partagé avec moi l'ambiance conviviale pendant quatre ans au laboratoire. Je les souhaite une bonne continuation et une belle carrière.

Je voudrais également remercier tous mes amis vietnamiens à Grenoble, notamment Doanh, Châu, Tuấn, Hoan, Thu Nhi... Ils m'ont beaucoup aidé dans le travail ainsi que dans la vie.

Et enfin, mes derniers mots s'adressent à ma famille :

Xin cảm ơn bố, mẹ, em Tiến và gia đình đã luôn ủng hộ và động viên tôi dù trong bất kì hoàn cảnh nào. Xin đặc biệt cảm ơn vợ tôi, Đỗ Nguyệt Minh, người luôn ở bên tôi, người đã động viên và cho tôi động lực để hoàn tất công trình nghiên cứu này.

Grenoble, Juin 2011

Table des matières

Table des matières	i
Table des figures	v
Introduction	1
Chapitre I Position du problème	3
I.1 Le SF₆ et son utilisation dans l'industrie électrique	3
I.1.1 Propriétés du SF ₆	3
I.1.2 SF ₆ et l'effet de serre.....	4
I.2 Réduction et remplacement du SF₆ – état de l'art	5
I.2.1 Récupération et recyclage du SF ₆	5
I.2.2 Optimisation de la conception des appareillages	6
I.2.3 Utilisation des mélanges de SF ₆	7
I.2.4 Gaz de remplacement du SF ₆ – état de l'art.....	8
I.3 L'objectif de la thèse	11
I.3.1 Disjoncteur moyenne tension à coupure dans le vide	11
I.3.2 Ampoule à vide et son isolation externe	12
I.3.3 Cahier des charges imposé.....	13
I.4 Simulation de champ autour d'une ampoule à vide	13
I.4.1 Hypothèses adoptées et conditions aux limites	14
I.4.2 Maillage	15
I.4.3 Résultats de simulation	15
I.5 Solutions proposées et objectifs de la thèse	17
Chapitre II Esters biodégradables	19
II.1 Etude bibliographique	20
II.1.1 Présentation des esters biodégradables	20
II.1.2 Tenue diélectrique des esters mesurée par des méthodes normalisées	21
II.1.2.1 Tenue diélectrique des esters filtrés en fonction de la teneur relative en eau	21
II.1.2.2 Influence des particules solides	23
II.1.2.3 Limites des essais normalisés CEI60156.....	25
II.1.3 Phénomènes précurseurs de type « streamer »	26
II.1.4 Génération des streamers.....	27

II.1.4.1 Conditions locales de génération	27
II.1.4.2 Champ de génération : « effet d'échelle »	28
II.1.4.3 Conditions favorables à la comparaison de différents liquides.....	30
II.1.5 Propagation des streamers	31
II.1.5.1 Généralité sur la propagation de streamers dans les liquides.....	31
II.1.5.2 Streamers dans l'ester naturel RS50.....	32
II.1.5.3 Méthodes de caractérisation de différents liquides	35
II.2 Techniques expérimentales	35
II.2.1 Configurations d'électrodes.....	35
II.2.2 Cellule d'essai.....	36
II.2.3 Générateur d'impulsion	36
II.2.4 Système de mesure de courant.....	37
II.2.5 Système de visualisation.....	38
II.2.6 Schéma général.....	39
II.2.7 Mesures de claquage dérivées de la norme CEI60156	39
II.3 Résultats sur la génération de streamers	40
II.3.1 Génération sous tension impulsionnelle	40
II.3.1.1 Probabilité de génération	40
II.3.1.2 Temps de retard à la génération.....	42
II.3.1.3 Influence de la teneur en eau	43
II.3.2 Génération en tension alternative	45
II.3.3 Comparaison des divers liquides	46
II.4 Résultats sur la propagation des streamers	46
II.4.1 Longueur d'arrêt et vitesse moyenne des streamers dans les esters.....	48
II.4.2 Influence de la teneur en eau sur la vitesse de propagation des streamers.....	52
II.4.3 Tension de claquage et comparaison avec l'huile minérale.....	53
II.5 Application à l'isolation d'une ampoule à vide, comparaison avec le SF₆	55
II.5.1 Champ quasi-uniforme	56
II.5.2 Champ non uniforme	56
II.5.3 Autres contraintes techniques	58
II.6 Conclusions.....	59
Chapitre III Mélanges CF₃I/N₂ en champ quasi uniforme	61
III.1 Etude bibliographique	62
III.1.1 Physique des décharges dans les gaz en champ uniforme	62
III.1.1.1 Avalanches électroniques et décharges de Townsend.....	62
III.1.1.2 Loi de Paschen	63
III.1.1.3 Modèle analytique pour calculer la tension de claquage de gaz électronégatifs	65
III.1.2 Gaz CF ₃ I et mélanges CF ₃ I/N ₂	66
III.1.2.1 Propriétés chimiques et impacts environnementaux du CF ₃ I.....	67

III.1.2.2 Paramètres physiques de CF_3I et mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$	68
III.1.2.3 Tension de claquage du CF_3I et ses mélanges – état de l’art.....	72
III.2 Techniques expérimentales.....	73
III.2.1 Cellule d’essai	74
III.2.2 Circuit du gaz	75
III.2.3 Circuit électrique	75
III.2.4 Procédure de préparation de mélanges	75
III.2.5 Calculs du taux optimal de CF_3I dans un mélange	76
III.2.5.1 Pression maximum d’un mélange sans liquéfaction de CF_3I	77
III.2.5.2 Optimisation du taux de CF_3I	78
III.3 Résultats obtenus en champ quasi uniforme.....	79
III.3.1 Tension de claquage du CF_3I en champ quasi-uniforme	79
III.3.2 Mélanges $\text{CF}_3\text{I} - \text{N}_2$	80
III.3.3 Mélanges $\text{CF}_3\text{I} - \text{CO}_2$	82
III.3.4 Comparaison avec mélange $\text{SF}_6 - \text{N}_2$	83
III.3.5 Produits de décomposition	85
III.3.5.1 Apparition de particules solides	85
III.3.5.2 Nature des produits de décomposition solides et gazeux	86
III.3.5.3 Influence sur la conductivité	87
III.3.5.4 Influence des particules sur la tension de claquage.....	90
III.4 Conclusions	90
Chapitre IV Etude de CF_3I et mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en champ non uniforme	92
IV.1 Etude bibliographique.....	92
IV.1.1 Décharges électriques dans les gaz en champ non uniforme.....	92
IV.1.1.1 Décharge « streamer »	92
IV.1.1.2 Transition au « Leader »	94
IV.1.1.3 Influence de la pression et de l’onde de tension appliquée	95
IV.1.2 Comportement du SF_6 et des mélanges en champ non uniforme	98
IV.1.3 CF_3I et ses mélanges en champ non uniforme	99
IV.2 Techniques expérimentales.....	103
IV.2.1 Configuration d’électrode et cellule d’essai	103
IV.2.2 Forme de tension utilisée	103
IV.2.3 Enregistrement du courant	104
IV.2.4 Enregistrement de l’image	105
IV.2.5 Préparation des mélanges.....	105
IV.2.6 Mesure de la tension d’apparition de décharge (VDP)	105
IV.2.7 Mesure de la tension de claquage (V_c)	106
IV.3 Résultats obtenus en champ non uniforme.....	107
IV.3.1 Mélanges SF_6/N_2	107

IV.3.2 Comparaison CF ₃ I, SF ₆ et N ₂	108
IV.3.3 Résultats obtenus avec les mélanges CF ₃ I/N ₂	111
IV.3.4 Produit de décomposition.....	113
IV.4 Conclusions	114
Chapitre V Validation des systèmes d'isolation	116
V.1 Isolation d'une ampoule à vide par les liquides.....	116
V.1.1 Cellule d'essai	116
V.1.2 Cahier des charges imposé	119
V.1.3 Procédure d'essais	119
V.1.4 Résultats de validation.....	119
V.2 Isolation extérieure du disjoncteur par des mélanges CF₃I/N₂	120
V.2.1 Cahier des charges imposé	122
V.2.2 Procédure d'essais	122
V.2.3 Résultats des tests.....	123
V.2.4 Influence du taux de CF ₃ I dans le mélange	126
V.3 Conclusions	128
Conclusions générales	130
Perspectives	133
Annexes.....	134
Références bibliographiques	139

Table des figures

Fig. I-1 Tenue diélectrique du SF ₆ comparé à différents matériaux en champ uniforme	3
Fig. I-2 Emission annuelle du SF ₆ et la concentration du SF ₆ dans l'atmosphère	5
Fig. I-3 Evolution du champ réduit critique et tension de claquage en champ uniforme de mélanges de SF ₆ avec N ₂ , CO ₂ et air en fonction du taux de SF ₆	7
Fig. I-4 Comparaison du champ réduit critique et point d'ébullition de différents gaz.	10
Fig. I-5 Evolution du marché de disjoncteur MT en Europe	11
Fig. I-6 Principe d'une ampoule à vide et exemple de son emplacement dans un disjoncteur.....	12
Fig. I-7 Conditions initiales de simulation et régions de « point triple »	14
Fig. I-8 Maillage effectué autour du point triple	15
Fig. I-9 Distribution de champ dans l'ampoule à vide	16
Fig. I-10 Distribution de champ autour du chemin critique AB.....	17
Fig. II-1 Biodégradabilité de différents liquides	21
Fig. II-2 Teneur en eau à saturation des esters et de l'huile minérale	22
Fig. II-3 Comparaison de tenue diélectrique entre ester naturel, ester synthétique et l'huile minérale	23
Fig. II-4 Tenue diélectrique de l'huile minérale dans les deux cas : non filtré et filtré par membrane de 0,2 µm	24
Fig. II-5 Tension de claquage de l'ester naturel RS50 et l'huile minérale Univolt 54 en fonction de la teneur en eau en présence et non présence de particules cellulose	25
Fig. II-6 Streamer négatif dans l'huile minérale suivi par caméra à balayage de fente (a), par caméra à intensificateur (b) et, oscillogramme de la charge et de la lumière émise par le streamer (c). U = 418 kV, D = 35cm	26
Fig. II-7 Champ « macroscopique » de génération des streamer dans l'huile minérale en fonction du rayon de courbure d'électrode	28
Fig. II-8 Champ de génération du streamer sous tension impulsionnelle en fonction du rayon de courbure de l'électrode,	29
Fig. II-9 Influence de l'eau sur la génération de streamer dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et alternative	30
Fig. II-10 Vitesse moyenne des streamers positifs dans l'huile minérale, seuils de tension de claquage U _c et tension d'accélération U _a . D=10cm	32
Fig. II-11 Longueur d'arrêt et vitesse de propagation dans l'ester naturel RS50 en polarité positive (a) et polarité négative (b). D=10cm.	33
Fig. II-12 Comparaison de tension d'accélération RS50 et l'huile minérale [52].....	34
Fig. II-13 Tension de claquage V _c RS50 / V _c HM [52]	35
Fig. II-14 Cellule d'essais	36
Fig. II-15 Schéma équivalent du générateur de Marx	37
Fig. II-16 Système de mesure de courant	38
Fig. II-17 Vue d'ensemble du banc d'essais.....	39
Fig. II-18 Configuration d'électrode pour l'étude de la génération de streamer	40

Fig. II-19 Probabilité de génération de streamer en polarité positive, $D = 2\text{cm}$, rayon de courbure de la tige $R = 4\text{mm}$	41
Fig. II-20 Probabilité de génération de streamer en polarité négative, $D = 2\text{cm}$, rayon de courbure de la tige $R = 4\text{mm}$	41
Fig. II-21 Temps de retard et temps de propagation des streamers dans l'ester synthétique, configuration tige – plan, distance interélectrode 20 mm ,	42
Fig. II-22 Temps de retard à génération	43
Fig. II-23 Probabilité de claquage d'huile FR3 sèche et très humide.....	44
Fig. II-24 Temps de retard dans les deux cas : huile FR3 sèche et huile très humide.....	44
Fig. II-25 Tension de claquage en fonction de la teneur en eau relative HR.....	45
Fig. II-26 Champ de génération de streamer en fonction du rayon de courbure de l'électrode	46
Fig. II-27 Configuration d'électrode pour étudier la propagation	47
Fig. II-28 Exemples d'enregistrements d'images et de courants :	48
Fig. II-29 Longueur d'arrêt et vitesse moyenne de propagation de streamer en polarité positive, $D = 10\text{ cm}$	49
Fig. II-30 Longueur d'arrêt et la vitesse moyenne de propagation de streamer en polarité négative, $D = 10\text{ cm}$. ..	50
Fig. II-31 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{ cm}$).....	51
Fig. II-32 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2\text{ cm}$).....	52
Fig. II-33 Vitesse de propagation de streamers dans l'ester naturel FR3 sec et humide	53
Fig. II-34 Probabilité de claquage mesurée à la distance 5 cm et 10cm en polarité positive.	54
Fig. II-35 Tension de claquage mesurée sous impulsion positive et négative	55
Fig. II-36 Comparaison entre ester et SF_6 en champ quasi uniforme, distance interélectrode fixe 1mm	56
Fig. II-37 Comparaison entre ester et SF_6 en configuration pointe – plan et polarité positive de la tension.	57
Fig. III-1 Courbe Paschen pour l'air et SF_6 en échelles logarithmiques, température 200C	65
Fig. III-2 Coefficient d'ionisation efficace en fonction du champ critique pour CF_3I et mélanges $\text{CF}_3\text{I-N}_2$	68
Fig. III-3 Champ critique réduit de mélanges $\text{CF}_3\text{I-N}_2$ en fonction du taux de CF_3I	70
Fig. III-4 Figure de mérite M en fonction de $(E/P)_{\text{lim}}$ pour les gaz et mélanges de gaz très électronégatifs	71
Fig. III-5 Tension de claquage de CF_3I en valeur efficace, configuration sphère – sphère, distance $D = 1\text{mm}$...	72
Fig. III-6 Tenue diélectrique des mélanges $\text{CF}_3\text{I/N}_2$, $\text{CF}_3\text{I/air}$ [70], $\text{CF}_3\text{I/CO}_2$ [65] et SF_6/N_2 [69] ; $d=10\text{mm}$, $P=1$ bar, champ quasi-uniforme (sphère-sphère ou sphère-plan).	73
Fig. III-7 Cellule de mesure et photographie du banc d'essai	74
Fig. III-8 Pression de vapeur saturante du CF_3I et du SF_6	76
Fig. III-9 Pression de liquéfaction et champ réduit critique des mélanges $\text{CF}_3\text{I/N}_2$ en fonction du taux de CF_3I pour $T=-40^\circ\text{C}$	78
Fig. III-10 V_c de CF_3I et SF_6 . $D = 0,7\text{ mm}$	79
Fig. III-11 V_c des mélanges à 50%, 25% et mélange 10% de CF_3I dans N_2 , $D = 0,75\text{ mm}$	80
Fig. III-12 Courbes $(E/P)_{\text{lim}}$ en fonction du pourcentage de CF_3I dans N_2	81
Fig. III-13 Courbes $V_c(Pd)$ pour différents mélanges à de CF_3I dans N_2 , $D = 0,75\text{ mm}$	82

Fig. III-14 $V_c(Pd)$ pour des mélanges à 50% et 25% de CF_3I dans CO_2 (haut) et mélanges à 10% de CF_3I dans CO_2 et CO_2 pur (bas), $D = 0,75$ mm	83
Fig. III-15 $V_c(Pd)$ pour des mélanges à 25% de SF_6 et 25% de CF_3I dans N_2 , $D = 0,75$ mm	84
Fig. III-16 Influence du taux de CF_3I et SF_6 pour $Pd=2mm.bar$ et $Pd = 4mm.bar$	84
Fig. III-17 Surface des électrodes en fonction des claquages à différentes pressions de CF_3I	86
Fig. III-18 Produits de décomposition de CF_3I soumise aux DP.....	87
Fig. III-19 Courant de conduction mesuré dans l'état d'électrode « sale »	88
Fig. III-20 Courbes courant-tension successives dans le CF_3I , $d=0,75mm$ et $P=3bar$	89
Fig. III-21 Courbes courant-tension successives dans le SF_6 , $d=0,75$ mm et $P=3bar$	89
Fig. III-22 Influence de particules sur la tension de claquage de CF_3I	90
Fig. IV-1 Distorsion du champ dans l'espace interélectrode dû aux charges d'espace d'une avalanche électronique	93
Fig. IV-2 Développement d'un leader dans le SF_6 , pression 1,5 bar, tension 200 kV.	95
Fig. IV-3 Régimes de claquage sous champ divergent en fonction de la pression	96
Fig. IV-4 Distribution de la charge d'espace en géométrie pointe/plan (pointe positive)	97
Fig. IV-5 Distribution de la charge d'espace en géométrie pointe/plan (pointe négative)	97
Fig. IV-6 Tenue diélectrique en configuration tige – plan de SF_6 , air et N_2	98
Fig. IV-7 Tension de claquage en fonction du taux de SF_6 dans la configuration tige-plan et sous tension impulsionnelle	99
Fig. IV-8 Tension de claquage de CF_3I et SF_6 , géométrie pointe plan.....	99
Fig. IV-9 La comparaison de la tension de claquage de CF_3I et SF_6 à différentes pressions, géométrie pointe plan, distance 10mm entre les électrodes, tension AC [85]	100
Fig. IV-10 Temps de retard au claquage de CF_3I et SF_6 en champ non uniforme et polarité positive (a) et polarité négative (b)	101
Fig. IV-11 Propagation de décharge dans CF_3I et SF_6 en polarité positive et en polarité négative, distance interélectrode 10 mm [98].....	102
Fig. IV-12 Cellule d'essais et le système d'électrode pointe – plan.....	103
Fig. IV-13 Choc de foudre normalisé 1,2/50 μs (défini par la norme CEI60060-1)	104
Fig. IV-14 Photographie et courant enregistrés (a) lors d'une décharge partielle dans le CF_3I à 1 bar et, (b) lors d'un claquage dans le CF_3I à 2,9 bars.....	106
Fig. IV-15 Probabilité de claquage de N_2 , CF_3I et SF_6 , pression 1 bar, polarité positive.....	106
Fig. IV-16 Tension d'apparition de décharge partielle VDP (a) et tension de claquage V_c (b) de N_2 , SF_6 et mélanges SF_6/N_2	107
Fig. IV-17 Comparaison de la tension d'apparition de décharge et tension de claquage de CF_3I , SF_6 et N_2 en polarité positive	108
Fig. IV-18 Comparaison de la tension d'apparition de décharge et tension de claquage de CF_3I , SF_6 et N_2 en polarité négative.....	109
Fig. IV-19 : $(E/N)_{lim}$ en fonction de la température pour SF_6 , air [90] et CF_3I	110
Fig. IV-20 Comparaison de la tension d'apparition de décharge partielle de mélanges CF_3I/N_2 en polarité positive (a) et polarité négative (b)	111
Fig. IV-21 Tension de claquage de mélanges CF_3I/N_2 en polarité positive	112

Fig. IV-22 Tension de claquage de mélanges CF_3I/N_2 en polarité négative	113
Fig. IV-23 Produits de décomposition accumulés sur le plan après des décharges dans le CF_3I (a) et l'état initial (b).....	113
Fig. V-1 Cellule pour tester l'isolation d'une ampoule à vide par les liquides	117
Fig. V-2 Photo de la cellule.....	117
Fig. V-3 Distribution de champ dans la cellule.....	118
Fig. V-4 Distribution de champ le long du chemin critique AB	118
Fig. V-5 Disjoncteur CBR.....	121
Fig. V-6 Vue d'ensemble du banc d'essai.....	123
Fig. V-7 Influence du pourcentage de CF_3I sur la tenue au choc de foudre positif du disjoncteur CBR et variation calculée à partir de nos mesures de V_c en champ uniforme	126
Fig. V-8 Configuration d'électrodes pour étudier la propagation de décharges sur la surface du diélectrique ..	127
Fig. V-9 : Décharge de surface en fonction de la teneur en CF_3I dans le mélange	128

Introduction

Le SF₆ (Hexafluorure de soufre) est depuis longtemps largement utilisé comme gaz d'isolation dans les appareillages moyenne et haute tension (disjoncteurs, postes sous enveloppe métallique, câble à isolation gazeuse...). Ce gaz possède d'excellentes qualités techniques telles qu'une bonne tenue diélectrique, un point d'ébullition bas ou encore une bonne stabilité chimique. Toutefois, il a été mis en évidence que le SF₆ est un gaz à effet de serre notable. Son coefficient GWP¹⁰⁰ (Global Warming Potential sur une durée de 100ans) est de 24000. Ce qui veut dire qu'un kilogramme de SF₆ a le même impact sur le réchauffement climatique que celui de 24000 kg de CO₂. Sa durée de vie dans l'atmosphère est très longue, estimée entre 800 et 3200 ans. La contribution du SF₆ au réchauffement terrestre pose le problème de la réduction de son utilisation à court terme, et de son remplacement à moyen terme.

Le remplacement du SF₆ a fait l'objet de nombreuses recherches depuis les années 1970. Il a été montré qu'il est très difficile, voire impossible, de trouver un gaz « vert » capable de remplacer universellement le SF₆. Les solutions pour le remplacement du SF₆ dépendent fortement de l'application envisagée.

Nous allons dans ce travail étudier le cas précis d'un disjoncteur de la gamme moyenne tension HTA (tension nominale 1 – 50 kV), à coupure dans le vide, dans lequel il faut assurer l'isolation externe de l'élément de coupure (ampoule à vide). Cette isolation est actuellement effectuée par du SF₆ à une pression d'environ 1,5 bars. Nous avons choisi d'étudier deux types de solutions pour le remplacement du SF₆ avec de meilleures propriétés environnementales : les esters biodégradables (liquides) et les mélanges CF₃I/N₂ (gaz).

Il est nécessaire de caractériser expérimentalement la performance diélectrique de ces matériaux dans différentes conditions, étant donné qu'il n'existe pas aujourd'hui de modèle prédictif du claquage des liquides, et que les données sur le CF₃I restent très incomplètes. Cette caractérisation est essentielle pour le remplacement du SF₆ dans l'application visée, mais elle permettra aussi de considérer l'utilisation de ces matériaux « écologiques » dans d'autres familles d'appareillage. Par exemple, les esters biodégradables sont également susceptibles de remplacer l'huile minérale dans les transformateurs de puissance.

La thèse s'articule en 5 chapitres. Dans le chapitre I, nous présentons tout d'abord le contexte général de ce travail, ainsi qu'un bref état de l'art sur les efforts de réduction et de remplacement du SF₆ dans l'industrie électrique. Une simulation électrostatique est ensuite réalisée afin d'identifier les contraintes de champ autour de l'ampoule à vide pour l'application visée.

L'étude des esters biodégradables d'origines naturelle et synthétique sera présentée dans le chapitre II. Après une étude bibliographique du claquage des liquides, et des esters en particulier, nous présenterons les techniques expérimentales adoptées qui permettent d'étudier séparément les phénomènes de génération et de propagation des précurseurs du claquage, souvent appelées « streamers » dans les liquides. Des mesures seront réalisées sous tensions alternative et impulsionnelle.

Le chapitre III présentera l'étude de la tenue diélectrique du CF_3I et de ses mélanges en champ quasi uniforme. Comme le CF_3I a un point d'ébullition plus élevé que le SF_6 , il faut le mélanger avec un autre gaz comme N_2 ou CO_2 afin de réduire la température de liquéfaction. Dans ce chapitre, nous proposons une formule qui permet de calculer la pression partielle maximale de CF_3I dans les mélanges, pour éviter que celui-ci ne se liquéfie à basse température. La tension de claquage des mélanges de CF_3I est ensuite mesurée expérimentalement à différentes pressions et concentrations de CF_3I . La formation de produits de décomposition solide du CF_3I est également discutée dans ce chapitre.

Le chapitre IV complètera les résultats du chapitre III en présentant les résultats obtenus en champ non uniforme. Une distribution non homogène du champ électrique est générée par la configuration d'électrode pointe – plan. Deux paramètres sont étudiés : la tension d'apparition des décharges et la tension de claquage. Les gaz étudiés sont le CF_3I , le SF_6 et les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, et SF_6/N_2 . Les résultats obtenus avec ces gaz sont ensuite comparés.

Le cinquième chapitre sera consacré à valider l'isolation externe de l'ampoule à vide par les esters et les mélanges de CF_3I , dans une cellule de laboratoire et dans un disjoncteur industriel. Les résultats seront interprétés en fonction du cahier des charges prédéfini par le partenaire industriel.

Ce travail a été développé en collaboration avec la société AREVA, dans le cadre du projet « REDUGES » (Réduction des gaz à effet de serre dans les applications électriques) soutenu par l'ANR et l'ADEME. Dans le cadre de ce projet, des études environnementales sur les matériaux considérés dans notre étude (analyses de cycle de vie et études d'impacts) ont également été réalisées par le laboratoire MAPIE (Modélisation, Analyse et Prévention des Impacts Environnementaux, Arts et Métiers, Chambéry).

Chapitre I Position du problème

I.1 Le SF₆ et son utilisation dans l'industrie électrique

I.1.1 Propriétés du SF₆

Le SF₆ (Hexafluorure de soufre) a été inventé par l'homme et il est commercialisé depuis les années 1950 [1]. Il s'agit d'un gaz incolore, inodore, non toxique, ininflammable, non explosif et thermiquement stable. Il est chimiquement inerte : sa molécule a toutes ses liaisons chimiques saturées et une énergie de dissociation élevée (+ 1 096 kJ/mol), ainsi qu'une grande capacité d'évacuation de la chaleur produite par l'arc (enthalpie élevée).

Le SF₆ possède une très bonne tenue diélectrique. Lorsque le champ électrique est homogène et sous pression atmosphérique, le SF₆ a une tenue diélectrique environ trois fois meilleure que l'air (Fig. I-1). Le SF₆ garde toujours sa bonne performance diélectrique en champ non uniforme ou en présence de diélectriques solides. La performance d'isolation du SF₆ sera détaillée dans le Chapitre III et Chapitre IV.

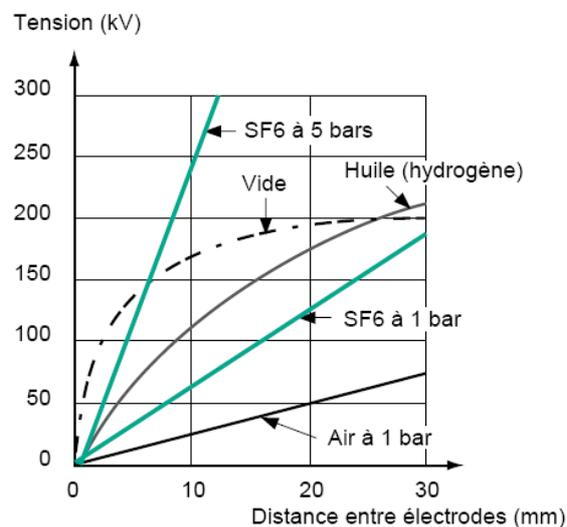


Fig. I-1 Tenue diélectrique du SF₆ comparé à différents matériaux en champ uniforme [2]

Le SF₆ a un point d'ébullition raisonnablement bas, qui est d'environ -64°C [3]. Il est donc possible d'utiliser le SF₆ comprimé à quelques bars sans risque de liquéfaction du gaz même en hiver. Par exemple, le SF₆ comprimé à 3 bars conserve toujours son état gazeux même si la température chute à -40°C. Cela permet de réduire considérablement

l'encombrement des appareillages isolés au SF₆ comprimé étant donné que les performances d'isolation augmentent avec la pression.

Le SF₆ peut être utilisé non seulement comme moyen d'isolation mais aussi comme un moyen de coupure de l'arc très performant. Ce gaz a une bonne capacité de transfert thermique (enthalpie élevée) et il est capable de se reformer rapidement à partir des produits de décomposition formés par des décharges électriques à haute pression. En effet, lors de la coupure d'un arc, le SF₆ se décompose sous l'effet de la température qui peut atteindre 15 000 à 20 000 K, mais cette décomposition est quasi réversible. Quand le courant diminue, la température diminue, les ions et les électrons se recombinaient alors pour reconstituer la molécule de SF₆ [2].

Les quantités de sous-produits générés lors de décharges électriques sont faibles. Ces sous-produits en faible quantité, par exemple CF₄ (40 à 600 p.p.m. en volume), SOF₂ et SO₂F₂ (en quantité négligeable), peuvent être considérés comme sans risque pour les personnes et l'environnement. Par ailleurs, la présence de sous-produits ne dégrade pas significativement sa tenue diélectrique. Les décharges dans le SF₆ ne produisent pas non plus de polymérisation (carbone ou autres dépôts nuisibles). Le SF₆ est compatible chimiquement avec la plupart de matériaux solides (isolants et conducteurs) utilisés dans les appareillages électriques.

Avec toutes ces excellentes qualités chimiques ainsi que diélectriques, le SF₆ est rapidement devenu un gaz universellement utilisé dans l'industrie électrique. L'utilisation de SF₆ comme milieu d'isolement au lieu de l'air permet de réduire fortement l'encombrement des appareillages à haute tension. Par exemple, un poste sous enveloppe métallique isolé par SF₆ occupe une surface au sol 5 à 10 fois réduite par rapport à un poste ouvert isolé dans l'air [4]. Le SF₆ est aussi largement utilisé comme moyen de coupure dans les disjoncteurs. Pour les niveaux de tension supérieurs à 60 kV, le SF₆ reste actuellement le seul moyen de coupure adapté.

Le SF₆ est à ce jour largement utilisé pour les disjoncteurs, postes blindés, câbles isolés au gaz, condensateurs... Il est estimé que 80% du SF₆ fabriqué aujourd'hui est destiné à l'industrie électrique, dont l'application disjoncteur est la plus concernée [1]. Les autres industries utilisatrices de SF₆ sont la fonderie du métal, fabrication de semi-conducteurs, isolations sonores et thermiques spécifiques

I.1.2 SF₆ et l'effet de serre

Cependant, un problème environnemental très important est apparu avec l'utilisation du SF₆. Ce gaz rejeté dans l'atmosphère conduit à un effet de serre très important, son coefficient GWP¹⁰⁰ (Global Warming Potential sur 100 ans) est de 24000. Ce qui veut dire qu'un kilogramme de SF₆ a le même impact sur le réchauffement climatique que celui de 24000 kg de CO₂. Sa durée de vie dans l'atmosphère est très longue, estimée entre 800 et 3200 ans [1].

Avec son utilisation croissante, l'émission annuelle du SF₆ dans l'atmosphère a fortement augmenté depuis les années 1960. Elle était d'environ 2 kilotonne (kt) en 1978 et a atteint un pic de 6,4 kt en 1995. Les dernières données collectées montrent que l'émission a repris avec une tendance de croissance de 7,2 kt en 2008 [5].

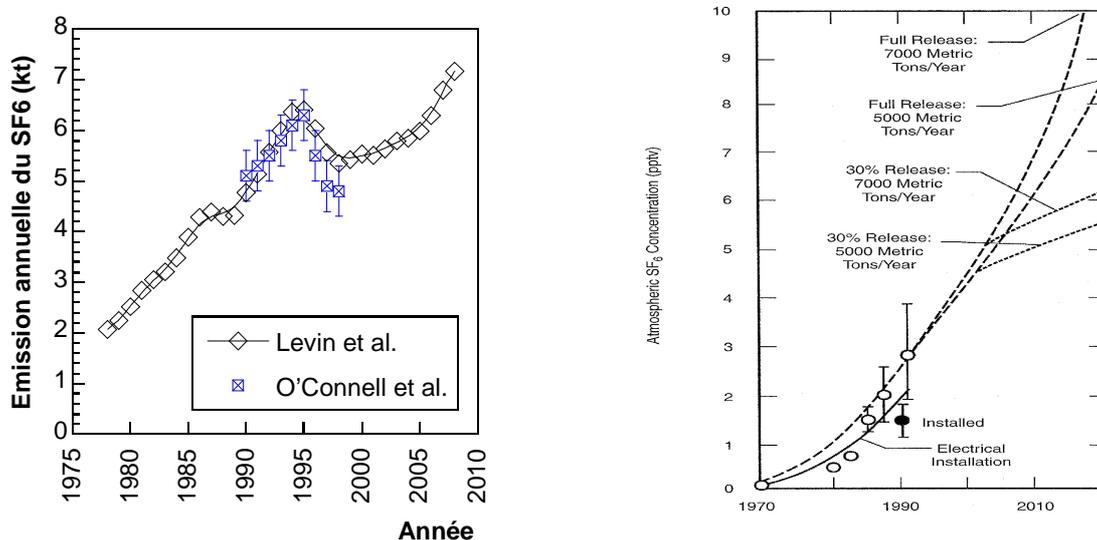


Fig. I-2 Emission annuelle du SF₆ [6] et [5] et la concentration du SF₆ dans l'atmosphère [1]

En raison de sa durée de vie très longue, le SF₆ rejeté dans l'atmosphère s'accumule et contribue au réchauffement climatique. Sa concentration volumique dans l'atmosphère était d'environ $3 \cdot 10^{-12}$ en 1990 (Fig. I-2). Ce gaz a été listé par le protocole de Kyoto en 1997 comme un gaz à effet de serre remarquable dont l'émission doit être réduite.

I.2 Réduction et remplacement du SF₆ – état de l'art

La contribution du SF₆ au réchauffement terrestre pose le problème de la réduction de son utilisation à court terme, et de son remplacement à moyen terme. Pour l'industrie électrique, quelques solutions ont été mises en place afin de réduire l'émission de SF₆.

I.2.1 Récupération et recyclage du SF₆

Des procédures internationales ont été adoptées pour guider la récupération et recyclage du SF₆, par exemple les normes CEI61634 [7] ou le guide de la Cigré [8]. Il s'agit de guides pratiques qui partagent les savoir-faire concernant la récupération et recyclage du SF₆ utilisé. Ces comités internationaux normalisent également la pureté du SF₆ réutilisable. En effet, après la durée de vie de l'appareillage, le SF₆ peut contenir des impuretés comme l'air, l'humidité et les sous-produits générés lors des décharges électriques. Après le cycle de vie, le

SF₆ sera traité pour éliminer les sous-produits. Il est réutilisable si la quantité de sous-produits après traitement reste inférieure à un seuil autorisé. Le seuil de sous produits autorisé par le Cigré est présenté dans le Tab. I-1.

Tab. I-1: Seuil de sous-produits autorisés par la Cigré (d'après [9])

Contaminant		Seuil autorisé
Gaz non réactifs	Air, N ₂ , CF ₄	< 2% du volume pour appareillages de coupure < 5% du volume pour isolation
Gaz réactifs	SF ₄ , SOF ₂ , SO ₂ , HF, SO ₂ F ₂	Concentration totale < 50 ppmv SO ₂ + SOF ₂ < 12 ppmv
Humidité	H ₂ O	< 120 ppmv pour SF ₆ liquéfié < 320 ppmv à 0,5 bar < 1600 ppmv à 1 bar

Avec les technologies de récupération et de purification du SF₆ de plus en plus performantes, cette méthode permet de réduire considérablement l'émission de SF₆ dans l'atmosphère.

I.2.2 Optimisation de la conception des appareillages

L'éco-conception joue également un rôle important pour réduire l'utilisation de SF₆. Il s'agit de l'optimisation de la conception des appareillages afin de réduire la quantité de SF₆ utilisé et de minimiser les fuites de SF₆. Comme ce domaine est vaste et confidentiel chez les industriels, nous ne citerons ici que quelques activités principales :

- Utilisation de l'isolation « hybride »: des gaz simples tels que N₂, CO₂ ou l'air ont une performance diélectrique nettement inférieure au SF₆. Cependant, dans certains cas, la tenue diélectrique globale peut être améliorée en ajoutant des diélectriques solides (par exemple sous forme d'une couche de revêtement ou d'une barrière). Ce type d'isolation « hybride » permet de concevoir les appareillages sans SF₆ en conservant une dimension acceptable. L'isolation solide dans ce cas sert à renforcer les points faibles ou à prolonger le chemin de propagation. Par exemple, il est possible de concevoir un poste sous enveloppe métallique isolé par isolation « hybride » air-solide [10]. Pourtant, il ne s'agit pas d'une solution « universelle » : il faut optimiser l'isolation pour chaque application spécifique souhaitée.

- Extension de l'utilisation du vide : le vide possède une tenue diélectrique et une capacité de coupure très bonne aux faibles dimensions. Pourtant, en haute et très haute tension, qui implique des distances d'isolement importantes, le vide devient peu compétitif par rapport au SF₆ (voir Fig. I-1). Les recherches ont été menées pour étendre l'utilisation du vide. Par exemple, si à l'heure actuelle, les chambres de coupure dans le vide sont couramment utilisées jusqu'à 36 kV, il a déjà été développé des prototypes jusqu'à 550 kV [11].

I.2.3 Utilisation des mélanges de SF₆

Un autre axe de réflexion consiste à réduire la quantité de SF₆ en utilisant des mélanges SF₆ / autre gaz compatible avec l'environnement, avec une teneur en SF₆ la plus faible possible. Ceci consiste à ajouter un faible taux de SF₆ dans un autre gaz comme N₂, CO₂, air ou encore hélium[12], argon [13] ou hydrogène [14] Le mélange SF₆-H₂ est inutilisable à cause du danger d'explosion en cas de décharge électrique [15]. Les mélanges SF₆-Ar et SF₆-He ont un champ critique réduit nettement inférieur à celui du mélange SF₆-N₂, et ils n'ont pas d'intérêt industriel sauf éventuellement le mélange SF₆-He pour la coupure d'arc. En conclusion pour l'isolation électrique, seuls les mélanges SF₆ avec N₂, CO₂ ou air sont intéressants, car un effet de synergie est observé avec ces trois mélanges (Fig. I-3) pour des concentrations faibles en SF₆ [16].

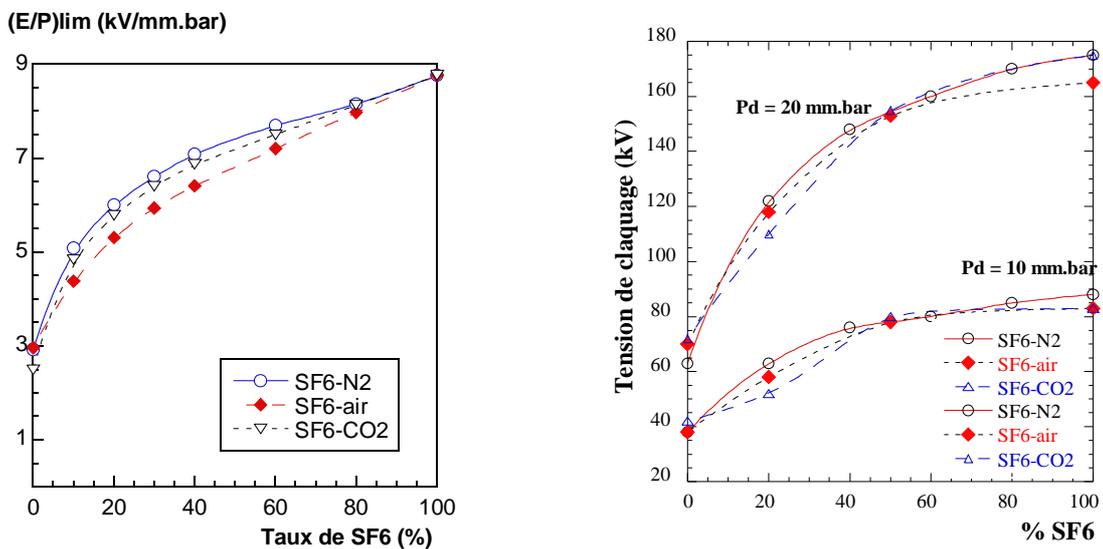


Fig. I-3 Evolution du champ réduit critique $(E/P)_{lim}$ (courbes construites de [17]) et tension de claquage en champ uniforme (résultats expérimentaux) de mélanges de SF₆ avec N₂, CO₂ et air en fonction du taux de SF₆ (courbes construites de [17] [18])

L'effet de synergie des mélanges de SF₆ avec N₂, air et CO₂ a été montré aussi bien par la mesure du champ critique que par la mesure de la tension de claquage (Fig. I-3).

L'accroissement de la performance diélectrique est très important aux faibles taux de SF₆. Par exemple, un mélange 20% SF₆ – 80% N₂ a une tension de claquage deux fois meilleure que celle du N₂ pur. Cet effet de synergie est particulièrement favorable car il permet de réduire la quantité de SF₆ utilisée en conservant une tenue diélectrique nettement améliorée par rapport à N₂, air ou CO₂ pur. Du point de vue économique, ces mélanges sont également intéressants car N₂, air ou CO₂ sont abondants dans l'atmosphère. A ce jour, les mélanges SF₆/N₂ à faible taux de SF₆ (< 20%) sont les plus étudiés.

Ces mélanges ont été utilisés avec succès dans l'industrie électrique. Par exemple, dans certains disjoncteurs où un fonctionnement à très basse température est exigé [19]. Plus récemment, il a été utilisé pour les lignes de transport à isolation gazeuse (LIG) de seconde génération [20], qui sont commercialisées depuis 2001 (LIG 220 kV à Palpexpo à Genève, Suisse) [21].

I.2.4 Gaz de remplacement du SF₆ – état de l'art

En parallèle avec l'effort de réduction du SF₆, la recherche d'un gaz de remplacement dans le domaine de l'isolation électrique se poursuit depuis plusieurs années.

Plusieurs gaz et mélanges de gaz ont été proposés comme alternative au SF₆. Des recherches antérieures ont montré qu'il existe des gaz ayant une tenue diélectrique à température ambiante équivalente ou même supérieure à celle du SF₆, tels que les hydrocarbures halogénés (CF₂Cl₂, CFC1₃, C₂F₆, C₄F₁₀, C₅F₈, CHCl₃, CF₂ClBr, CF₃CN, C₂F₅CN, etc.) [22][23]. Cependant, il faut rappeler que l'utilisation d'un gaz isolant nécessite non seulement une rigidité diélectrique élevée mais également un ensemble de caractéristiques comme une température de liquéfaction inférieure à -50°C, une haute stabilité chimique, une toxicité et un impact sur l'environnement (effet de serre, effet sur la couche d'ozone, éco-toxicité) les plus faibles possibles, etc.

Il est difficile de trouver un gaz qui possède à la fois une tenue diélectrique comparable à celle du SF₆ et une température de liquéfaction raisonnablement basse. Devins [22] a comparé plusieurs gaz avec le SF₆ en considérant ces deux paramètres. La performance d'isolation en champ uniforme peut être présentée par le champ critique limite $\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}}$ (la physique des décharges dans le gaz seront présentés en détail dans le Chapitre III, Eq. III.15). Comme montré sur la Fig. I-4, la plupart des gaz ayant une meilleure tenue diélectrique à 20°C que le SF₆ (situé au-dessus de la ligne $\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}}$ de SF₆) ont un point d'ébullition bien supérieur à ce dernier. Par conséquent, ces gaz risquent de se liquéfier suite à une chute de

température. Par ailleurs, il devient impossible de comprimer ces gaz, pour améliorer leur tenue diélectrique, sans les liquéfier.

Devins a proposé une méthode permettant de mesurer l'effet de la pression sur les gaz, connaissant leur point d'ébullition à pression atmosphérique, et en considérant un seuil de liquéfaction à -25°C . L'Eq. I.1 permet d'estimer le champ réduit minimal pour qu'un gaz ayant un point d'ébullition T_b puisse donner la même tension de claquage que le SF_6 à la pression P , sans qu'il soit liquéfié quand la température chute à -25°C [22]

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{\min} = E_{\text{SF}_6}(P) \cdot \frac{248}{298} \exp\left[-\frac{A}{R}\left(1 - \frac{T_b}{248}\right)\right] \quad \text{Eq. I.1}$$

Où :

- $E_{\text{SF}_6}(P)$ Champ critique du SF_6 à la pression P et à 20°C , qui s'écrit : $E_{\text{SF}_6}=8,6P$ avec E en kV/mm et P en bar.
- A Constante (21 cal/deg.mole)
- R Constante (2 cal/deg.mole)
- T_b Point d'ébullition du gaz considéré

Les valeurs calculées à partir de l'Eq. I.1 pour le SF_6 aux pressions de 1, 2, 3 et 6 bars sont aussi montrées sur la Fig. I-4 (lignes pointillées). Les pressions sont mesurées à 20°C et la tension de claquage du gaz est supposée indépendante de la température. Les gaz se trouvant à gauche d'une ligne pointillée (P_i) peuvent être comprimés pour donner une tension de claquage comparable ou supérieure au SF_6 à la pression P_i , sans qu'il se liquéfie à -25°C . Par exemple, nous pouvons comprimer le gaz $\text{C}_2\text{F}_5\text{CN}$ (à gauche de la courbe SF_6 $P=3$ bars) pour avoir un champ de claquage comparable au SF_6 à 3 bars sans problème de liquéfaction à -25°C . En revanche, si le C_4F_6 (à droite de la courbe SF_6 $P=3$ bars) est comprimé à température ambiante pour avoir le même niveau d'isolation, il sera liquéfié si la température chute à -25°C .

Nous pouvons remarquer que seul le CF_3CN peut donner une tension de claquage plus élevée que le SF_6 à 6 bars sans liquéfaction à -25°C . Les gaz $\text{C}_2\text{F}_5\text{CN}$, C_4F_6 et $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ peuvent être comprimés pour avoir le champ de claquage du SF_6 à 2 bars. Le C_3F_8 est sur la marge d'acceptation. Certains autres gaz, par exemple le C_2F_6 ou le CF_3Br peuvent devenir comparables au SF_6 sous 3 bars si ils sont comprimés à une pression suffisamment grande. Les autres gaz ne sont pas intéressants.

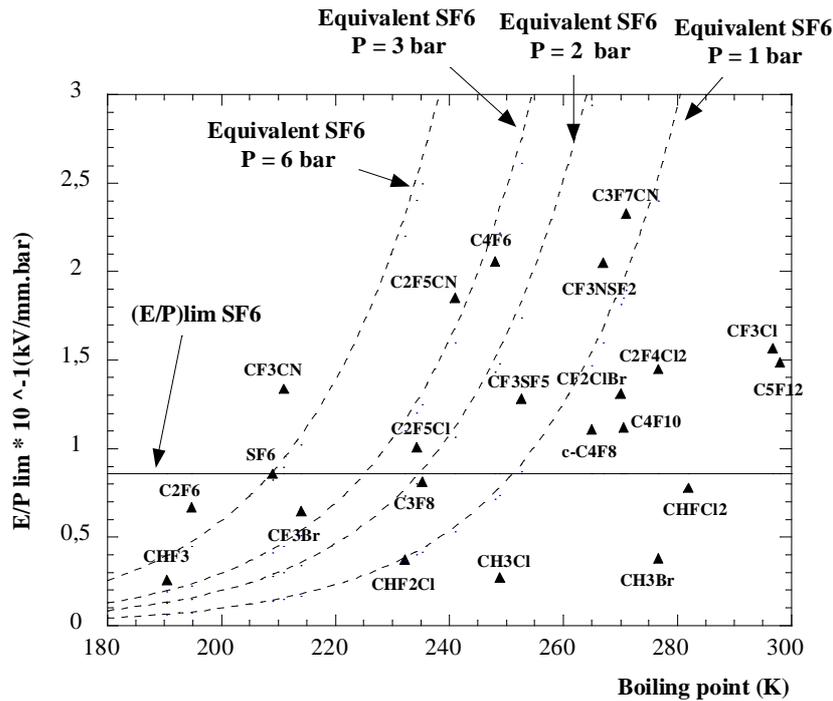


Fig. I-4 Comparaison du champ réduit critique $\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}}$ et point d'ébullition de différents gaz. [22].

Remarquons que tous les gaz qui semblent intéressants d'un point de vue tension de claquage sont des gaz soit toxiques, soit plus ou moins nocifs pour l'environnement. Par exemple, le CF_3CN et le $\text{C}_2\text{F}_5\text{CN}$ sont des gaz toxiques, et le $\text{C}_2\text{F}_5\text{Cl}$ est nuisible à la couche d'ozone. Niemeyer [24] a fait une recherche sur plusieurs gaz en considérant toutes les caractéristiques énumérées précédemment, il a montré qu'il n'existe pas un seul gaz répondant à tous les critères imposés, à la date de publication de son article en 1998.

Les mélanges d'un gaz électronégatif avec un gaz comme N_2 ou CO_2 sont apparemment plus intéressants car ils permettent de réduire à la fois la température de liquéfaction et l'impact sur l'environnement. Les mélanges de gaz électronégatifs comme N_2O , $\text{c-C}_4\text{F}_8$, C_3F_8 , C_2F_6 , CF_4 et CHCl_3 ...avec des gaz non électronégatifs comme N_2 ou CO_2 ont été étudiés [25][26][27][28][29]. Ces gaz, à l'exception de N_2 , sont cependant des gaz à effet de serre marqué (hydrocarbures perfluorés) et certains contribuent, de plus, à la destruction de la couche d'ozone (hydrocarbures chlorés). Par conséquent, ces mélanges ne présentent pas un avantage net du point de vue environnemental par rapport au SF_6 pur ou à ces mélanges (e.g. SF_6/N_2).

I.3 L'objectif de la thèse

Suivant les applications, le remplacement du SF₆ peut s'envisager plus ou moins facilement. Si les fonctions isolation et coupure sont simultanément requises avec un niveau de tension élevée, le remplacement du SF₆ semble très difficile à atteindre. Par contre pour la seule fonction isolation, le remplacement du SF₆ est possible par exemple en utilisant des mélanges pauvres en SF₆ (e.g. 15% de SF₆ dans l'azote) ou bien des gaz sans effet de serre notable comme le trifluoroiodométhane (CF₃I). Pour certaines applications, l'utilisation de liquides diélectriques bio-dégradables est également envisageable. Les solutions pour le remplacement du SF₆ dépendent donc fortement de l'application envisagée.

Nous allons à présent étudier le cas précis d'un disjoncteur de la gamme HTA (tension nominale 1 – 50 kV) à coupure dans le vide où il faut assurer l'isolation externe de l'ampoule à vide. Cette isolation est actuellement effectuée par du SF₆ à une pression d'environ 1,5 bars.

Il est à noter que dans le réseau électrique, la quantité de disjoncteur en HTA (utilisé pour les réseaux de distribution) est beaucoup plus importante que la quantité de disjoncteur en HTB (utilisé pour les réseaux de transport). Par conséquent, le remplacement du SF₆ utilisé dans la gamme HTA permettra de réduire considérablement la quantité totale de SF₆ utilisé par l'industrie électrique.

I.3.1 Disjoncteur moyenne tension à coupure dans le vide

Sur le réseau électrique, un disjoncteur est destiné à établir, supporter et interrompre des courants, sous sa tension assignée (tension maximale du réseau), dans les conditions normales de service et dans les conditions anormales spécifiées (court-circuit, discordance de phases...).

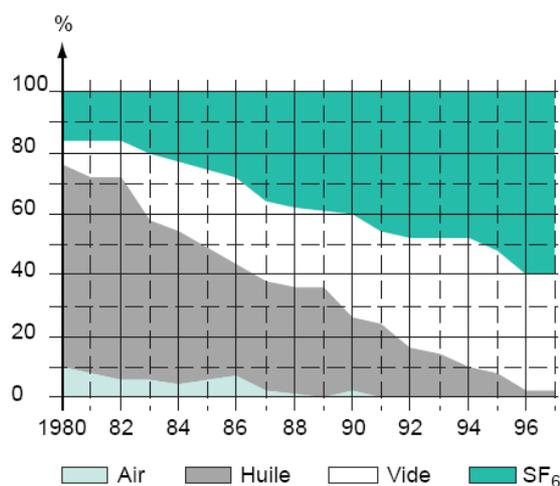


Fig. I-5 Evolution du marché de disjoncteur MT en Europe [2]

La coupure de courant dans le disjoncteur s'effectue en séparant les deux contacts, dont un fixe et l'autre mobile. Le milieu de coupure peut être l'air, l'huile, le SF₆ ou le vide. Dans le domaine de basse tension, la coupure dans l'air est la plus utilisée en raison de sa simplicité. En très haute tension, la coupure dans le SF₆ est pratiquement la seule mise en œuvre.

Pour la gamme haute tension A, toutes les techniques peuvent être utilisées. Celle de coupure dans le vide et dans le SF₆ ont remplacé celles dans l'air pour des raisons de coût et d'encombrement, et celles dans l'huile pour des raisons de fiabilité, de sécurité et de réduction de maintenance [2].

I.3.2 Ampoule à vide et son isolation externe

Comme présenté dans la partie précédente, la coupure dans le vide est très utilisée en HTA en raison de plusieurs avantages qu'elle apporte. Dans les disjoncteurs utilisant cette technologie, la coupure est faite dans le vide à l'intérieur d'une ampoule étanche. Le principe de l'ampoule à vide est présenté sur la Fig. I-6.

L'ampoule est étanche, permet de maintenir le niveau de vide à l'intérieur (pression de l'ordre 10⁻⁶ mbar pour une ampoule neuve). L'enveloppe est en céramique d'épaisseur de quelques millimètres. Les deux contacts, dont un fixe et l'autre mobile, permettent de maintenir ou d'interrompre le courant. Le soufflet métallique permet le déplacement du contact mobile tout en maintenant l'étanchéité de l'enveloppe. Lors de la coupure du courant, l'apparition de l'arc est inévitable entre les deux contacts. Un écran métallique (potentiel flottant) est mis en place afin de protéger la face interne de l'isolateur contre la condensation des vapeurs métalliques générées par l'arc.

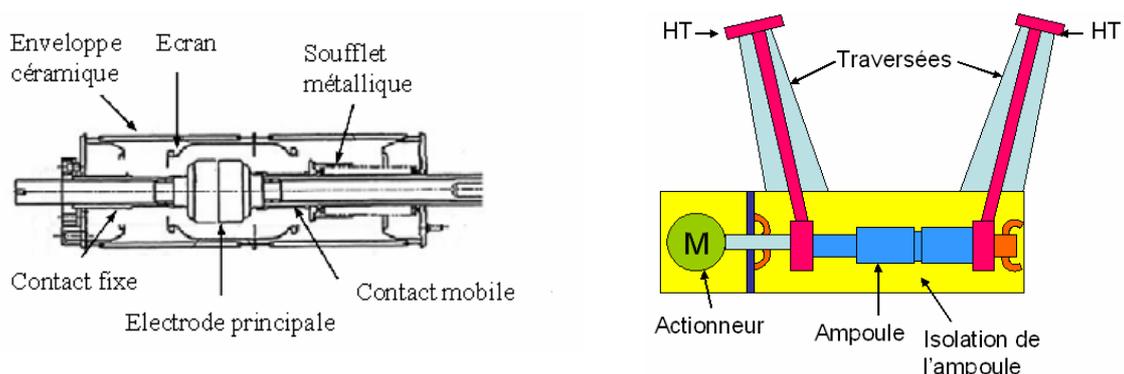


Fig. I-6 Principe d'une ampoule à vide et un exemple de son emplacement dans un disjoncteur

Les ampoules à vide sont beaucoup utilisées jusqu'à 36 kV. Pour le niveau de tension de 52 kV, il est déjà fréquent de devoir utiliser deux ampoules en série. A l'heure actuelle, les disjoncteurs munis d'une seule ampoule à vide par pôle ont été commercialisés avec le niveau de tension jusqu'à 72 kV. Les ampoules destinées à des niveaux de tension plus élevés, par

exemple 145 kV ou 225 kV, sont toujours resté à l'état prototype. Récemment, la faisabilité d'utilisation de l'ampoule à vide a été étudié jusqu'à 550 kV [11]. A ces niveaux de tension, la concurrence de la coupure dans le vide avec le celle dans SF₆ est limitée pour des raisons techniques et aussi économiques.

Dans les disjoncteurs l'ampoule est isolée à l'extérieur soit par un gaz, par un liquide ou un solide. L'isolation à l'extérieur de l'ampoule doit assumer les fonctions suivantes :

- Limiter les décharges partielles à la tension de service du disjoncteur.
- Empêcher le claquage à l'extérieur de l'ampoule à vide. L'isolation d'extérieur doit tenir les courtes surtensions et les surtensions de type choc de foudre sans que le claquage soit produit à l'extérieur de l'ampoule. Le niveau de surtension correspondant à chaque tension nominale est défini par des normes industrielles.

L'objectif de ce travail est l'étude de l'isolation extérieure d'une ampoule à vide. Ainsi, nous ne nous intéressons pas à la coupure de courant qui se produit dans l'ampoule à vide mais seulement à la capacité d'isolation de différents matériaux à l'extérieur de l'ampoule.

I.3.3 Cahier des charges imposé

Nous avons choisi une ampoule à vide de type VG2, fabriqué par Areva T&D comme l'objet de l'étude. L'ampoule VG2 est utilisée pour le niveau de tension nominal 24 kV. Pour ce niveau de tension, son isolation externe doit satisfaire les conditions suivantes:

Tab. I-2: Cahier des charges imposé

Tension nominale	24 kV
Courte surtension	80 kV efficace pendant 1 minute
Tenue aux chocs de foudre normalisés (1,2/50 µs)	170 kV crête
Décharges partielles	< 10 pC à tension 27 kV
Température de fonctionnement	-40°C à +115°C

I.4 Simulation de champ autour d'une ampoule à vide

Pour connaître les contraintes de champ que doit supporter l'isolation de l'ampoule à vide, nous avons simulé la distribution de champ à l'extérieur d'une ampoule à vide de type

VG2, fabriqué par Areva T&D. La simulation par éléments finis a été réalisée à l'aide du logiciel Flux2D.

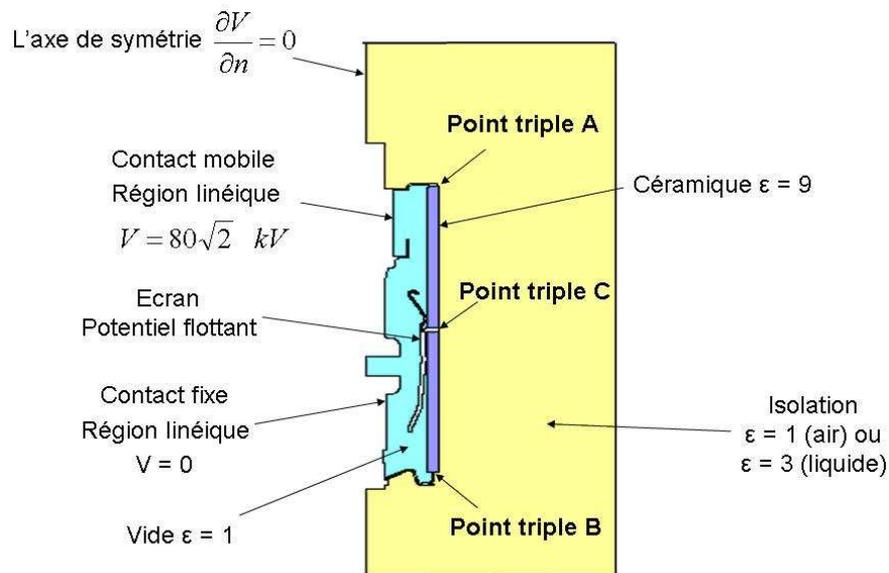


Fig. I-7 Conditions initiales de simulation et régions de « point triple »

I.4.1 Hypothèses adoptées et conditions aux limites

Pour effectuer la simulation, nous adoptons les hypothèses suivantes :

- Le milieu est linéaire et isotrope.
- Le régime de champ est électrostatique et l'influence de charges d'espace est négligeable.
- Les métaux sont des conducteurs parfaits

Les conditions initiales et conditions aux limites sont présentées sur la Fig. I-7. Il s'agit d'un problème axisymétrique. La géométrie est donc construite sur la moitié de l'échantillon et le module de calcul électrostatique 2D axisymétrique du logiciel Flux est choisi. Les contacts fixes et mobiles sont considérés comme des régions linéiques. La tension est considérée comme constante à la surface de contact fixe et contact mobile et les régions à l'intérieur ne sont pas prises en compte dans les calculs. Cela permet de réduire les nœuds traités sans affecter la fiabilité de résultat.

D'après le cahier de charge imposé, l'ampoule VG2 (tension nominale 24 kV) doit être capable de supporter une tension 80 kV AC pendant une minute. Nous décidons de simuler la distribution de champ quand la tension appliquée est de $80\sqrt{2}$ kV, qui correspond à la valeur crête de la tension.

I.4.2 Maillage

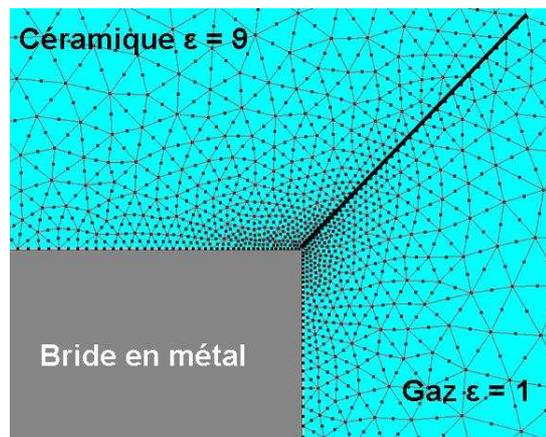


Fig. I-8 Maillage effectué autour du point triple

A l'extérieur de l'ampoule, il y a trois régions de point triple (régions A, B et C sur la Fig. I-7). Les régions A et B correspondent au contact entre la bride en cuivre, l'enveloppe en céramique et le matériau d'isolation de l'ampoule (gaz ou liquide). La région C est la région de contact entre l'écran métallique, l'enveloppe céramique et l'isolation. Le champ est renforcé dans ces zones en raison de différence de permittivité entre la céramique ($\epsilon = 9$) et l'isolation de l'ampoule ($\epsilon = 1$ ou 3).

Le maillage a été optimisé dans les zones de renforcement de champ A, B et C. La longueur d'éléments de maillages a été fixée à $0,3 \mu\text{m}$ vers les points triples. Dans les zones plus éloignées, la longueur augmente jusqu'à $0,3 \text{ mm}$ au long de l'enveloppe céramique ; $0,8 \text{ mm}$ sur les contacts et jusqu'à 10 mm à l'infini.

I.4.3 Résultats de simulation

Les lignes équipotentielles et la distribution de champ sont présentées sur la Fig. I-9. Le potentiel sur l'écran est d'environ 50% de celui du contact mobile. Un renforcement de champ peut être observé dans les zones A et B, qui correspond aux points triples métal / céramique / isolation. Le renforcement est moins important dans la zone C.

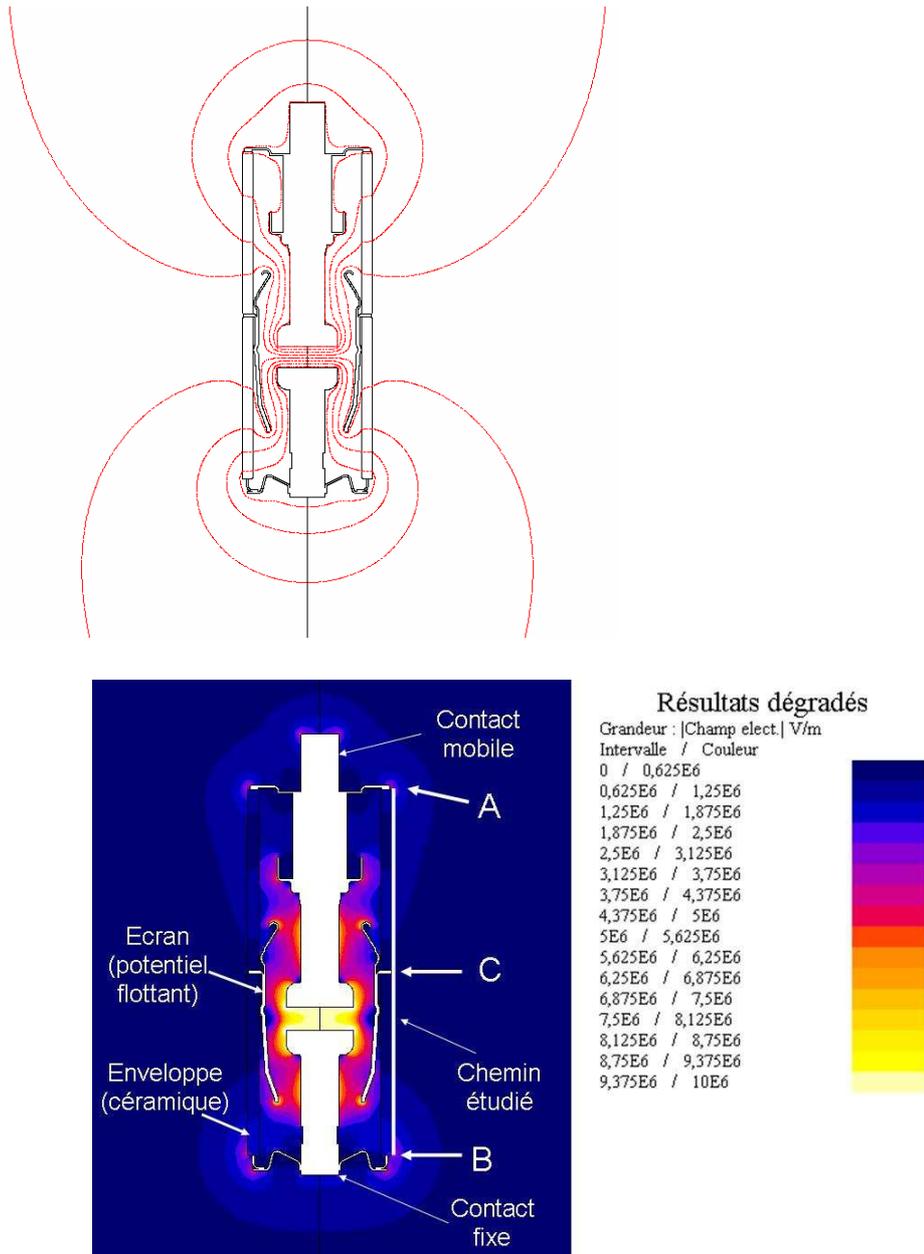


Fig. I-9 Distribution de champ dans l'ampoule à vide

Pour avoir une idée du champ à l'extérieur de l'ampoule, la distribution de champ au long du chemin AB est présentée sur la Fig. I-10. La distribution de champ est très non homogène au long du chemin AB. Les pics de champs d'environ 90 kV/mm sont observés correspondent à des points triples, où le champ est renforcé. Au long du chemin AB, le champ est minimal à proximité de région C, avec la valeur minimal de moins de 0,1 kV/mm. Cela peut s'expliquer par la présence de l'écran dans l'ampoule. A l'intérieur de l'ampoule, les lignes équipotentielles sont en parallèle avec l'écran et ils sortent de l'ampoule notamment par deux côtés (Fig. I-9). Le champ électrique est donc renforcé aux deux côtés de l'ampoule et il est minimal au milieu.

Nous pouvons remarquer qu'une oscillation de champ est observée au long du chemin AB. En effet, la simulation de champ a été effectuée basée sur les données géométriques et un maillage fourni par plateforme vide d'Areva. Le maillage initial a été fait en vue d'étudier le champ à l'intérieur de l'ampoule (le vide). Nous avons tenté d'affiner le maillage à l'extérieur de l'ampoule mais la capacité de l'ordinateur utilisé ne permet pas de résoudre un tel maillage. Par conséquent, les valeurs de champ obtenues sur la Fig.I-10 n'ont aucune signification physique et la figure ne peut montrer que le champ à l'extérieur de l'ampoule est très non homogène.

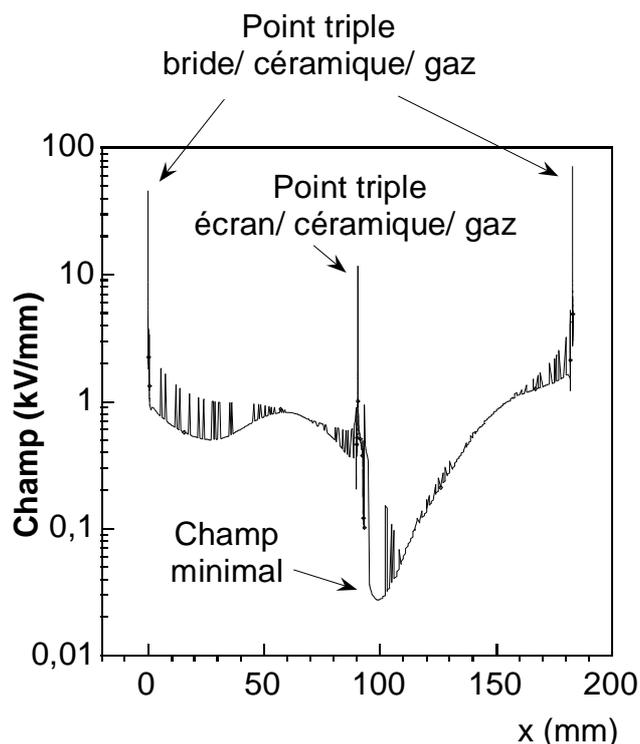


Fig. I-10 Distribution de champ autour du chemin critique AB

Basé sur les résultats de simulation, un scénario conduisant à un claquage de contournement peut être envisagé. Lors du passage à la valeur crête de la tension, une décharge est générée dans la zone A ou B et se propage au long de l'ampoule. Pour conduire à un claquage, cette décharge doit traverser un chemin au moins de 20 cm dans une condition de champ très non homogène.

I.5 Solutions proposées et objectifs de la thèse

Les résultats précédents ont établi les contraintes de champ existantes autour de l'ampoule à vide. Dans la suite de ce travail, nous avons choisi d'étudier deux types de solutions pour le remplacement du SF₆ pour l'isolation externe de l'ampoule à vide avec de meilleures propriétés environnementales : les esters biodégradables (liquides) et les mélanges

$\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ (gaz). Nous devrions donc caractériser les propriétés diélectriques de ces isolants jusqu'à présent assez peu étudiés, en particulier dans les conditions de contraintes précédemment établies. Parallèlement à ces travaux, des études environnementales (analyses de cycles de vie, impacts environnementaux) ont été réalisées par le Laboratoire SERAM (Chambéry) sur ces mêmes matériaux dans le cadre du projet ANR REDUGES.

Nous avons montré que la distribution de champ à l'extérieur de l'ampoule à vide est très non homogène. Pour conduire à un claquage, une décharge doit être générée, puis se propager sur une distance de l'ordre d'une dizaine de centimètres dans un champ non homogène. Il sera donc nécessaire de caractériser la génération et la propagation des décharges dans les matériaux choisis.

Pour étudier la génération de décharges, nous utiliserons la configuration de champ quasi homogène associée à une faible distance interélectrode. Dans cette condition, une décharge une fois générée se propage facilement et elle conduit systématiquement à un claquage. En conséquence, la tension requise pour obtenir un claquage est assimilée à la tension de génération des décharges. Le champ de génération correspondant peut être ensuite calculé à l'aide de calculs analytiques ou d'une simulation numérique.

La propagation de décharges sera étudiée dans une condition de champ non homogène, avec une distance interélectrode de quelques centimètres à des dizaines de centimètres. Pour simplifier le problème, la distribution de champ non homogène sera produite par la configuration d'électrode pointe – plan ou tige – plan. Les grandeurs liées au phénomène de propagation telles que le courant transitoire, la longueur de la décharge et sa vitesse de propagation sont alors systématiquement mesurées.

La dernière étape du travail consistera à valider les résultats obtenus sur l'isolant seul en testant un système réel comprenant une ampoule à vide, son isolation externe et ses systèmes de commande. L'isolant externe choisi doit respecter les contraintes imposées par les normes industrielles.

Pour notre étude, tous les résultats concernant un remplaçant éventuel du SF_6 seront comparés aux performances atteintes avec l'utilisation du SF_6 . Par ailleurs, les esters biodégradables sont également envisagés comme liquide d'isolation des transformateurs en remplacement de l'huile minérale. Aussi, les résultats obtenus avec les esters biodégradables seront également comparés avec ceux obtenus dans l'huile minérale. Ces travaux dans les esters constituent une suite de l'étude entreprise par C. Tran-Duy [30] au G2Elab, et dont les principaux résultats seront rappelés dans la suite.

Chapitre II Esters biodégradables

Dans ce chapitre, nous considérons la possibilité d'utilisation d'esters biodégradables (esters naturels et esters synthétiques) pour l'isolation haute tension en général, et pour l'isolation d'une ampoule à vide en particulier.

- Ester naturel : La terminologie « ester naturel » est en fait le nom technique des huiles à base végétale. Ce sont des produits « naturels » dont la composition est plus simple qu'une huile minérale (quelques dizaines de molécules), mais qui peut varier dans de larges proportions suivant l'origine des plantes ou graines utilisés.
- Ester synthétique : les esters synthétiques sont des produits fabriqués artificiellement. Ils ont une composition simple, bien définie et leur structure chimique est assez similaire à celle des esters naturels.

Ces esters sont déjà utilisés comme isolation dans certains transformateurs de faible puissance unitaire. Considérés comme alternative de l'huile minérale, leur utilisation dans les transformateurs se développe actuellement vers les plus haute tensions et puissances. Par rapport à l'huile minérale, les esters ont des avantages majeurs liés la non-toxicité, une bonne résistance au feu, une excellente biodégradabilité et le non dépendance aux ressources pétrolières.

Dans ce chapitre, nous commençons tout d'abord par une revue bibliographique sur les esters, dans laquelle nous nous focalisons sur la caractérisation des esters par les méthodes standardisées (par exemple la CEI60156) et la caractérisation d'un ester naturel (RS50) par étude des « streamers » réalisée récemment par C. Tran-Duy [30]. Ensuite, nous caractérisons différents types d'esters dans des conditions de champ variant de homogène à très divergent, avec une distance interélectrode de l'ordre de quelques centimètres à dizaine de centimètres. Les techniques expérimentales adoptées seront les mêmes que celles utilisées dans [30], qui permettent d'étudier séparément la génération et la propagation des « streamers » dans les esters.

Pour une bonne exploitation des résultats, ces derniers seront comparés avec les matériaux de référence, le SF₆. Par ailleurs, une comparaison avec l'huile minérale est également intéressante pour considérer l'utilisation des esters comme isolation dans les transformateurs de puissance.

II.1 Etude bibliographique

II.1.1 Présentation des esters biodégradables

Les principales caractéristiques des esters sont présentées dans le Tab. II-1. Les paramètres correspondant de l'huile minérale sont également présentés pour la comparaison. Nous pouvons en déduire quelques avantages et inconvénients de ces liquides au point de vue utilisation en haute tension.

Tab. II-1: Caractéristiques techniques des liquides étudiés

Caractéristiques	Ester naturel RS50	Ester naturel Envirotemp FR3	Ester synthétique Midel 7131	Huile minérale
Masse volumique à 20°C	887	920	970	911
Viscosité à 40°C	17,1	33,8	28	9,67
Viscosité à 100°C	4,66	8	5,25	2,37
Permittivité relative à 90°C	2,82	3,2 (à 25°C)	3,2 (à 25°C)	2,2
Résistivité à 90°C	$1,2 \cdot 10^{10}$			10^{13}
FDD (tan δ) à 90°C, 50 Hz	0,0152	0,0185	<0,006	0,001
Teneur en eau à saturation (ppm) à 20°C	750	994	2700	50
Point d'écoulement (°C)	-28	-21	-60	-58
Point d'éclair (°C)	171	326	275	148

Avantage des esters par rapport à l'huile minérale :

- Les esters sont particulièrement intéressants au point de vue environnemental, grâce à leur bonne biodégradabilité (Fig. II-1). Par ailleurs, ils sont non toxiques vis-à-vis de l'eau et du sol.
- Par ailleurs, les esters ont une meilleure résistance au feu que l'huile minérale. Ainsi, ils peuvent être utilisés dans certaines applications spéciales où le risque d'incendie est présent.
- Les liquides de synthèse ont une solubilité de l'eau très élevée par rapport à l'huile minérale. A 20°C, la teneur en eau à saturation de l'huile minérale est de 55 ppm par rapport à 1000 et 2700 ppm pour l'huile végétale et le liquide de synthèse (Fig. II-2). Ce fait peut être considéré comme une propriété favorable. En effet, l'apparition de gouttelettes d'eau due à la saturation est beaucoup plus difficile dans les liquides

biodégradables que dans l'huile minérale. Cela permet de réduire le risque de défaillance à cause de gouttelettes d'eau dans le liquide soumises au champ intense.

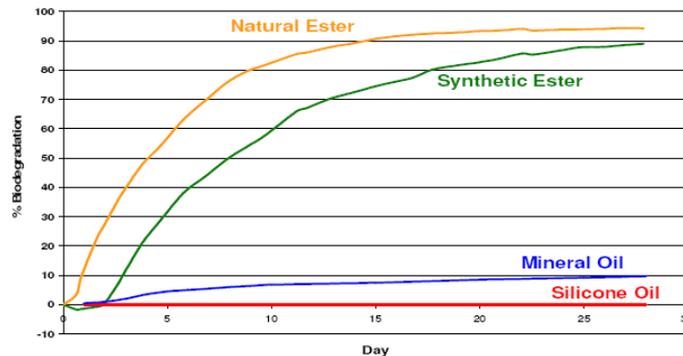


Fig. II-1 Biodégradabilité de différents liquides [31]

Quelques inconvénients des esters par rapport à l'huile minérale :

- Les esters ont une viscosité plus élevée que l'huile minérale. La différence de viscosité entre les esters et l'huile minérale est de 2 à 4 fois. Il s'agit d'un obstacle pour l'utilisation de ces liquides dans les applications de type transformateur, qui représente le plus vaste marché des isolants liquides. Pour les huiles végétales, le point d'écoulement est aussi un inconvénient important. Ils ont un point d'écoulement d'environ -20°C , qui est beaucoup plus élevé par rapport à la valeur typique de -60°C de l'huile minérale. Ce point d'écoulement élevé empêche l'utilisation de ce liquide dans l'application où le fonctionnement à basse température est exigé.

II.1.2 Tenue diélectrique des esters mesurée par des méthodes normalisées

II.1.2.1 Tenue diélectrique des esters filtrés en fonction de la teneur relative en eau

Solubilité en eau et teneur relative en eau

La solubilité de l'eau dans un liquide dépend de sa structure moléculaire et de la température. Il a été montré que la solubilité de l'eau dans les esters biodégradables est beaucoup plus élevée que dans l'huile minérale (Fig. II-2).

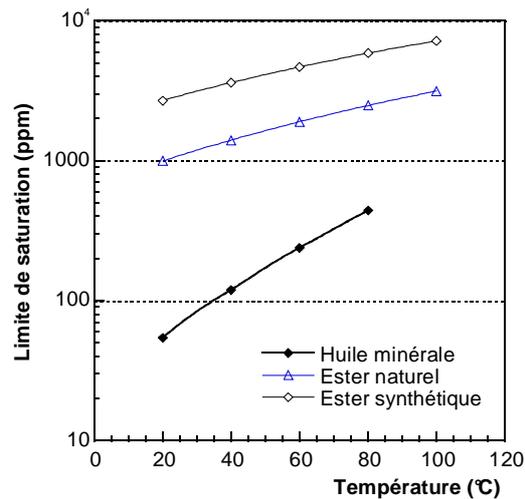


Fig. II-2 Teneur en eau à saturation d'ester naturel, d'ester synthétique et de l'huile minérale [32]

A une température donnée, la teneur relative en eau (C_r en %) d'un liquide est définie comme le rapport entre la quantité d'eau (C en ppm) dans ce liquide et sa teneur en eau à saturation (C_{lim} en ppm).

$$C_r = \frac{C}{C_{lim}} \quad \text{Eq. II.1}$$

Tenue diélectrique des esters biodégradables filtrés

La tenue diélectrique des esters a été mesurée dans la plupart des études à petite distance, en utilisant la norme CEI60156 (claquage entre électrodes sphériques, distance 1 – 2 mm, rampe de tension alternative). Les résultats obtenus sont généralement présentés sous la forme d'une courbe tension de claquage en fonction de la teneur relative en eau.

La comparaison de la tenue diélectrique des esters avec l'huile minérale et entre les esters donne des résultats très dispersés et parfois contradictoires. Par exemple, la tenue diélectrique des esters a été trouvée meilleure que celle de l'huile minérale par certains auteurs [33][34], alors que d'autres ont trouvé l'inverse [35][36]. Cette contradiction peut être expliquée par la présence non contrôlée de particules solides dans les liquides testés [30]. En effet, dans les études précédemment citées, la teneur en eau est généralement maîtrisée mais pas la présence de particules. L'influence de celles-ci sur les mesures normalisées sera détaillée dans la prochaine partie.

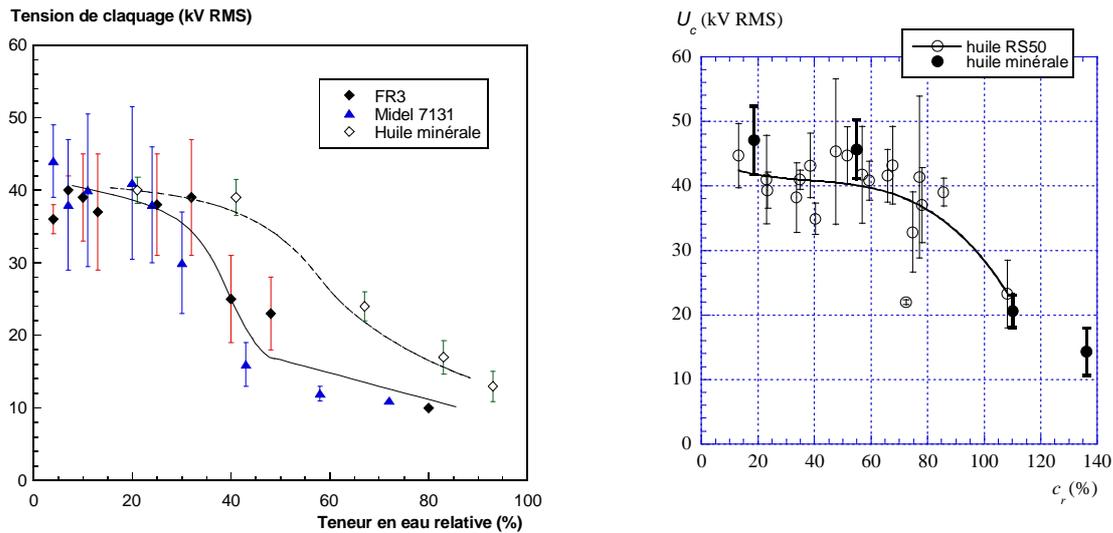


Fig. II-3 a) Comparaison de tenue diélectrique entre ester naturel, ester synthétique et l'huile minérale par Z.Wang [37] . b) comparaison ester naturel RS 50– huile minérale par C.Tran-Duy [30]

La comparaison de tenue diélectrique par méthodes normalisées est plus fiable si les liquides sont bien filtrés. Sur la Fig. II-3b, la tension de claquage des esters et de l'huile minérale est comparée par une méthode dérivée de la CEI60156, avec des liquides filtrés en boucle fermée par passage à travers une membrane (diamètre des pores de quelques μm). En tenant compte de la dispersion de résultats, la tenue diélectrique des esters est comparable à celle de l'huile minérale. Quand la teneur relative en eau reste limitée ($C_r \approx 20 - 30\%$), la tenue diélectrique de trois liquides est d'environ 40 kV/mm. Une décroissance de V_c avec C_r est ensuite observée dans les trois liquides quand C_r dépasse une certaine valeur. Pour $C_r = 80\%$, V_c est deux à trois fois plus faible que sa valeur initiale pour $C_r < 20\%$. On remarque que les variations de V_c avec C_r dépendent fortement de la méthode de filtration du liquide utilisée. Plus la filtration est poussée et plus la région où l'on observe la décroissance de V_c se rapproche de la valeur $C_r = 100\%$.

Cette dégradation de la tension de claquage peut donc être attribuée à la de particules dans l'huile. En effet, les particules hygroscopiques (par exemple la cellulose) absorbent l'eau de l'huile. Leur conductivité et leur permittivité devient alors importante et elles se comportent comme des particules conductrices (de type métallique), qui conduisent à un renforcement du champ. La tenue diélectrique de liquide est ainsi abaissée avant d'atteindre la saturation (où se forment des gouttelettes d'eau dans l'huile).

II.1.2.2 Influence des particules solides

La présence de particules a un effet notable connu depuis longtemps sur la tenue diélectrique des liquides isolants. La comparaison de tenues diélectriques de liquides avec la norme CEI60156 peut donner des résultats inexploitable si la présence de particules n'est pas bien contrôlée.

Un exemple est présenté sur la Fig. II-4. Les mesures de tension de claquage ont été effectuées avec des huiles non filtrées et des huiles filtrées à l'aide d'une membrane (pores de $0,2 \mu\text{m}$). L'huile minérale non filtrée a une tension de claquage nettement plus basse que l'huile filtrée. Le même résultat peut être observé avec des esters. Ceci montre que les mesures à l'aide la norme CEI60156 (ou ASTM D1816) ne sont utilisables pour comparer les liquides que si la teneur en eau et la teneur en particules du liquide sont rigoureusement contrôlées.

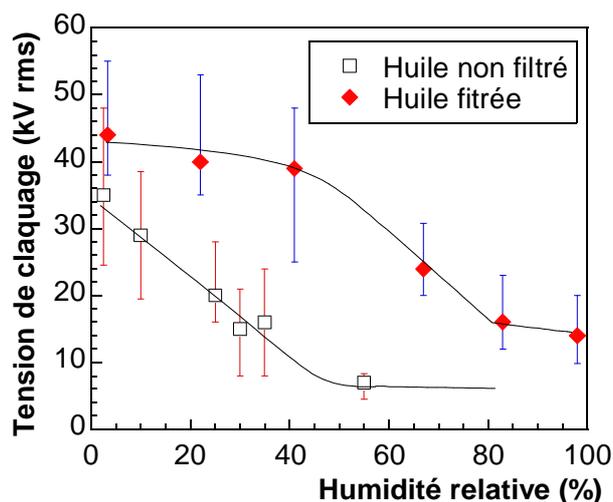


Fig. II-4 Tenue diélectrique de l'huile minérale dans les deux cas : non filtré et filtré par membrane de $0,2 \mu\text{m}$ [38]

L'influence des particules peut être quantifiée en ajoutant une quantité connue de particules (par exemple de cellulose) dans des liquides très bien filtrés. La présence de particules de cellulose est importante dans le cas de transformateurs, dans lesquels le liquide est en contact permanent avec du papier et des cartons isolants.

La présence de cellulose conduit à une dégradation notable de la tension de claquage dans l'huile minérale et dans les esters uniquement en présence d'eau (Fig. II-5). Cette dégradation est expliquée par le changement de conductivité et de permittivité des particules, conduisant à un renforcement local du champ électrique.

Il est remarquable de constater que la cellulose a plus d'influence sur la tenue diélectrique des esters que celle de l'huile minérale. Par exemple, avec une même quantité de cellulose ajoutée (17 mg/l), à une teneur relative en eau de 20%, une dégradation de 30% de la tension de claquage est observée dans l'ester naturel RS50, comparée à 20% dans l'huile minérale (Fig. II-5). Cette différence peut provenir d'une teneur réelle en eau beaucoup plus élevée dans les esters que dans l'huile minérale. A température ambiante, une teneur en eau relative de 20% correspond à une quantité de 11ppm dans l'huile minérale alors qu'elle atteint 200 ppm dans l'ester RS50.

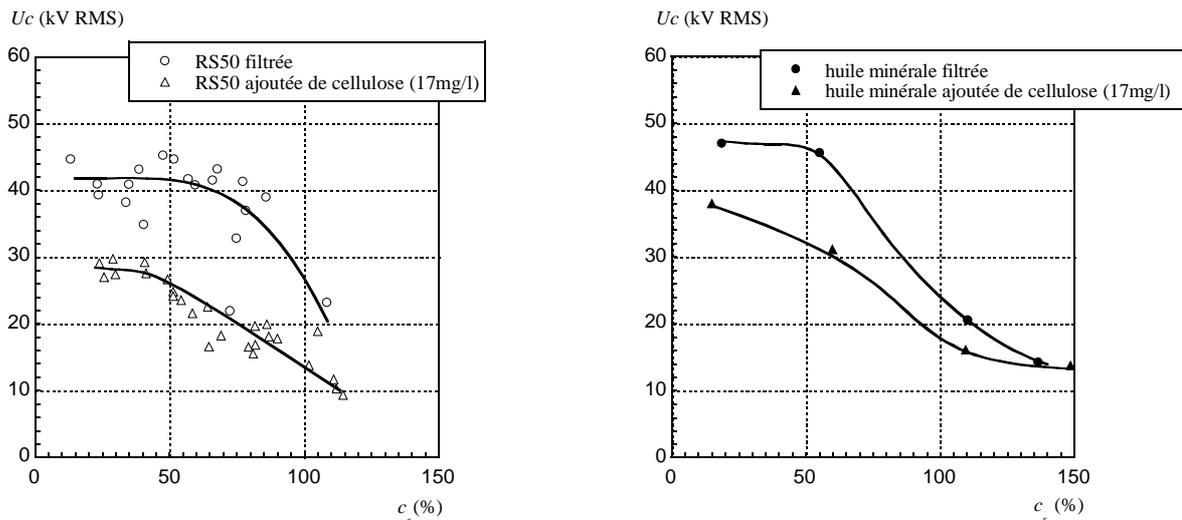


Fig. II-5 Tension de claquage de l'ester naturel RS50 et l'huile minérale Univolt 54 en fonction de la teneur en eau en présence et non présence de particules cellulose [30]

II.1.2.3 Limites des essais normalisés CEI60156

Comme présenté dans la partie précédente, les mesures de tension de claquage par la norme CEI60156 (ou ASTM D1816) sont très sensibles à la présence d'eau et de particules. La comparaison de liquides en utilisant cette méthode risque d'être peu fiable si ces paramètres ne sont pas maîtrisés.

Par ailleurs, ces mesures comparent la tenue diélectrique des liquides dans des conditions de champ quasi uniforme et à très petite distance entre les électrodes (1-2 mm). Ces conditions sont très éloignées des conditions réelles d'utilisation, par exemple dans un transformateur de puissance (champ renforcé dans certaines régions, valeur maximum inférieure à 5 kV/mm). Avec la configuration d'électrodes imposée par la norme, le champ électrique est quasi homogène et très élevé (30-40 kV/mm). Une décharge électrique, une fois amorcée localement, traversera systématiquement l'espace inter électrode pour conduire au claquage. La tension de claquage ainsi mesurée ne reflète que les conditions nécessaires pour la génération d'une décharge, mais ne donne aucune information sur sa propagation, qui est souvent déterminante pour le claquage à grande distance avec des valeurs de champ moyen beaucoup plus faibles. Pour cette raison, il est nécessaire de caractériser plus en détail les phénomènes de « streamer », précurseurs du claquage des liquides.

II.1.3 Phénomènes précurseurs de type « streamer »

Le claquage d'un isolant nécessite que deux conditions soient remplies : tout d'abord que le champ local sur une des électrodes soit au moins égal au champ de génération d'une décharge et ensuite, que le champ moyen entre les électrodes permette sa propagation d'une électrode à l'autre. Il est donc très intéressant de déterminer non seulement le champ de génération, mais également les conditions de propagation pour obtenir des critères de dimensionnement. En champ très divergent, le champ de génération peut être dépassé alors que le champ moyen entre les électrodes ne permet pas la propagation de la décharge. Aucun claquage ne se produira dans ces conditions, et on observera uniquement des décharges partielles.

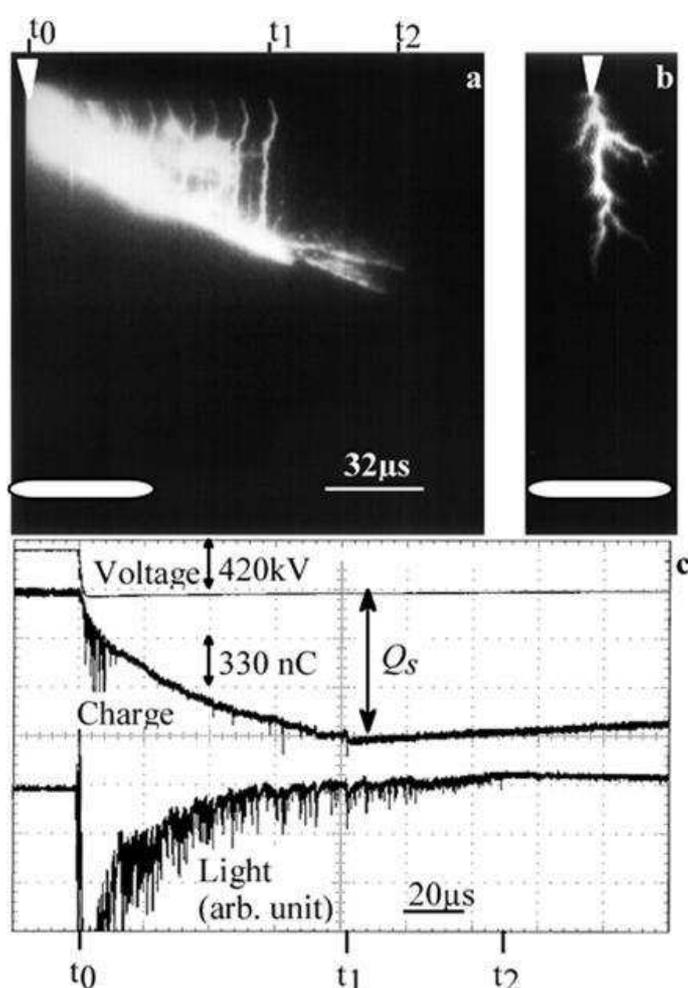


Fig. II-6 Streamer négatif dans l'huile minérale suivi par caméra à balayage de fente (a), par caméra à intensificateur (b) et, oscillogramme de la charge et de la lumière émise par le streamer (c). $U = 418$ kV, $D = 35$ cm [39]

Le terme « streamer » a été utilisé pour décrire un type particulier de propagation d'une décharge dans un gaz. Pour les liquides, ce terme est utilisé de manière très générale pour tous les phénomènes précurseurs qui se propagent. D'une manière très simplifiée, un streamer dans

un liquide est constitué d'une phase gazeuse ionisée qui apparaît dans une zone où le champ local est très élevé (plusieurs MV/cm), par exemple sur une pointe métallique, une aspérité à la surface d'une électrode, ou encore sur une particule solide qui renforce le champ. Suivant la nature du liquide et les conditions expérimentales (tension appliquée, polarité, distance, etc.) le développement d'un streamer peut prendre des formes extrêmement variées, allant de « bulles » quasiment sphériques qui se développent à faibles vitesses (quelques 100m/s), jusqu'à des formes de canaux filamenteux très fins (quelques μm de diamètre) avec des vitesses très élevées ($>100\text{km/s}$). Lorsque un streamer se propage jusqu'à l'électrode opposée, le « claquage » (arc électrique, mise en court circuit des électrodes) se produit à l'intérieur du canal de streamer. Un grand nombre de travaux ont été consacrés à la caractérisation des streamers, à l'étude des mécanismes physiques, à la modélisation de certains phénomènes (comme par exemple la dynamique du changement de phase liquide/gaz). Malgré cela, contrairement au cas des gaz, il n'existe aujourd'hui aucun modèle théorique permettant de décrire ces phénomènes complexes de manière satisfaisante et complète. Pour les besoins de notre étude, nous nous limiterons à rappeler les principaux paramètres qui décrivent le comportement des liquides dans les applications (champ local de génération, longueurs de propagation, vitesse, ...) sans rentrer dans le détail des mécanismes physiques, dont un grand nombre restent très mal connus, et qui sortent des objectifs de cette thèse.

L'étude expérimentale réalisée consistera essentiellement à caractériser séparément les phénomènes de propagation et de génération dans divers esters, et dans diverses conditions expérimentales.

II.1.4 Génération des streamers

II.1.4.1 Conditions locales de génération

Les travaux réalisés sur la génération des streamers ont concerné d'une part l'étude des mécanismes physiques responsables de l'apparition des streamers dans des conditions de laboratoire très bien contrôlées (pointes très fines, liquides purs, tension impulsionnelles rapides pour éviter la formation de charge d'espace), et d'autre part les travaux visant à caractériser la génération dans des conditions proches de la réalité industrielle (champs peu divergents, électrodes de grandes tailles, tension alternative, etc.).

Avec des pointes très fines (rayon de quelques μm) et dans des conditions où le champ est très peu modifié par l'injection de charges d'espace (hydrocarbures ultra-purs sous tension continue, ou impulsions à front raide [40], il a été montré que la génération d'un streamer intervient pour des valeurs de champ très élevées, supérieures à environ 5MV/cm (par exemple 7MV/cm dans le cyclohexane en polarité négative). En polarité négative, un mécanisme d'avalanche électronique en phase liquide conduisant à l'apparition d'une micro-cavité a pu être mis en évidence. En polarité positive, les mécanismes sont moins clairs et

semblent plutôt résulter d'un échauffement très localisé du liquide dû à une injection de charge sous champ très élevé [40]. Ces valeurs de champ local sont largement plus élevées que les valeurs de champ constatées à l'échelle « macroscopique » : par exemple dans l'essai normalisé CEI 60156, le claquage entre sphères intervient à environ $40kV_{\text{eff.}}/\text{mm}$, soit un champ environ 10 fois plus faible. Cet effet est généralement attribué à la présence de « défauts » microscopiques qui renforcent le champ (défauts de surface, particules solides) lorsque les électrodes sont de grandes dimensions. Ceci conduit en pratique à un effet « d'échelle », connu depuis longtemps et très important pour les applications.

II.1.4.2 Champ de génération : « effet d'échelle »

Le champ de génération de streamers dans l'huile minérale de transformateur, mesuré en géométrie pointe/plan et tige/plan sous créneau de tension, est présenté sur la Fig. II-7. Le rayon de courbure de la pointe ou de la tige a été varié dans un large domaine : de quelques μm à plusieurs dizaines de mm. Le champ calculé pour la génération du streamer (E_g) dans l'huile minérale n'est pas constant : il vaut environ $10\text{MV}/\text{cm}$ pour une pointe très fine (rayon de $1\mu\text{m}$), et décroît régulièrement quand la taille de l'électrode augmente, jusqu'à environ $0,3\text{MV}/\text{cm}$ pour un rayon de 20mm . Dans les deux polarités de la tension, la décroissance du champ de génération suit une loi du type $E_g \approx r_p^{-0,4}$. Cet effet de diminution de E_g s'appelle « effet d'échelle », et a été également observé dans plusieurs liquides tels que l'huile blanche[41], des hydrocarbures purs [42]. Cet effet peut s'expliquer par la probabilité d'existence de défauts (aspérité, rayures, particules), qui augmente avec la taille de l'électrode et le volume de liquide soumis au champ élevé [43].

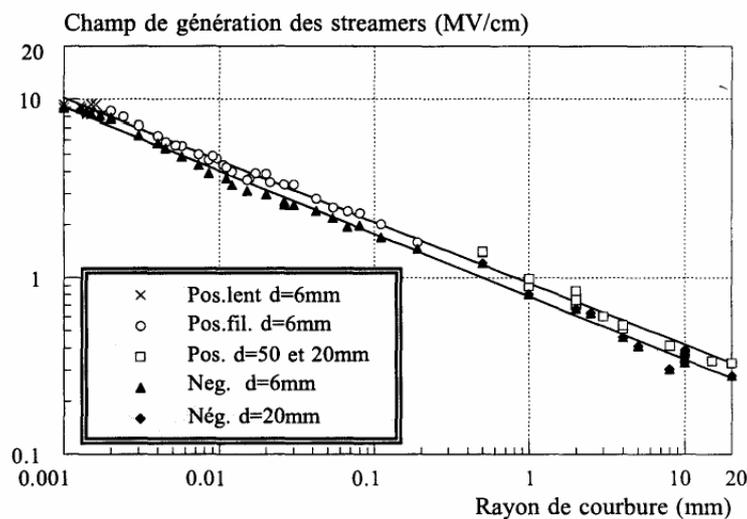


Fig. II-7 Champ « macroscopique » de génération des streamer dans l'huile minérale en fonction du rayon de courbure d'électrode [44]

Cet effet d'échelle a été également vérifié pour l'ester naturel RS50 [30]. La comparaison avec l'huile minérale donne un champ de génération comparable dans l'ester naturel RS50 et l'huile minérale (Fig. II-8).

Si le champ électrique est quasi-uniforme, alors la décharge se formera pour une valeur du champ moyen qui atteint le champ de génération, et qui est très supérieur au champ requis pour la propagation d'une décharge (quelques 10kV/cm). Le claquage se produira donc systématiquement. Ceci est cohérent avec la mesure d'une tension de claquage comparable dans les huiles végétales et minérales bien filtrées en champ quasi uniforme (Fig. II-3b).

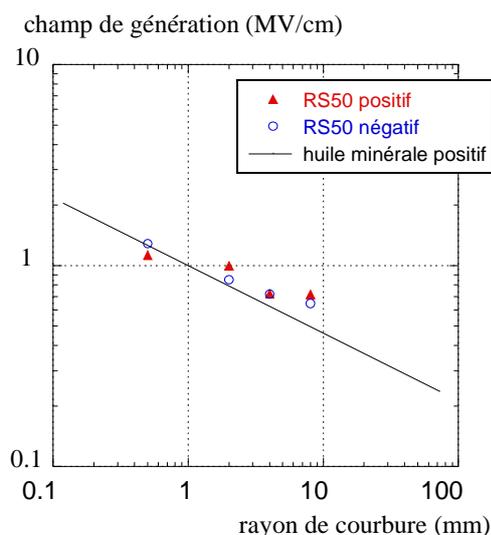


Fig. II-8 Champ de génération du streamer sous tension impulsionnelle (probabilité d'apparition de 50%) en fonction du rayon de courbure de l'électrode, résultats obtenus dans l'ester naturel RS50 et l'huile minérale [30]

Sous tension impulsionnelle en géométrie divergente, la tension de génération des streamers dans l'huile minérale n'est pratiquement pas affectée par la présence d'eau (Fig. II-9) quand la teneur en eau passe de 10 ppm ($\approx 20\%$ de teneur en eau relative) jusqu'à 50ppm (qui correspond à la saturation en eau). De même, l'influence des particules dans ces conditions est faible. Ce point peut être déduit des mesures de tension de claquage en champ uniforme. En effet, en champ uniforme et sous choc de foudre 1,2/50 μ s, l'huile très bien filtrée et l'huile fortement polluée ont pratiquement la même tension de claquage [43]. Ceci est logique si l'on considère que les particules comprises dans le volume du liquide n'ont pas le temps de migrer vers les électrodes (sous l'effet des forces électrostatiques) pendant une impulsion très courte de quelques μ s. L'effet « d'échelle » de la Fig. II-7 sous tension impulsionnelle est attribuable essentiellement à l'influence de la surface d'électrode qui augmente.

En tension alternative, nous avons vu que la génération des streamer est favorisée par la présence de particules conductrices (par exemple cellulose en présence d'eau) dans le volume du liquide. L'influence des particules est plus nette avec les électrodes de grand rayon de courbure (champ faiblement divergent) qu'avec des pointes fines. Dans ces conditions, un effet du « volume » de liquide soumis au champ s'ajoute à l'effet de « surface » de la figure Fig. II-7 pour produire une dégradation encore plus importante du champ de claquage [43]. Avec des pointes fines, on observe de plus un effet inversé de l'eau : la génération devient plus difficile quand la teneur en eau est augmentée (Fig. II-9). Cet effet inverse a été expliqué par le fait que l'injection de charge, renforcée par la présence d'eau, réduit le champ autour de la tige et empêche la génération du streamer.

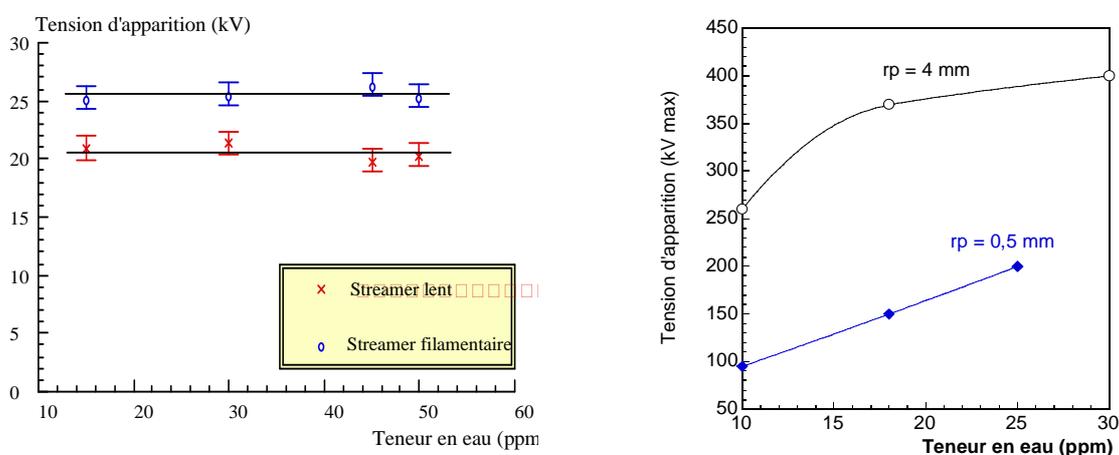


Fig. II-9 Influence de l'eau sur la génération de streamer dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle (gauche) et alternative (droite) [44]

II.1.4.3 Conditions favorables à la comparaison de différents liquides

En fonction de ce qui précède, nous pouvons déduire que les mesures sous impulsion de tension sont plus favorables pour comparer les propriétés de génération de différents liquides que sous tension alternative, qui sont fortement dépendantes de la présence d'eau et de particules, difficile à maîtriser et quantifier. Les mesures sous tension impulsionnelle sont beaucoup moins influencées par ces paramètres, et nous utiliserons cette méthode pour comparer différents esters. Nous utiliserons une géométrie de type tige-plan avec un rayon de quelques mm (les pointes très fines donnent un champ très divergent très éloigné des conditions réelles, et une géométrie uniforme conduit à des tensions d'essai trop élevées).

II.1.5 Propagation des streamers

II.1.5.1 Généralité sur la propagation de streamers dans les liquides

Comme noté plus haut, la propagation des streamers dans les liquides est un phénomène extrêmement complexe qui met en jeu de nombreux mécanismes physiques couplés, dont beaucoup restent mal connus, en particulier :

- les mécanismes d'injection et/ou de multiplication de charge en phase liquide sous champ très élevé (plusieurs MV/cm) à la « tête » du streamer ;

- la dynamique du changement de phase liquide/gaz, les phénomènes mécaniques associés au développement de la cavité gazeuse, à des vitesses qui peuvent dépasser 100 fois la vitesse du son ;

- les processus d'ionisation et de conduction à l'intérieur des canaux gazeux en expansion, hors d'équilibre de pression, avec des pressions internes très élevées : plusieurs dizaines de bars pour les streamers de vitesse « moyenne » (quelques km/s) [42], et probablement plusieurs centaines pour les streamers rapides (>10km/s).

Les streamers n'ont pas jusqu'à présent pas été modélisés de façon satisfaisante, et restent encore largement étudiés de manière expérimentale. Nous rappelons ici leurs principales caractéristiques qui déterminent le comportement d'un liquide sous haute tension, et qui fournissent des données utiles pour le dimensionnement d'une isolation, en particulier dans le cas de l'huile minérale et des esters.

La propagation des streamers dans l'huile minérale a fait l'objet de nombreuses études. Les études ont été effectuées à petite distance (quelques mm) [45][46] et jusqu'à de très grandes distances (jusqu'à 1m) [39][47][48][49][50], sous tension impulsionnelle ([39],[45]-[48]) ou alternative ([49][50]). Les principales caractéristiques suivantes ont été mises en évidence :

- Si le champ électrique « moyen » (tension/distance) est insuffisant, les streamers s'arrêtent à une certaine distance (longueur d'arrêt). La longueur d'arrêt augmente avec la tension appliquée. Le streamer peut traverser l'espace entre les électrodes et conduire à un claquage si le champ moyen est suffisamment important, de l'ordre de 10 à 20kV/cm à grande distance dans l'huile minérale.
- La vitesse de propagation croît avec la tension. Différents « modes » de propagation, basés principalement à partir de la vitesse de propagation, ont été définis pour faciliter la description des phénomènes. Le passage d'un « mode » à un autre, est caractérisé par une transition brutale de la vitesse qui suggère que des mécanismes de différentes natures sont mis en jeu. Dans l'huile minérale, les expériences réalisées sur une très large gamme de tensions (5 kV à 500kV)

permettent d'identifier quatre « modes » en polarité positive [51]. 1^{er} mode : streamers lents (0,1 – 0,5km/s) en forme de bulle irrégulière, 2^{ème} mode : streamers filamenteux (2 – 5 km/s, responsables du claquage en géométrie pointe-plan), 3^{ème} mode : filamenteux rapides (≈ 10 km/s), 4^{ème} mode : filamenteux ultra-rapides (>100 km/s).

- Durant la propagation, deux « modes » différents peuvent se succéder (par exemple 3^{ème} mode suivi du 2^{ème}), et la vitesse moyenne de propagation résulte de la combinaison entre ces modes (Fig. II-10). L'apparition des streamers ultra-rapides du 4^{ème} mode produit une brusque augmentation de la vitesse moyenne, à une tension appelée « tension d'accélération » (U_a).
- Pour un même liquide, la longueur d'arrêt et la vitesse de propagation des streamers positifs sont supérieures à celles mesurées pour les streamers négatifs. Les streamers positifs sont donc plus « dangereux » que les streamers négatifs.
- Les streamers émettent de la lumière et produisent des ondes de choc. Les courants transitoires sont constitués soit d'une composante continue, soit de pics brefs, ou d'une composante continue sur laquelle sont superposées des impulsions brèves. L'intensité du courant varie de quelques mA à plusieurs A et elle est souvent corrélée avec celle de la lumière émise.

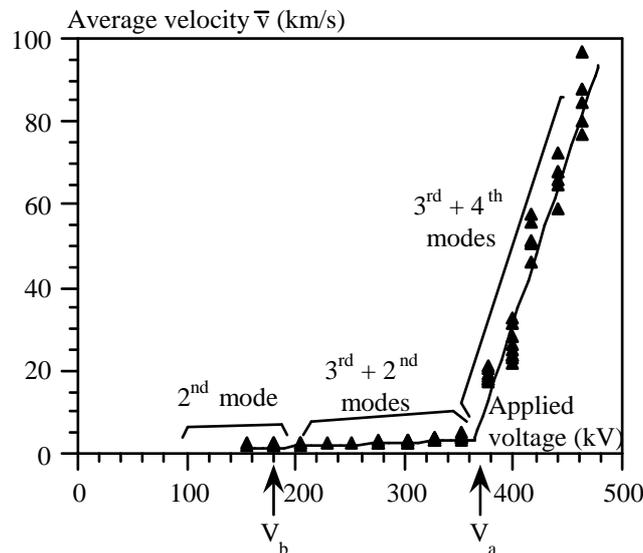


Fig. II-10 Vitesse moyenne des streamers positifs dans l'huile minérale, seuils de tension de claquage U_c et tension d'accélération U_a . $D=10$ cm [39]

II.1.5.2 Streamers dans l'ester naturel RS50

Les études de propagation de streamers dans l'ester naturel RS50 ont été effectuées par C. Tran-Duy [30] en utilisant la configuration d'électrode pointe plan. Si la génération est comparable dans l'ester RS50 et l'huile minérale, la propagation est bien différente entre ces

deux liquides. Sur la Fig. II-11 nous avons comparé la longueur d'arrêt et la vitesse de propagation dans l'ester RS50 et l'huile minérale. La longueur d'arrêt des streamers augmente avec la tension, jusqu'à la tension U_c à laquelle le claquage se produit (quand la longueur des streamers devient égale à la distance interélectrode).

Dans l'ester naturel RS50, la tension d'accélération U_a est pratiquement identique à la tension de claquage U_c . Ceci signifie que le claquage est dû à des streamers rapides (vitesse $>100\text{km/s}$) dans l'ester RS50. Dans l'huile minérale, U_a est très supérieure à U_c . Les streamers rapides n'apparaissent qu'à des tensions beaucoup plus élevées que la tension de claquage, qui est dû à des streamers lents (vitesse $\approx 2\text{km/s}$) dans l'huile minérale.

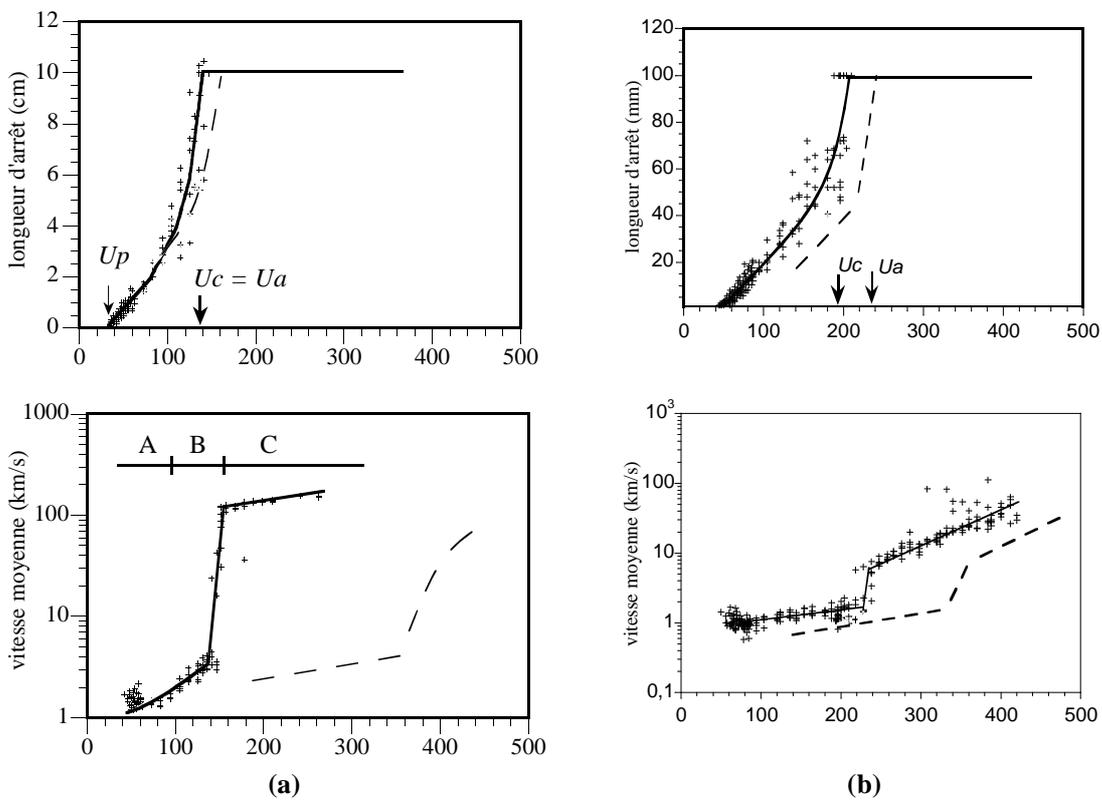


Fig. II-11 Longueur d'arrêt et vitesse de propagation dans l'ester naturel RS50 en polarité positive (a) et polarité négative (b). $D=10\text{cm}$. Les lignes pointillées sont les résultats dans l'huile minérale [52]

La comparaison de la tension de claquage et de la tension d'accélération dans les deux liquides, pour plusieurs distances interélectrodes, est présentée dans la Fig. II-12a et b. Avec les deux polarités de la tension, la tension d'accélération U_a de l'huile minérale est toujours beaucoup plus élevée que la tension de claquage U_c . Le claquage dans l'huile minérale est dû ainsi aux streamers lents (vitesse $\approx 2\text{ km/s}$) dans toutes les conditions. Dans l'huile RS50, U_a n'est supérieure à U_c que pour les distances $D = 2\text{cm}$ et 5cm . Pour des distances plus importantes, la tension d'accélération est pratiquement égale à la tension de claquage. Avec

les distances de 10cm et 20cm et la polarité positive de la pointe, le claquage est dû à des streamers rapides ayant une vitesse supérieure à 100 km/s.

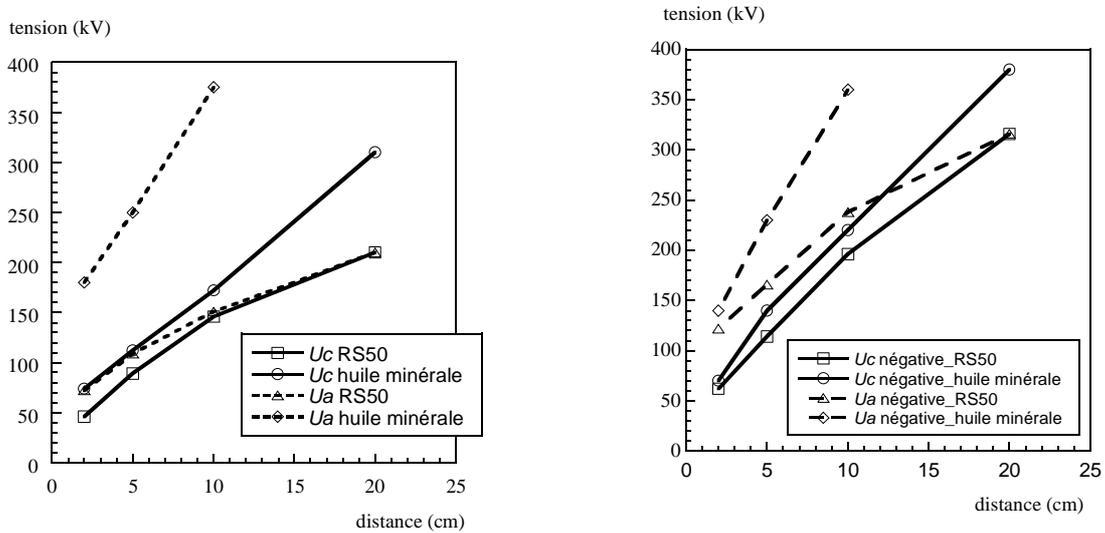
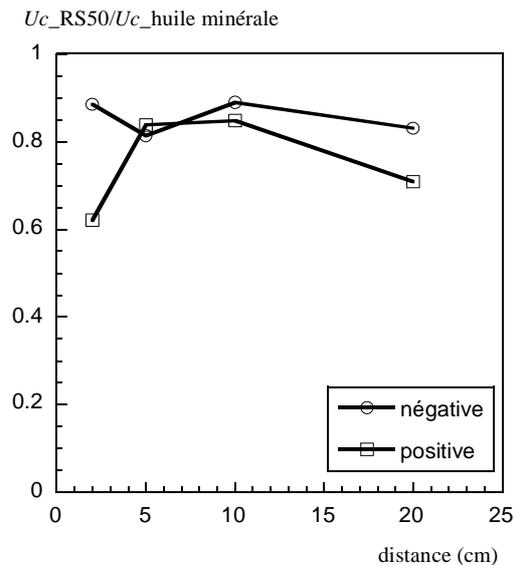


Fig. II-12 Comparaison de tension d'accélération RS50 et l'huile minérale [52]

Il a été montré dans [51] que la chute de tension interne dans les canaux de streamers rapides (3^{ème} et 4^{ème} modes), est de quelques kV/cm, au lieu de 10 à 20 kV/cm pour les streamers de 2^{ème} mode. Etant plus « conducteurs », les streamers rapides peuvent donc se propager beaucoup plus loin à tension équivalente, ce qui explique que la tension de claquage de l'huile RS50 est toujours inférieure à celle de l'huile minérale. La Fig. II-13 montre le rapport des tensions de claquage en fonction de la distance. Pour les deux polarités, ce rapport se situe entre 0,6 et 0,95. Les streamers peuvent traverser l'espace interélectrode à une tension plus basse et avec une vitesse plus élevée dans l'huile RS50 que dans l'huile minérale.

Un autre aspect négatif du comportement de l'ester RS50 provient de la rapidité de propagation. Pendant une surtension brève du type onde de foudre 1.2/50µs, les streamers rapides pourront se propager beaucoup plus loin, et éventuellement entraîner le claquage. Par exemple, pour une durée de 50µs et une vitesse de 2km/s, la longueur de propagation maximum possible est de 10cm, et de 5m à 100km/s. Pour une distance d'isolation de 20 cm, le claquage surviendra à 100km/s, et pas à 2km/s.

Fig. II-13 Tension de claquage V_c RS50 / V_c HM [52]

II.1.5.3 Méthodes de caractérisation de différents liquides

Pour caractériser les différents esters envisagés, nous procéderons à des mesures de longueur d'arrêt, vitesse de propagation, tension de claquage dans des conditions identiques à celles déjà utilisées pour l'ester RS50. Plusieurs paramètres physiques liés à la décharge tels que le courant, la charge, l'intensité de la lumière émise seront également mesurés lors de ces essais.

II.2 Techniques expérimentales

II.2.1 Configurations d'électrodes

La génération des streamers sous impulsion a été étudiée dans un système d'électrodes tige-plan avec la tige connectée à la haute tension. Pour limiter le nombre d'essais, nous avons utilisé un seul rayon de courbure r de la tige (4 mm), et une distance de 20mm. Cette configuration permet de créer une distribution de champ peu divergente entre les électrodes.

Pour étudier la propagation des streamers, la tige est remplacée par une pointe fine ayant un diamètre de 1mm et un rayon de courbure d'environ 100 μ m, avec des distances de 2 à 10 cm. Le champ électrique est alors fortement renforcé autour de la pointe pour pouvoir générer des streamers à des tensions peu élevées.

Les électrodes tige ou pointe sont placées face à un plan en duralumin de diamètre $\Phi = 200$ mm et d'épaisseur 10mm. Les bords du plan sont arrondis afin de limiter le renforcement de champ dans cette zone. La distance entre la tige ou la pointe et le plan peut être variée de 0 à 20 cm.

II.2.2 Cellule d'essai

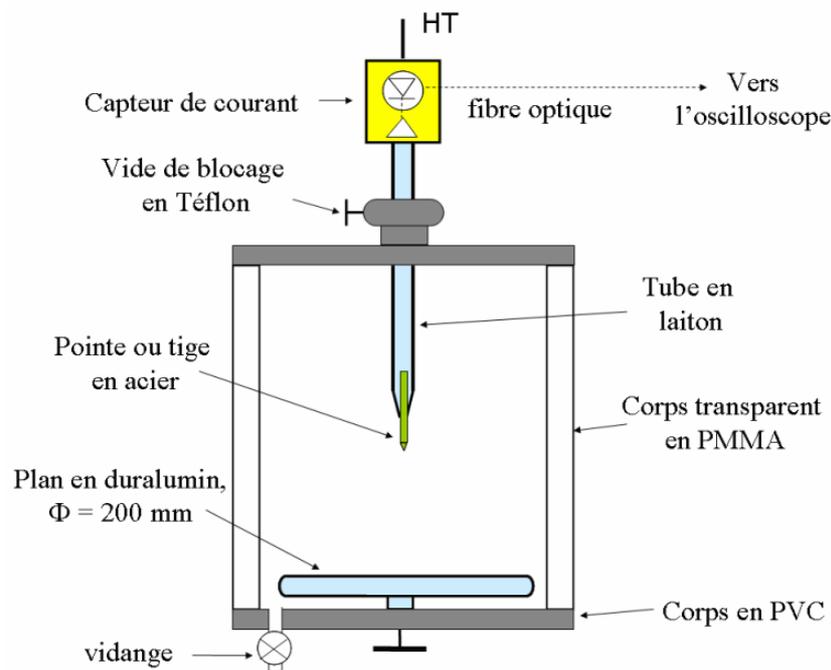


Fig. II-14 Cellule d'essais

Les électrodes sont placées dans une cellule parallélépipédique de dimensions 220 x 220 x 300 mm. Le corps transparent de la cellule est en PMMA, ce qui permet de visualiser le phénomène de streamer. La pointe ou la tige est fixée à un tube porte-électrode de diamètre $\Phi = 20$ mm, qui intègre également un capteur de courant (ou de charge) au potentiel de la haute tension.

II.2.3 Générateur d'impulsion

La tension est fournie par un générateur de Marx de cinq étages. Chaque étage est constitué d'une capacité $0,01\mu\text{F} - 100$ kV, des éclateurs et des résistances de charge R_c et de décharge R_d comme présentés sur la Fig. II-15. Les condensateurs sont chargés par une tension continue par l'intermédiaire d'un transformateur monophasé 220V/ 80 kV, 50 Hz et à l'aide de deux redresseurs 140kV – 20 mA placés en série. Ce générateur de Marx peut fournir à sa sortie une tension impulsionnelle maximale de 450 kV.

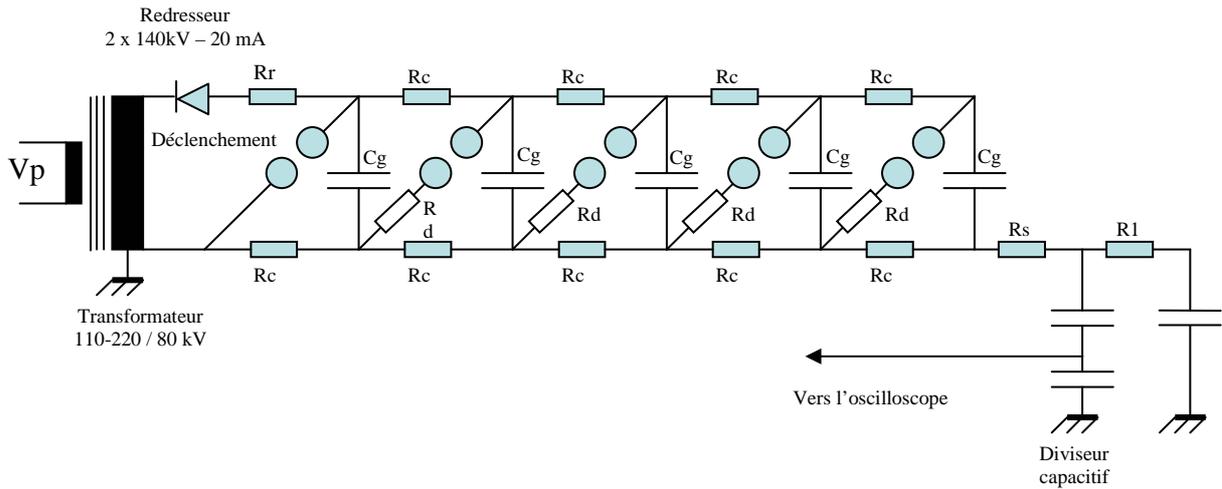


Fig. II-15 Schéma équivalent du générateur de Marx

Les paramètres du circuit (R_c , R_d , R_s , C_g) ont été choisis pour que la tension de sortie présente un temps de montée rapide (400ns) et une durée de descente très lente (soit 1400 μ s à mi hauteur). Le temps de montée rapide facilite l'étude des streamers rapides et le temps de descente long permet de maintenir la tension pratiquement constante pendant toute la propagation du streamer (de durée maximum environ 100 μ s), ce qui ne serait pas le cas avec une onde classique de type 1,2/50 μ s. L'énergie fournie par le générateur est faible (< 1 kJ). Par ailleurs, pour encore réduire l'énergie dissipée pendant le claquage, une résistance $R_1 = 300 \Omega$ est connectée en série avec la cellule. La limitation de l'énergie dissipée permet de limiter la dégradation du liquide et des électrodes (en particulier de la pointe), ce qui permet de réaliser un nombre élevé d'essais avec des conditions stables sans changer le liquide ou les électrodes.

II.2.4 Système de mesure de courant

Le courant transitoire associé aux streamers est mesuré à l'aide d'un capteur couplé par fibre optique, fabriqué au laboratoire G2Elab. Le courant est mesuré à travers une résistance non inductive de 5 Ω en série avec la pointe (Fig. II-16). Le signal est en suite amplifié, converti et transmis par fibre optique à l'oscilloscope. Notons que du fait de la mono-polarité du système de transmission opto-électronique, le signal du courant apparaît toujours en négatif sur les enregistrements, quelle que soit la polarité de la haute tension.

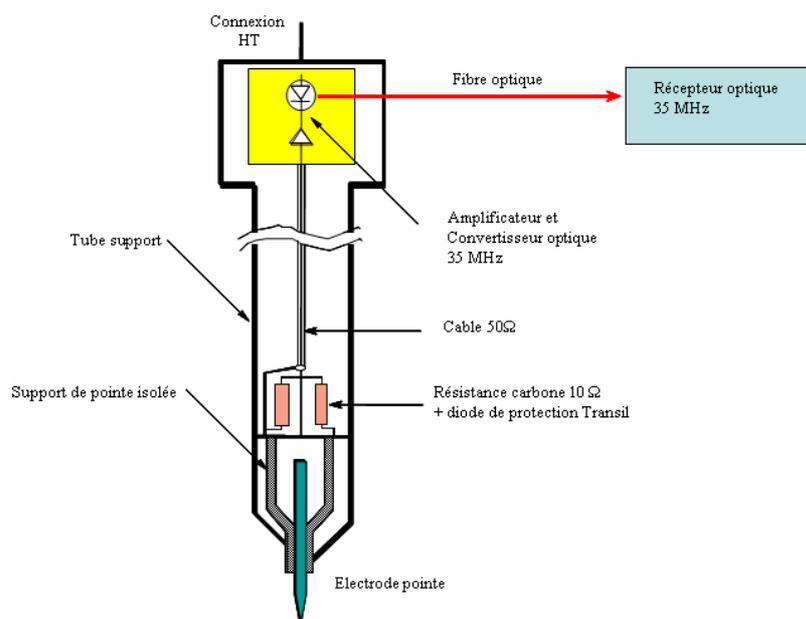


Fig. II-16 Système de mesure de courant

Le système de mesure entièrement flottant est intégré dans le support de pointe relié à la haute tension. Ce système offre de nombreux avantages par rapport à une mesure du côté de la masse [53]:

- On ne mesure que le courant de charge de la pointe durant le temps de montée de la tension (quelques centaines de mA) au lieu du courant total de charge de la cellule (plusieurs dizaines d'ampères).
- Ce montage conduit également à une forte réduction de l'influence des perturbations électromagnétiques très élevées rayonnées par le générateur de Marx, et des courants de masse.

Le signal transmis par fibre optique est enregistré à l'aide d'un oscilloscope (Tektronix TDS544A) à une vitesse d'échantillonnage de 250Ms s^{-1} . Ce système permet de mesurer le courant transitoire avec une sensibilité maximale de quelques mA et une bande passante de l'ordre de 35 MHz.

II.2.5 Système de visualisation

La visualisation des streamers s'effectue avec un intensificateur d'image obturable (Hamamatsu V3063U, domaine spectral 450–850 nm), couplé à une caméra vidéo. Les images des streamers sont traitées à l'aide d'une carte d'acquisition d'image DT3102 (64 bits, résolution 768x576 pixels) puis stockées sur ordinateur. Les caractéristiques géométriques (longueur, diamètre...) du streamer sont mesurées à partir des images enregistrées.

L'ouverture de l'intensificateur est commandée par une impulsion synchronisée avec le front de montée de la tension. La durée d'ouverture est réglable de 5ns à plusieurs dizaines de μ s, ainsi que le retard de l'ouverture par rapport à l'impulsion de tension.

II.2.6 Schéma général

La Fig. II-17 montre une vue d'ensemble du banc d'essai comportant le générateur de Marx, le diviseur de tension, la cellule d'essais, la caméra à intensificateur et le boîtier contenant les systèmes de mesure de charge ou de courant. Ce banc d'essais est placé à l'intérieur d'une cage de Faraday en cuivre de dimensions: 4 m x 4 m x 5 m.

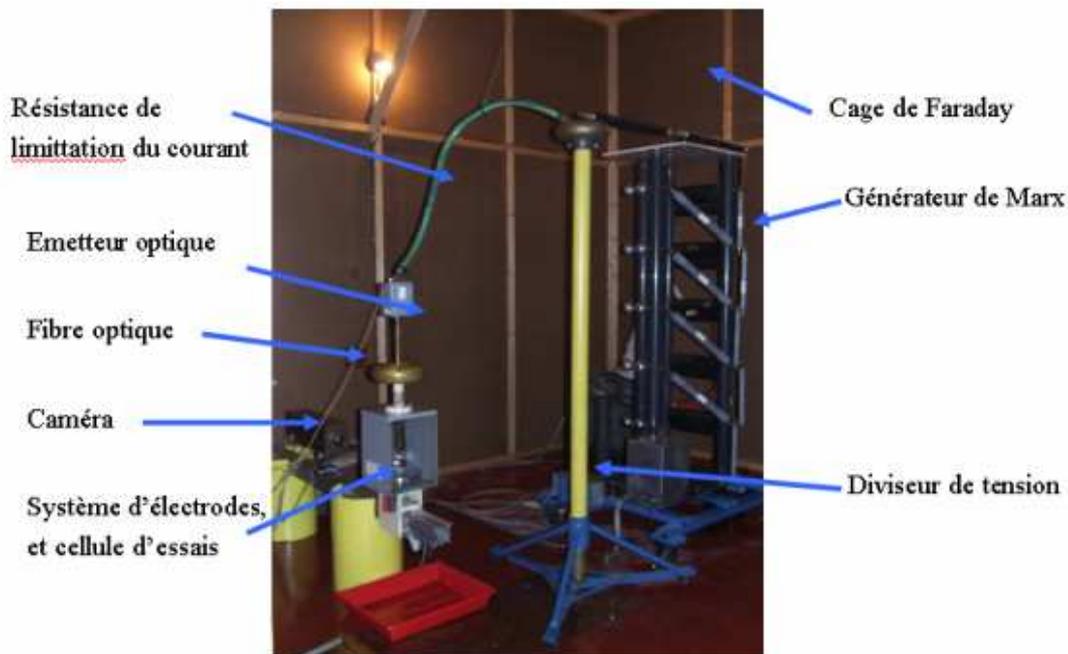


Fig. II-17 Vue d'ensemble du banc d'essais

II.2.7 Mesures de claquage dérivées de la norme CEI60156

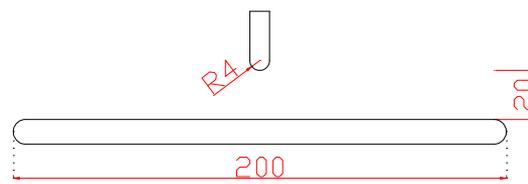
Quelques mesures dans la configuration sphère – sphère en utilisant une méthode dérivée de la norme CEI60156 [54] ont été également effectuées, dans le but de compléter les résultats déjà obtenus par C. Tran Duy sur l'huile RS 50.

La tension de claquage est mesurée dans la configuration sphère-sphère. La distance entre les deux électrodes sphériques est de 1mm. Une rampe de tension alternative de $2\pm 0,2$ kV/s est appliquée jusqu'au claquage. Un système de filtration en boucle fermée (porosité de 10μ m) est mis en marche après chaque claquage afin d'éliminer les particules produites par ce claquage.

Les liquides testés étant visqueux (huile FR3 de Cooper), les temps de filtration et donc de pause sont deux fois plus longs que les valeurs définies dans la norme pour les huiles minérales. Les tensions de claquage ont été mesurées en fonction de la teneur en eau relative.

II.3 Résultats sur la génération de streamers

La génération des streamers est étudiée dans un système d'électrodes tige-plan comme décrit dans la partie II.2.1. La distance entre les électrodes est fixée à 20mm pour toutes les mesures. Cette configuration permet ainsi de créer une distribution de champ peu divergente (Fig. II-18). La simulation par logiciel Flux2D donne un rapport entre le champ maximal et le champ moyen $\frac{E_{\max}}{E_{\text{moyen}}} \approx 5$. Le champ moyen V/d est élevé (environ 150kV/cm), très supérieur à la valeur nécessaire à la propagation du streamer (typiquement 20kV/cm). Dans cette configuration, une fois qu'un streamer est généré, il se propage jusqu'au plan et il conduit systématiquement à un claquage. Par conséquent, la tension nécessaire pour la génération du streamer correspond à la tension de claquage mesurée.



$$\frac{E_{\max}}{E_{\text{moyen}}} \approx 5$$

Fig. II-18 Configuration d'électrode pour l'étude de la génération de streamer

II.3.1 Génération sous tension impulsionnelle

II.3.1.1 Probabilité de génération

La génération étant un phénomène affecté d'une dispersion élevée (probabilité d'apparition et retard à l'apparition), son étude nécessite une étude statistique. La probabilité de génération pendant l'impulsion de tension est mesurée par la probabilité de claquage. Celle-ci est calculée par une série de 20 chocs appliqués à la tige. La pause entre deux chocs est de 2 minutes s'il n'y a pas claquage, et de 5 minutes si un claquage se produit. La tension est augmentée par palier de 10 kV.

Les probabilités (P), mesurées avec l'esther naturel (FR3) et l'esther synthétique (Midel7131), sont présentées sur les Fig. II-19 et Fig. II-20. Les variations observées sont pratiquement identiques pour les deux liquides, que ce soit en polarité positive ou négative. La tension de claquage à P=10% de l'esther synthétique est légèrement plus basse que celle de l'esther naturel. D'autre part, comme observé dans de nombreux liquides, la tension de génération est sensiblement plus élevée en polarité positive qu'en polarité négative.

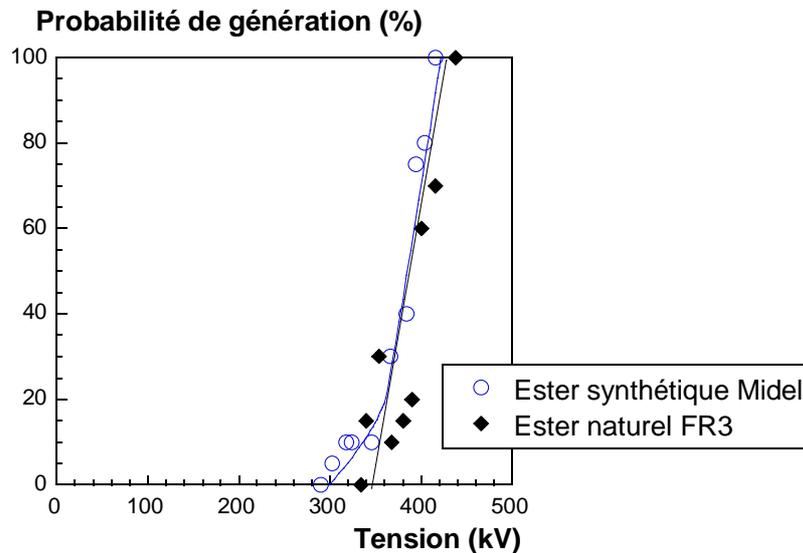


Fig. II-19 Probabilité de génération de streamer en polarité positive, D = 2cm, rayon de courbure de la tige R = 4mm

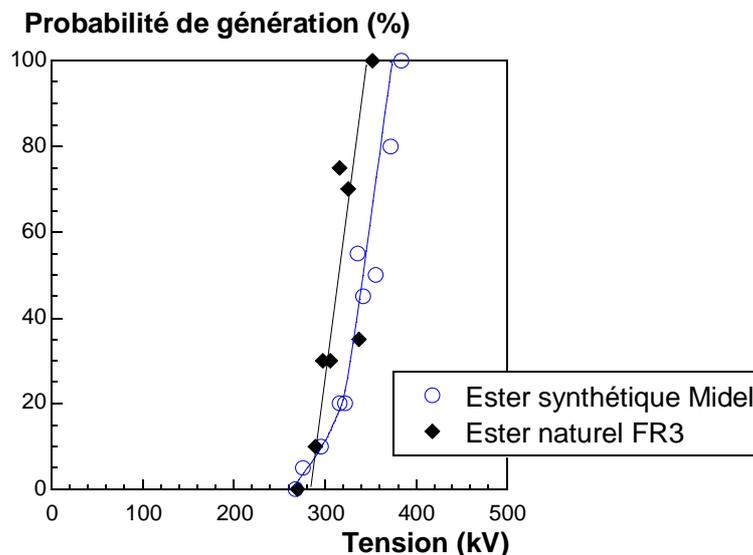


Fig. II-20 Probabilité de génération de streamer en polarité négative, D = 2cm, rayon de courbure de la tige R = 4mm

Le champ de génération du streamer a été montré comparable dans l'ester naturel RS50 et dans l'huile minérale [30]. De même, les esters FR3 et Midel7131 présentent des valeurs de tension de génération pratiquement identiques à celles de l'ester RS50 et de l'huile minérale dans les mêmes conditions d'essais.

II.3.1.2 Temps de retard à la génération

Les enregistrements de courant transitoires réalisés simultanément aux mesures de probabilité d'apparition, montrent que le streamer est toujours généré après que la tension ait atteint sa valeur maximale, avec un temps de retard t_r (Fig. II-21) qui décroît très rapidement quand la tension augmente. Une fois que le streamer est généré, il se propage pendant un temps t_p jusqu'au plan et produit un claquage. Le temps total de retard au claquage vaut $t_c = t_r + t_p$. Suivant les cas, le retard au claquage peut être dû essentiellement au retard à la génération (quand $t_p \ll t_r$) ou au temps de propagation (quand $t_p \gg t_r$).

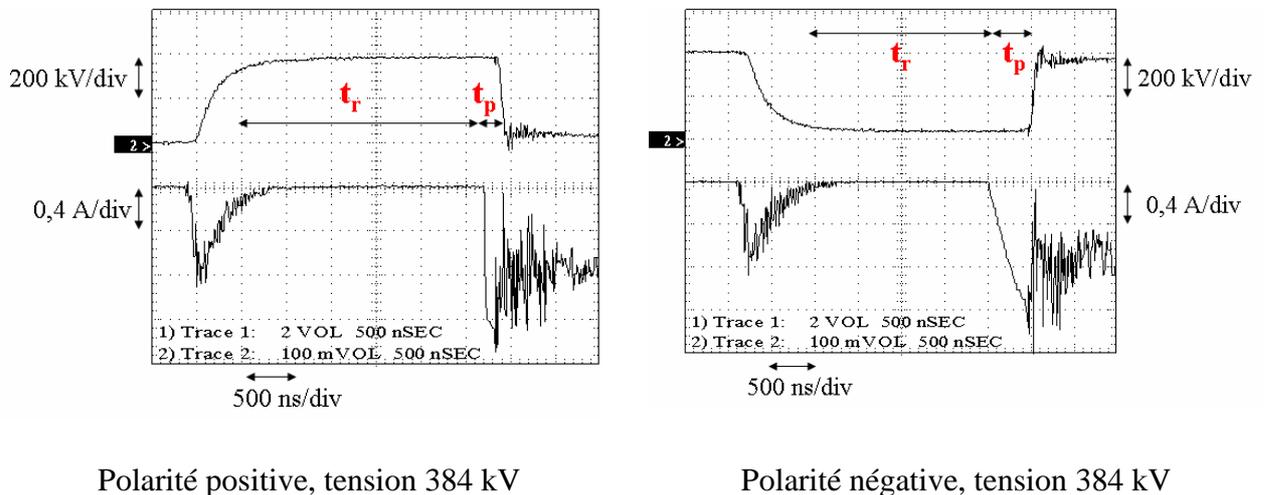


Fig. II-21 Temps de retard et temps de propagation des streamers dans l'ester synthétique, configuration tige – plan, distance interélectrode 20 mm, Haut : tension appliquée, bas : courant associé.

Dans cette condition de champ peu divergent avec une électrode de grande taille (tige arrondie, $r=4\text{mm}$) le champ de génération (environ 1MV/cm) est beaucoup plus faible qu'avec une pointe fine (10MV/cm , voir Fig. II-7). La génération est également beaucoup plus « instable », avec des temps de retard élevés pouvant aller jusqu'à $100\mu\text{s}$. Avec les pointes fines utilisées pour étudier la propagation, le temps de retard est beaucoup plus faible (souvent non mesurable). Avec la tige arrondie et une distance de 20mm , le temps de retard t_r est beaucoup plus long que le temps de propagation t_p (Fig. II-21). Dans les deux polarités, le temps de retard est très dispersé (Fig. II-22). En moyenne, t_r diminue rapidement quand la tension est augmentée. Il n'existe pas aujourd'hui de théorie permettant d'expliquer l'existence de ce temps de retard à la génération.

Avec une même valeur de tension, sur une série de 20 chocs, le temps de retard à la génération τ peut varier de quelques centaines de ns à une centaine de μ s. Ceci montre l'intérêt de la forme d'onde choisie (0,4 / 1400 μ s) au lieu du choc de foudre normalisé (1,2 / 50 μ s). En effet, pour une impulsion du type choc de foudre, lorsque le temps de retard atteint des dizaines de μ s, la tension est devenue trop faible pour que la génération du streamer ne puisse se produire. Un temps de montée rapide associé à une décroissance de la tension lente permet donc de comparer les liquides entre eux sans que la variation statistique du temps de retard n'intervienne sur la valeur mesurée. Comme pour la probabilité d'apparition, la comparaison des résultats obtenus avec les esters naturels et ester synthétique montre très peu de différences.

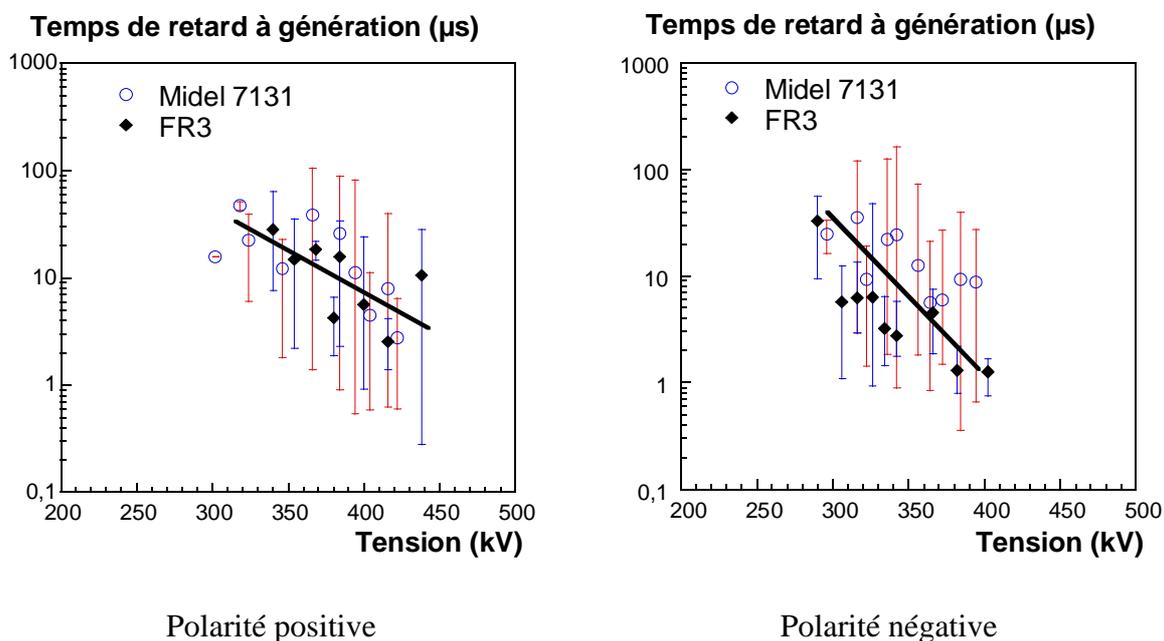


Fig. II-22 Temps de retard à génération

II.3.1.3 Influence de la teneur en eau

Comme présenté dans la partie II.1.2.1, la teneur relative en eau a une influence notable sur la tension de claquage de liquides sous tension alternative. La dégradation de la tension de claquage est liée à la présence de particules hygroscopiques dans le liquide.

Dans cette partie, nous allons vérifier l'influence de l'eau sur la génération des streamers sous tension impulsionnelle dans les huiles végétales. Les essais sont effectués dans les mêmes conditions que précédemment avec l'ester FR3 contenant soit une teneur en eau relative $C_r \approx 80\%$ soit une teneur $C_r \approx 20\%$. Il faut rappeler que la teneur en eau à saturation est beaucoup plus élevée dans les esters que dans l'huile minérale (voir Fig. II-2). A 20°C, une teneur relative en eau de 80% correspond à 44 ppm pour huile minérale, 800 ppm pour l'ester naturel FR3 et 1600 ppm pour l'ester synthétique MIDEL.

Dans les deux polarités, le comportement de l'huile humide (Cr=80%) et de l'huile sèche (Cr=20%) est très comparable (Fig. II-23 et Fig. II-24). Cela veut dire que l'eau n'a aucune influence sur la génération des streamers dans l'huile végétale, malgré une quantité d'eau très importante (\approx millier ppm).

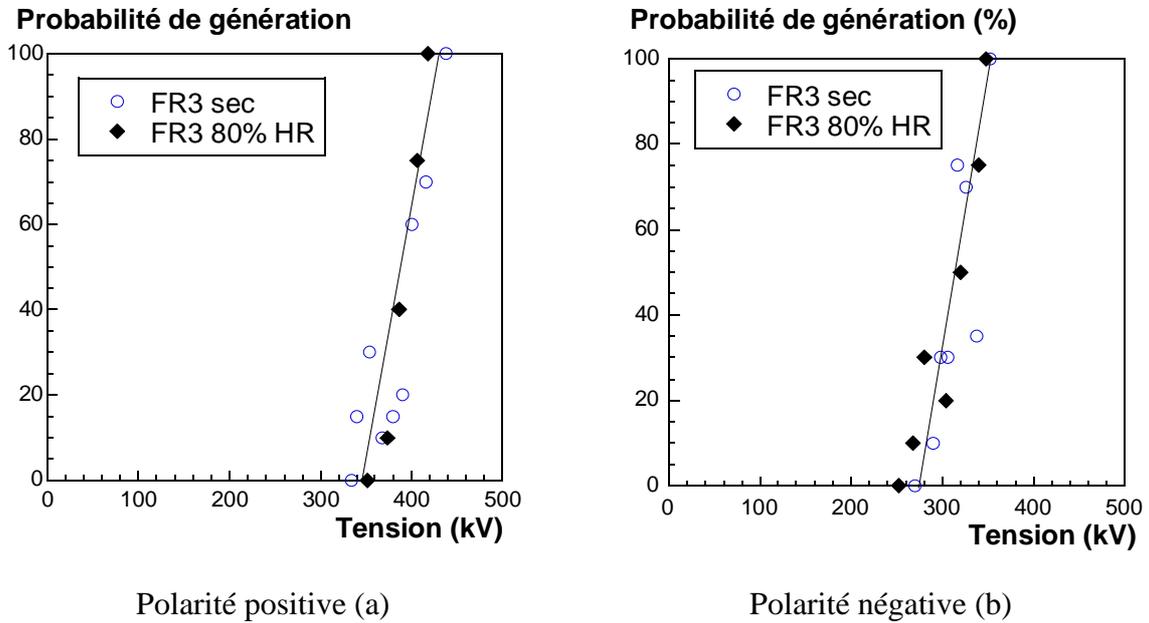


Fig. II-23 Probabilité de claquage d'huile FR3 sèche et très humide

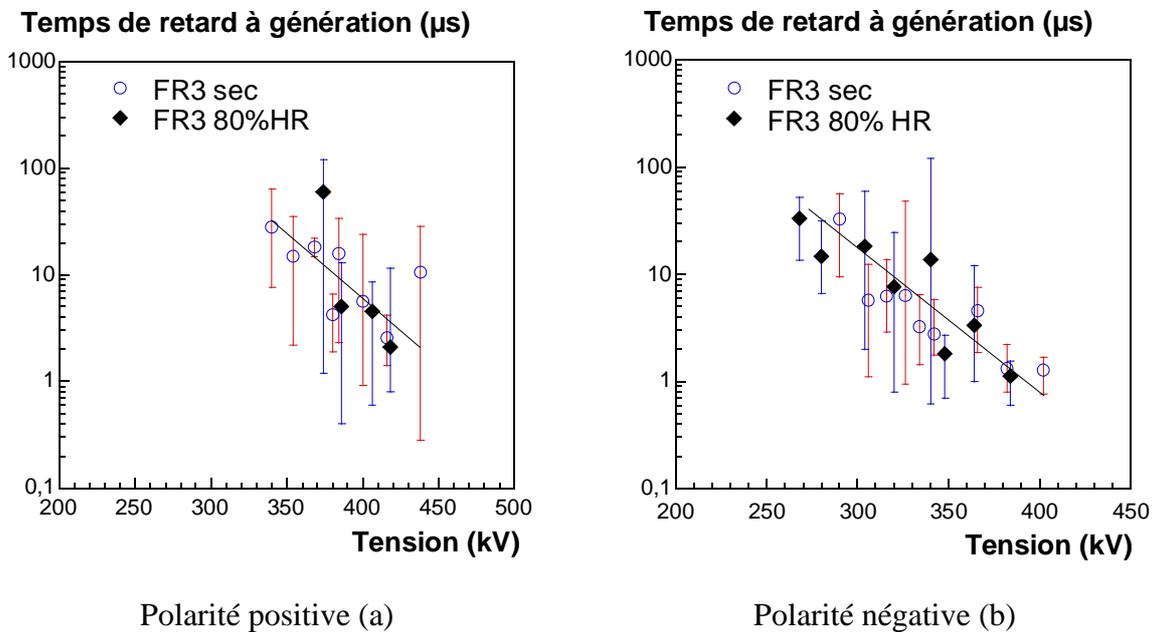


Fig. II-24 Temps de retard dans les deux cas : huile FR3 sèche et huile très humide

II.3.2 Génération en tension alternative

La Fig. II-25 présente la tension de claquage sous tension alternative en fonction de la teneur en eau relative de l'ester minéral FR3, mesurée avec la méthode dérivée de la norme CEI60156. Les résultats pour l'huile RS50 et l'huile minérale proviennent de [30].

La quantité d'eau dissoute a été ajustée à différentes valeurs à l'aide d'une enceinte climatique Votsch VC7034. Elle peut fonctionner de -70°C à 180°C avec une humidité relative de 10% à 98%. L'échantillon liquide est placé dans l'enceinte pendant une durée suffisamment longue afin d'obtenir la humidité relative souhaitée. La teneur en eau dans l'huile est contrôlée en fonction du temps à l'aide d'un coulomètre de Karl-Fischer. Des solutions avec l'humidité relative (HR) $>80\%$ sont produites en refroidissant des échantillons conditionnés à une température élevée.

Les tensions de claquage V_b avec une teneur en eau faible ($<30\%$) sont semblables dans les trois huiles (environ 40 kV / mm en valeur efficace), compte tenu de la dispersion en général élevée de ce type de mesure. On remarque cependant que l'huile FR3 présente une décroissance de V_b dès que $\text{HR} > 40\%$ alors que pour l'huile RS50 et l'huile minérale il faut atteindre $\text{HR} > 60\%$. Notons cependant que, du fait d'une solubilité plus élevée de l'eau dans les huiles végétales, si le contact avec l'humidité de l'air n'est pas possible (appareillage hermétique), la dissolution de l'eau initialement contenue dans les parties solides de l'appareillage (e.g. les isolants solides comme le papier) ne conduira pas à la saturation en eau des esters, contrairement au cas de l'huile minérale où la solubilité de l'eau est beaucoup plus faible. En quantité d'eau absolue, la tension de claquage des esters naturels est pratiquement indépendante de la teneur en eau tant que celle-ci est inférieure à 450ppm au lieu de 30ppm dans l'huile minérale.

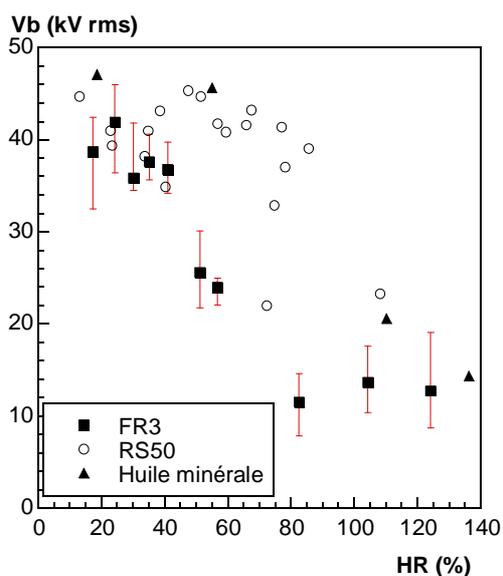


Fig. II-25 Tension de claquage en fonction de la teneur en eau relative HR

II.3.3 Comparaison des divers liquides

Les résultats sous tension alternative sont cohérents avec les mesures de tension de génération présentées précédemment. En effet, les mesures montrent que les trois liquides secs ont une tension de claquage identique, de valeur d'environ 40 – 50 kV sur une distance de 1mm entre sphères de diamètre 1cm. Avec cette configuration d'électrode, le champ électrique est quasi uniforme et le champ de claquage est assimilé au champ de génération. Le champ de génération de streamer dans ce cas est de 40 – 50 kV/mm efficace. Si on considère la valeur crête de la tension, le champ de génération est d'environ 0,65 MV/cm pour un rayon de courbure d'électrode de 5 mm. Ces valeurs sont cohérentes avec la « loi d'échelle » observée dans l'ester naturel RS50 [30] et l'huile minérale [44]. Comme montré sur la Fig. II-26, le champ de génération dans tous les liquides étudiés varie de manière comparable en fonction du rayon de courbure, suivant la loi $E_g \sim 1/R^n$ avec $n \approx 0,2$.

Du point de vue de la génération, il n'y a donc pas de différences sensibles entre les liquides, et les règles de dimensionnement appliquées depuis de très nombreuses années pour l'huile minérale peuvent être également utilisées pour les esters naturels et synthétiques. Ces liquides présenteront par ailleurs un net avantage en termes de sensibilité par rapport à la teneur en eau.

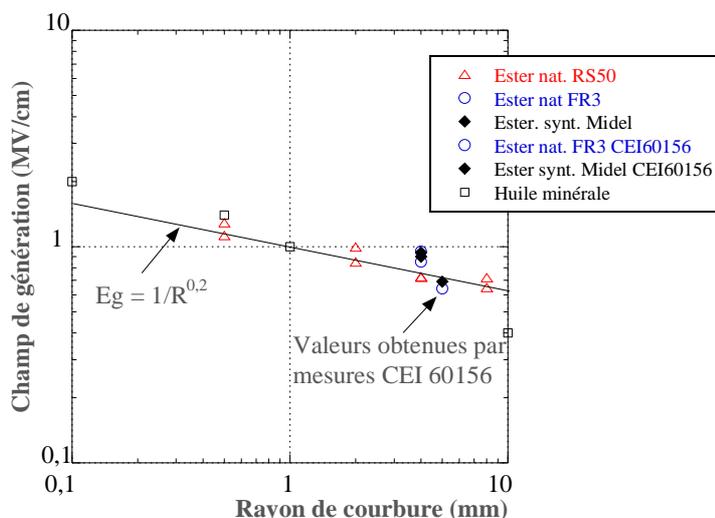


Fig. II-26 Champ de génération de streamer en fonction du rayon de courbure de l'électrode

II.4 Résultats sur la propagation des streamers

Pour étudier la propagation des streamers, la tige est remplacée par une pointe fine ayant un rayon de courbure $\approx 100\mu\text{m}$. La distance entre les électrodes a été variée de 2cm jusqu'à 10cm. Dans cette configuration, la distribution de champ devient très divergente. Le rapport entre le champ maximal autour de la pointe et le champ moyen peut être calculé par l'approximation hyperboloïdale (Eq. II.2) [55].

$$\frac{E_{\max}}{E_{\text{moyen}}} = \frac{2L}{r_{\text{pointe}} \ln\left(\frac{4L}{r_{\text{pointe}}}\right)} \quad \text{Eq. II.2}$$

Avec les distances 2cm, 5cm et 10cm entre le plan et la pointe, le rapport $E_{\max} / E_{\text{moyen}}$ est respectivement de 60, 131 et 241. Le champ électrique est fortement renforcé autour de la pointe et ceci favorise la génération des streamers. Un streamer peut ainsi être généré à une tension faible, mais sa propagation n'est pas forcément assurée jusqu'au plan. Le claquage est dans ce cas déterminé non plus par le phénomène de génération (comme c'était le cas dans l'étude de la génération), mais par la propagation du streamer. La tension de claquage mesurée dans ces conditions représente la tension nécessaire à la propagation « totale » (jusqu'au plan) du streamer.

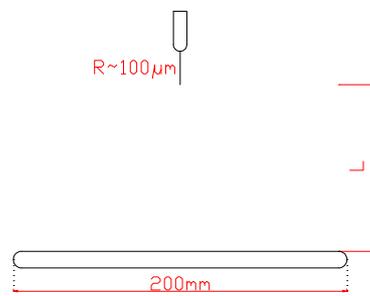


Fig. II-27 Configuration d'électrode pour étudier la propagation, $\frac{E_{\max}}{E_{\text{moyen}}} \approx 60, 131, 241$ pour la distance 2cm, 5cm et 10cm entre le plan et la pointe

Pour cette étude, nous avons ajouté la caméra rapide à intensificateur afin d'obtenir des images du streamer. Quand la tension appliquée est suffisante pour qu'un streamer soit généré mais insuffisante pour assurer sa propagation jusqu'au plan, celui-ci s'arrêtera à une certaine distance l_s de la pointe qui peut être mesurée grâce à l'image. Dans le cas où un claquage se produit, la longueur est alors égale à la distance entre la pointe et le plan (Fig. II-28). Le temps de propagation du streamer est mesuré sur l'oscilloscope en utilisant le signal de courant enregistré. Dans cette configuration d'électrodes où le champ est fortement renforcé sur la pointe, le temps de retard à la génération devient négligeable devant le temps de propagation t_p . La vitesse moyenne de propagation du streamer peut ensuite être calculée en divisant la longueur d'arrêt par le temps de propagation :

$$v = \frac{l_s}{t_p} \quad \text{Eq. II.3}$$

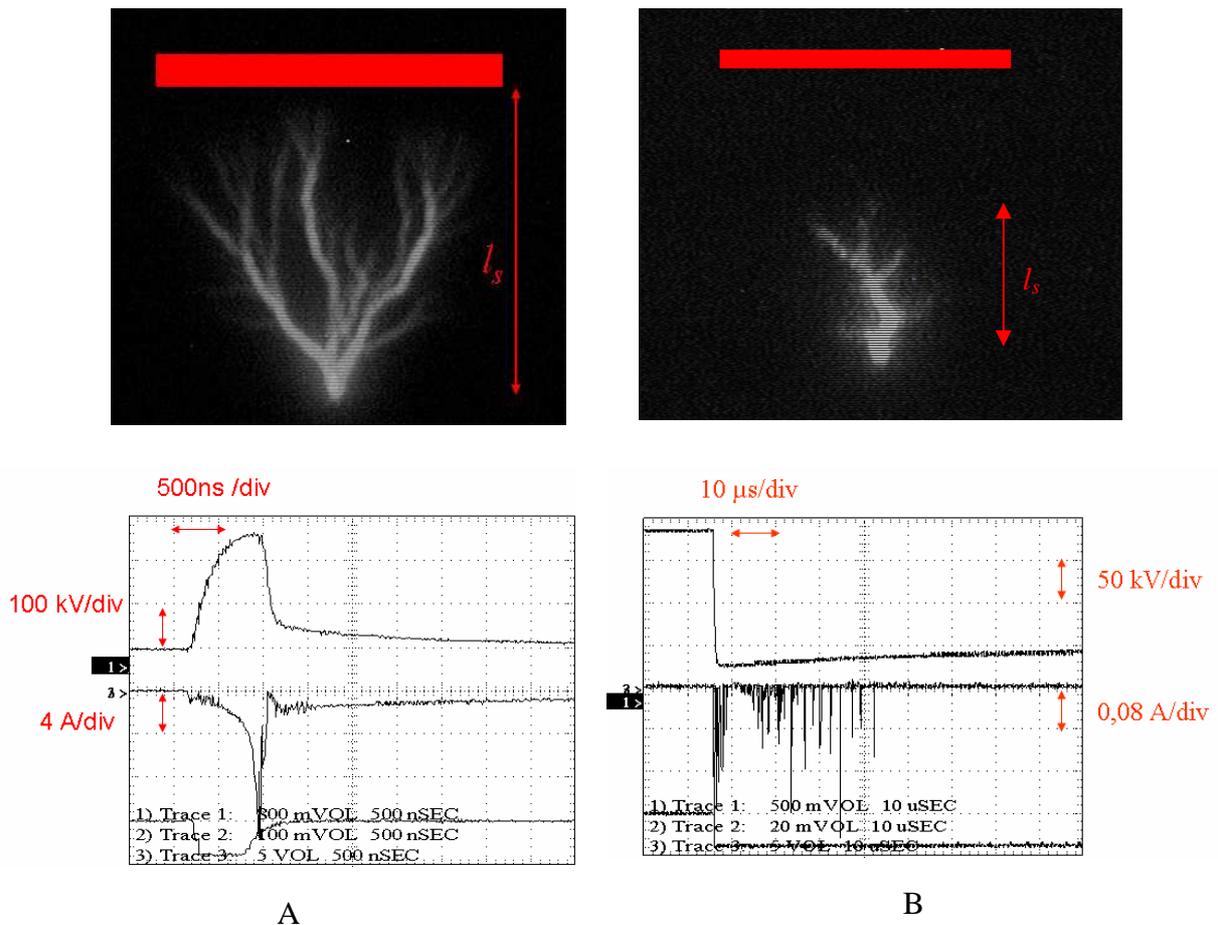


Fig. II-28 Exemples d'enregistrements d'images et de courants :

A : streamer positif se propageant jusqu'au claquage, B : streamer négatif s'arrêtant sans provoquer de claquage (Résultats obtenus dans l'ester naturel FR3, D = 10 cm)

II.4.1 Longueur d'arrêt et vitesse moyenne des streamers dans les esters

Les Fig. II-29 et montrent l'évolution de la longueur l_s des streamers en fonction de la tension appliquée U pour les polarités positive et négative, pour une distance de 10cm entre les électrodes. Les résultats obtenus précédemment dans l'huile minérale [51] et l'huile végétale RS50 [30] dans des conditions identiques sont également reportés sur la figure. La longueur d'arrêt l_s augmente avec la tension et le claquage se produit lorsque $l_s \approx D$. La tension de claquage (U_c) dans ce cas reflète la tension nécessaire pour que le streamer puisse se propager jusqu'au plan.

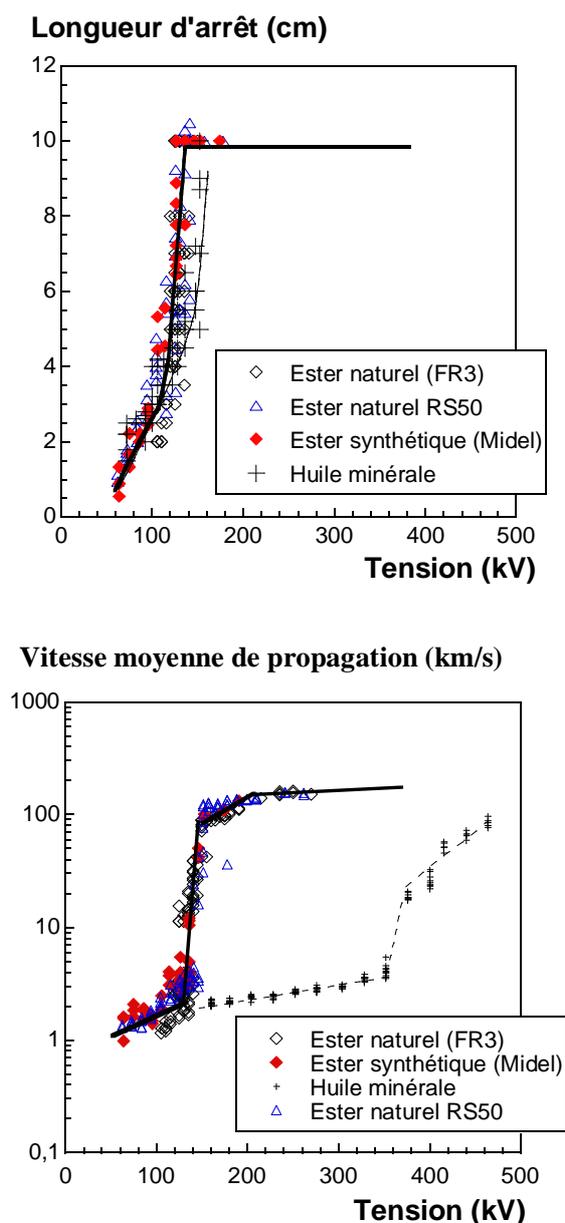


Fig. II-29 Longueur d'arrêt et vitesse moyenne de propagation de streamer en polarité positive, $D = 10$ cm

La vitesse de propagation des streamers positifs (polarité positive de la tension appliquée sur la pointe) est présentée sur la Fig. II-29. Aux faibles tensions, les streamers se propagent à la vitesse de quelques km/s. Aux plus fortes tensions, des streamers rapides ayant une vitesse de propagation >100 km/s sont observés. La tension où la transition très brusque streamer lent / streamer rapide se produit est définie comme la tension d'accélération (V_a).

Dans l'huile minérale, la tension d'accélération V_a est beaucoup plus élevée que la tension de claquage V_c . Le rapport entre la tension d'accélération et la tension de claquage est

d'environ 2,5. Dans tous les esters étudiés (plusieurs esters naturels et un ester synthétique), la tension V_a est égale à la tension de claquage V_c comme précédemment observé par C. Tran Duy dans l'huile RS50 [30]. Le claquage est provoqué par des streamers rapides dans les huiles végétales, alors que dans l'huile minérale ce sont des streamers lents qui le produisent. Il n'existe pratiquement aucune différence sensible entre les esters étudiés.

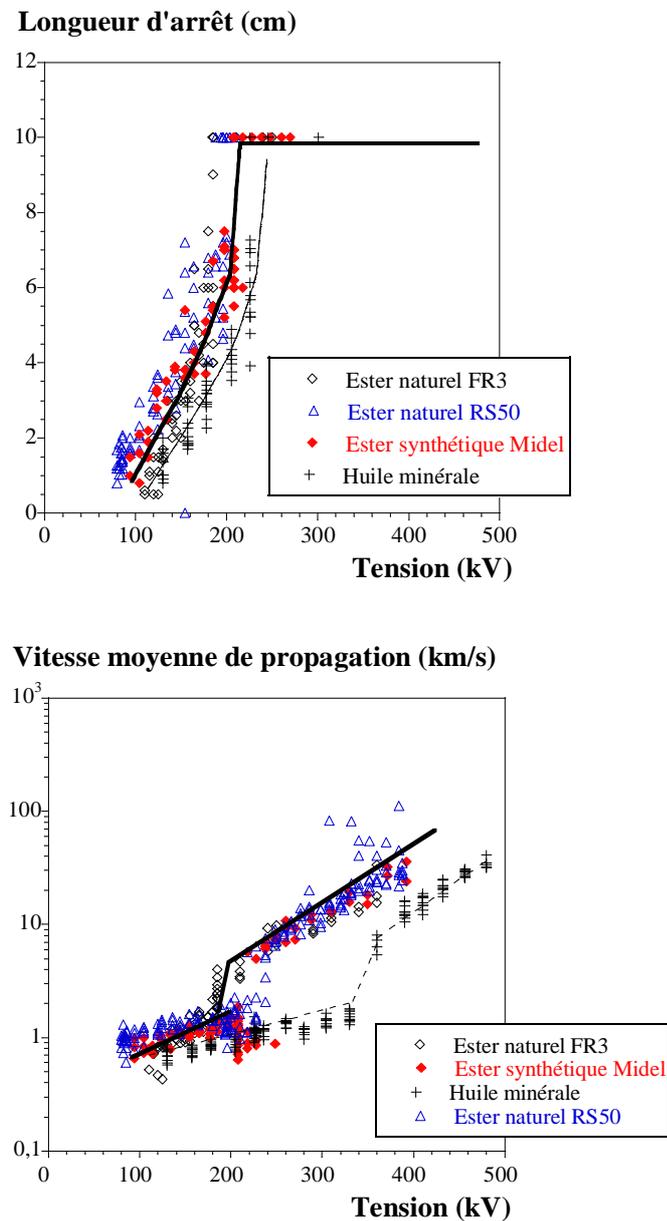


Fig. II-30 Longueur d'arrêt et la vitesse moyenne de propagation de streamer en polarité négative, $D = 10$ cm

Les résultats obtenus en polarité négative sont présentés sur la Fig. II-30. En polarité négative, l'évolution de la vitesse moyenne de propagation avec la tension appliquée est plus lente que celle trouvée en polarité positive. Pour tous les esters que nous avons étudiés, à faible tension, les streamers se propagent à une vitesse de 1-2 km/s. A partir d'une tension

légèrement supérieure à la tension V_b , une discontinuité de la vitesse est toujours observée mais beaucoup moins brutale que dans le cas de la polarité positive. Ainsi, à la tension V_b , la vitesse n'est que 5-10 km/s par rapport à plus de 100 km/s en polarité positive. A des tensions bien supérieures à V_b , la vitesse moyenne continue d'augmenter régulièrement avec la tension. Pour atteindre une vitesse de 100km/s, il faut appliquer une tension 2 fois plus élevée que la tension V_b .

En polarité négative, une différence importante de comportement entre les huiles végétales et l'huile minérale est également observée. La tension d'accélération V_a de l'huile minérale est toujours supérieure à celle des huiles végétales. En polarité négative, un rapport d'environ 1,8 entre la tension d'accélération dans l'huile minérale et les deux huiles végétales est observé. Là encore, aucune différence sensible n'a pu être mise en évidence entre les esters étudiés.

Avec la distance de 5cm entre la pointe et le plan, nous avons observé le même comportement dans les liquides étudiés (voir annexe).

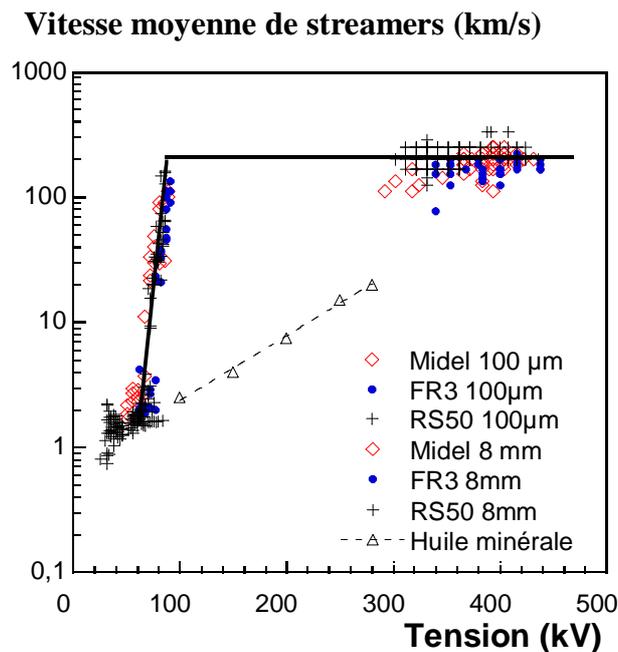


Fig. II-31 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2 \text{ cm}$)

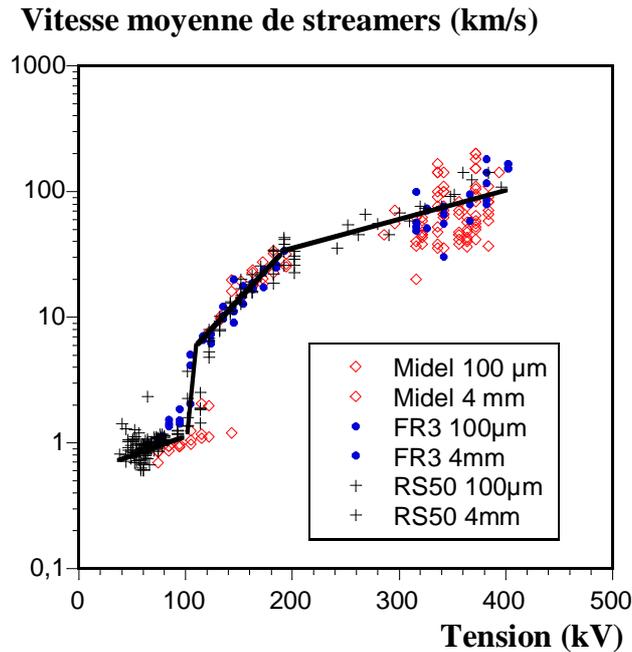


Fig. II-32 Vitesse moyenne des streamers positifs avec différents rayons de courbure de la pointe ou de la tige ($D = 2 \text{ cm}$)

Pour une distance de 2cm, nous avons pu mesurer la vitesse des streamers sur une très large gamme de tensions avec polarité positive (Fig. II-31) et négative (Fig. II-33) de la tension. Les courbes ont été construites en superposant les résultats obtenus en géométrie pointe /plan ($r_p \approx 100\mu\text{m}$) à ceux obtenus avec la géométrie tige/plan ($r_p \approx 4 \text{ mm}$) à partir des mesures de temps de propagation t_p . Dans ce cas, la propagation s'effectue avec des valeurs de champ moyen très élevées (jusqu'à $450\text{kV}/2\text{cm}$), et il est intéressant de comparer les résultats avec la géométrie pointe-plan. En polarité positive, quand la tension dépasse une valeur V_a , la transition streamer lent /streamer rapide ($\approx 200 \text{ km/s}$) se fait très rapidement. A très haute tension la vitesse devient saturée et devient indépendante de la tension appliqué, même avec des tensions très supérieures à la tension de claquage. En polarité négative, la vitesse du streamer augmente plus graduellement. Elle atteint 100 km/s à une tension d'environ 400kV , ce qui correspond à une valeur moyenne du champ $E_{\text{moy}} \approx 200 \text{ kV/cm}$.

II.4.2 Influence de la teneur en eau sur la vitesse de propagation des streamers

Pour tester l'influence de l'eau sur le phénomène de propagation des streamers (ce qui n'a jamais été réalisé auparavant), nous avons effectué des mesures avec de l'ester naturel humide (humidité relative $C_r = 80\%$) dans la configuration de champ pointe – plan, avec une distance de 2 cm entre la pointe et le plan. Comme dans la partie précédente, la vitesse de propagation sur une large gamme de tension peut être construite en superposant les résultats

trouvés en géométrie pointe /plan ($r_p \approx 100\mu\text{m}$) et ceux qui sont trouvés avec la géométrie tige/plan ($r_p \approx 4\text{ mm}$).

La comparaison des vitesses de propagation entre ester naturel humide et sec ne montre pratiquement aucune différence dans les deux polarités (Fig. II-33). La tension d'accélération, ainsi que la vitesse du streamer dans les deux huiles à la même valeur de tension sont très comparables. Nous arrivons donc à la conclusion que l'eau n'a aucune influence sur la propagation des streamers.

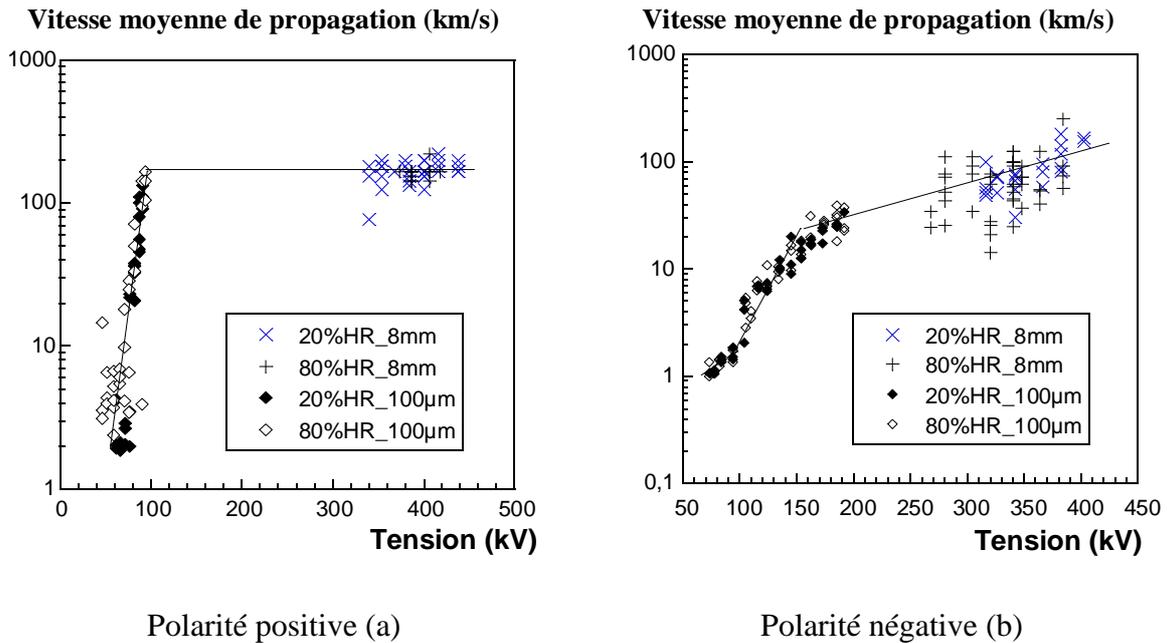


Fig. II-33 Vitesse de propagation de streamers dans l'ester naturel FR3 sec (teneur en eau relative $Cr \approx 20\%$) et humide ($Cr \approx 80\%$), distance $D = 2\text{cm}$

II.4.3 Tension de claquage et comparaison avec l'huile minérale

La Fig. II-34 montre la probabilité de claquage mesurée en polarité positive. Dans cette configuration d'électrodes (grande distance interélectrode et champ très divergent), la tension de claquage V_b mesurée représente la tension nécessaire pour que le streamer puisse se propager de la pointe jusqu'au plan. Ce paramètre n'est pas influencé par le « conditionnement » du liquide (présence d'eau, de particules ou de gaz dissous). Il constitue donc un paramètre caractéristique des liquides isolants, qui permet de comparer leurs propriétés.

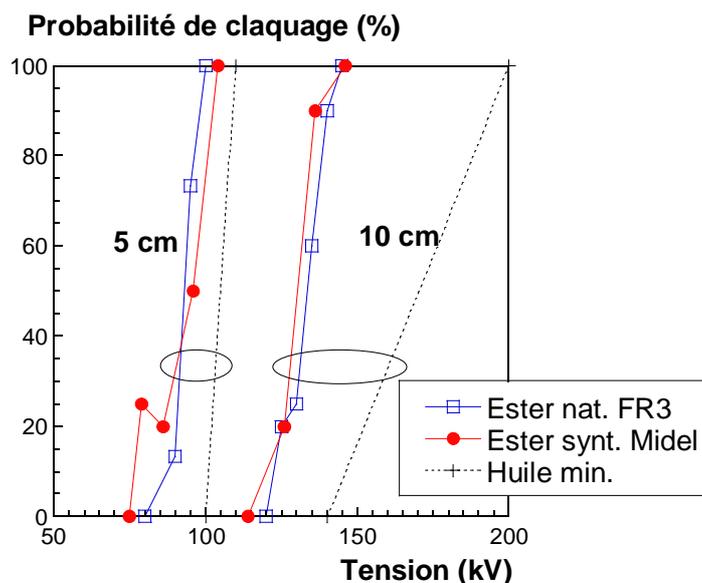


Fig. II-34 Probabilité de claquage mesurée à la distance 5 cm et 10cm en polarité positive.

La probabilité de claquage est déterminée en comptant le nombre de claquages produits dans une série de 20 essais à chaque niveau de tension. La pause entre deux chocs est de 2 minutes s'il n'y a pas claquage et de 5 minutes si un claquage se produit. La comparaison avec l'huile minérale (lignes pointillés) montre que la probabilité de claquage augmente très rapidement de 0 à 100%, alors que dans l'huile minérale pour une distance de 10 cm, cette augmentation est plus lente. Encore une fois, aucune différence nette entre les esters n'est observée, alors que l'huile minérale a une tension de claquage nettement plus élevée.

La Fig. II-35 résume les mesures de tension de claquage dans les esters naturels, l'ester synthétique et l'huile minérale à différentes distances interélectrode. La tension de claquage V_b correspond à une probabilité de claquage arbitrairement fixée à 50% et les barres d'erreurs correspondent à la probabilité de claquage 10% et 90%.

Nous pouvons constater que le comportement de tous les esters biodégradables étudiés est comparable. Par contre, celui de l'huile minérale est différent surtout en polarité positive de la pointe. Le claquage se produit plus facilement dans les esters que dans l'huile minérale, comme cela avait été observé par C. Tran Duy [30]. Cela provient du fait que la décharge se propage beaucoup plus facilement dans les esters que dans l'huile minérale.

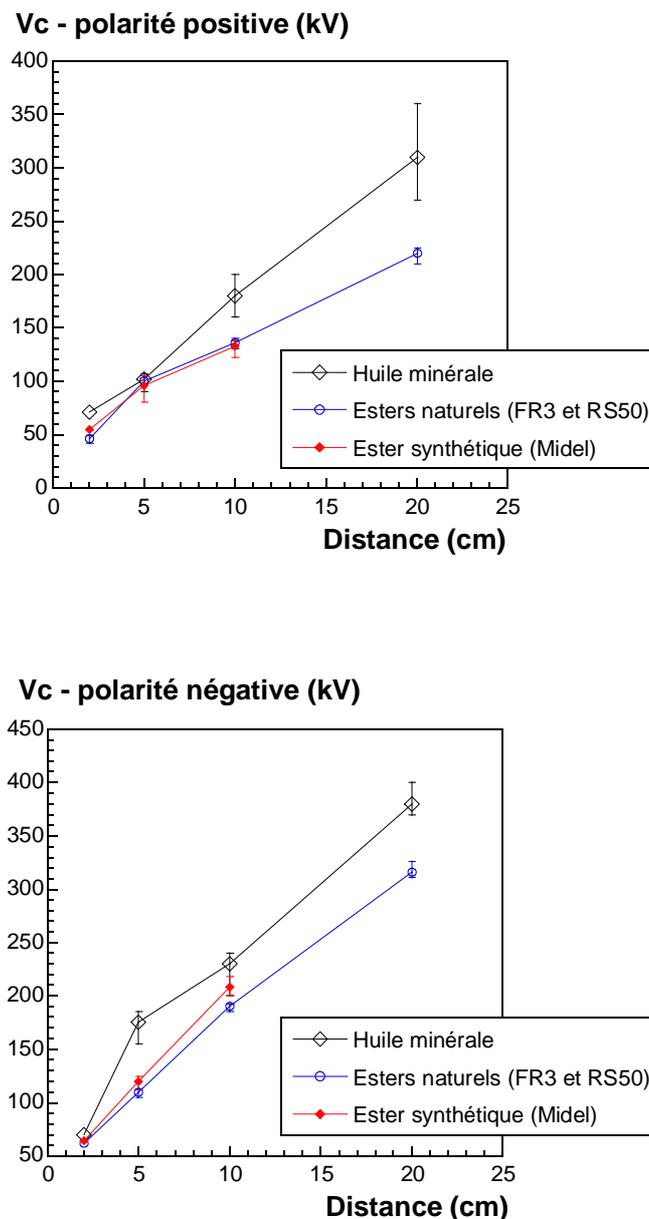


Fig. II-35 Tension de claquage mesurée sous impulsion positive (haut) et négative (bas).

II.5 Application à l'isolation d'une ampoule à vide, comparaison avec le SF₆

Les résultats des caractérisations précédentes montrent que les performances d'isolation des esters peuvent satisfaire les contraintes de champ imposées par l'isolation d'une ampoule à vide. Pour comparer ces performances des esters par rapport à celle du SF₆, nous avons choisi le cas du SF₆ à une pression de 2 bars comme référence. Rappelons que la pression de SF₆ utilisée dans les disjoncteurs en HTA est en général de 1,5 à 2 bars.

II.5.1 Champ quasi-uniforme

Le champ de génération des décharges dans les esters est beaucoup plus élevé que celui du SF₆ à la pression de 2 bars. Les esters ont un champ de génération supérieur à 40 kV/mm, comparé à 18 kV/mm pour le SF₆ à 2 bars (valeur déduite de la courbe Paschen pour le SF₆ [56]). Pour obtenir la même performance que les esters, il faudrait comprimer le SF₆ sous pression supérieure à 6 bars (Fig. II-36).

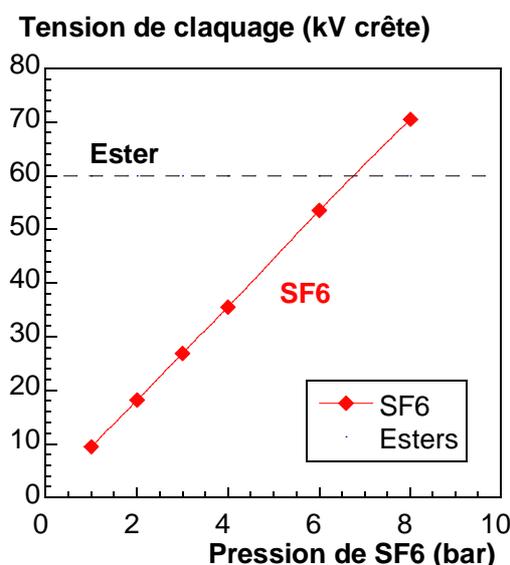


Fig. II-36 Comparaison entre ester et SF₆ en champ quasi uniforme, distance interélectrode fixe 1mm.

Les résultats avec SF₆ viennent de la courbe Paschen [56]

II.5.2 Champ non uniforme

La Fig. II-37 compare la tension de claquage en géométrie pointe – plan des esters naturels avec le SF₆ sous 2 bars, avec différentes distances interélectrode. La courbe du SF₆ en fonction de la distance est construite en regroupant des résultats obtenus par Quenin [57], Wiegart et al. [58], Zwicky [59] et Takuma et al. [60]. Notons que les résultats avec le SF₆ ont été obtenus avec différents rayons de courbure de la pointe. Cependant, il a été montré par Pinnekamp et al. [60] que le diamètre de la pointe n'a aucun effet sur la tension de claquage si la distance entre celle-ci et le plan est suffisamment importante. En effet, dans les gaz, c'est la tête du canal de « leader » qui joue le rôle de l'électrode pointe, et celle-ci est indépendante de la géométrie d'électrode si le canal est suffisamment long (la décharge « leader » sera expliquée en détail dans Chapitre IV). Il est donc possible de superposer les résultats obtenus avec différents rayons de courbure de la pointe. Le même raisonnement peut également s'appliquer au liquide.

A faibles distances, la tension de claquage du SF₆ augmente rapidement avec la distance. Pour des distances supérieures à environ 7 cm, l'accroissement est beaucoup moins

rapide et la tension de claquage devient presque indépendante de la distance [59] [60]. Cela s'explique par le mode de propagation de type « leader » dans le SF₆. En effet, à chaque phase de répétition d'un leader, c'est sa tête qui joue le rôle de l'électrode pointe. Le leader peut se développer si la tension autour de sa tête est supérieure à une valeur critique, et cette valeur est pratiquement indépendante de la distance interélectrode en raison de très faible chute de tension dans le canal (estimé d'environ 5 kV/cm). Le phénomène de propagation sera décrit plus en détail en Chapitre IV.

Basé sur la chute de tension dans le canal et la tension nécessaire pour démarrer un nouveau pas de leader, Pinnekamp and Niemeyer [60] a donné une formule qui permet d'estimer l'ordre de grandeur de tension de claquage avec des grandes distances interélectrode :

$$U_c \approx U_{cr} + \overline{E}_L \cdot d \quad \text{Eq. II.4}$$

U_c : Tension de claquage (en kV)

U_{cr} : Tension seuil de leader ≈ 80 kV pour la polarité positive

\overline{E}_L : Champ dans le canal de leader ≈ 5 kV/cm

d : distance interélectrode en cm

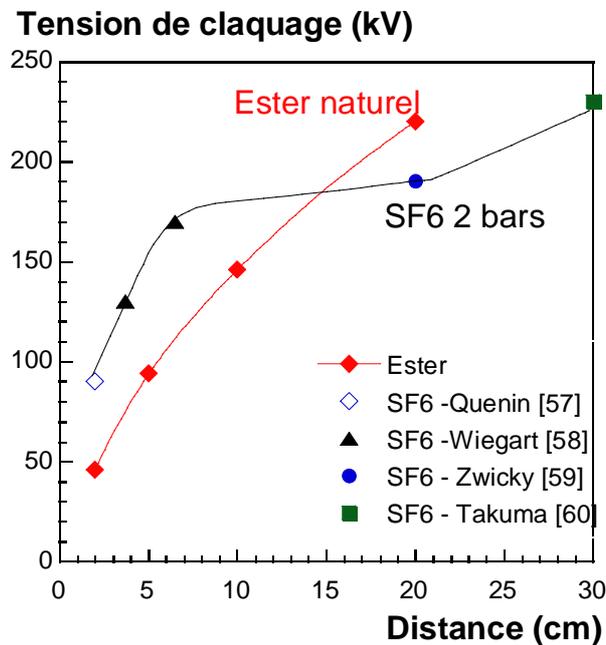


Fig. II-37 Comparaison entre ester et SF₆ en configuration pointe – plan et polarité positive de la tension. Les résultats pour le SF₆ viennent de Quenin [57], Wiegart et al. [58], Zwicky [59] et Takuma et al. (dans [60])

Nous pouvons constater sur la Fig. II-37 que le SF₆ a une tenue diélectrique meilleure que les esters à faible distance interélectrode. Quand la distance interélectrode devient importante (supérieure à environ 15 cm), la tension de claquage dans le SF₆ devient plus basse que celle des esters.

Pour l'application visée (isolation d'une ampoule à vide), la distance de propagation est d'environ 15 – 20 cm. Dans ce cas la performance des esters est proche de celle du SF₆ sous pression 2 bars. Dans le Chapitre V, la tenue diélectrique des esters dans la configuration pratique envisagée sera validée.

II.5.3 Autres contraintes techniques

Le problème principal à surmonter pour l'emploi des esters comme liquide d'isolation est celui de sa stabilité chimique à long terme. En effet, les esters sont des produits oxydables et hydrolysables, il faut donc les protéger d'une contamination par l'eau et l'air. Il sera nécessaire d'utiliser une enceinte étanche pour éviter le contact avec l'air et l'humidité extérieure. Il a toutefois été constaté dans l'huile RS 50 que même après un vieillissement sévère (15 jours dans l'air à 120°C, huile noire et conductivité multipliée par 10), l'huile conserve sa tenue diélectrique initiale sous tension alternative [30].

L'action des décharges partielles (DPs), qui sont pratiquement inévitables dans un appareil au cours de son fonctionnement, sur les esters reste à étudier. Cependant, du fait de la structure chimique des esters (i.e. le rapport C/H et la présence d'atomes d'oxygène [61]), les DPs produiront des composés volatils (du type hydrogène, hydrocarbures légers, CO, etc.) mais pratiquement pas de particules de carbone qui pourraient dégrader sa tenue diélectrique.

Pour pouvoir remplacer le SF₆ dans l'application considérée, le fonctionnement à basse température doit également être assuré. En effet, dans le cahier des charges, la plage de température de fonctionnement souhaité est de -40°C à +115°C (c.f Tab. I-2). Or les esters naturels ont un point d'écoulement d'environ -20°C. A -40°C, ces esters deviendront pratiquement solides et cela risque d'entraîner des effets indésirables (changement de la tenue diélectrique, blocage mécanique...). Quelques mesures de claquage effectuées à basse température (voir annexe) ont en effet montré une forte dégradation quand le liquide est solidifié. Des solutions ont été proposées pour résoudre ce problème, par exemple pour abaisser le point d'écoulement l'utilisation de mélanges d'huiles végétales [62] ou l'addition de composés spécifiques [63]. Ces solutions permettent de baisser le point d'écoulement de quelques degrés, jusqu' à une dizaine au maximum. Si le fonctionnement à basse température est exigé, il sera nettement préférable d'utiliser des esters synthétiques comme le MIDEL, qui ont un point d'écoulement comparable à l'huile minérale (≈ -60°C). Ce point d'écoulement sera suffisamment bas pour la majorité des applications.

Enfin, l'utilisation des esters dans de nouvelles applications comme les disjoncteurs imposera également de prendre en compte la dilatation thermique, le poids, le coût de fabrication, la compatibilité avec les autres matériaux, etc.

II.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons caractérisé la génération et la propagation de streamers dans des esters naturels et un ester synthétique. Les résultats obtenus permettent de comparer la performance d'isolation de ces matériaux avec le matériau de référence, le SF₆. Par ailleurs, une comparaison avec l'huile minérale a été également réalisée pour considérer l'application des esters dans les transformateurs de puissance très haute tension.

L'étude de la génération de streamers a montré que les conditions locales d'apparition de décharges sont très comparables dans l'ester synthétique, les esters naturels et l'huile minérale. Ce résultat est mis en évidence par les mesures de tension de claquage sous tension alternative, réalisées à faible distance inter-électrode sous champ quasi-uniforme, dans des conditions bien maîtrisées de « conditionnement » du liquide (présence d'eau et de particules). Les mesures réalisées sous impulsion de tension, moins sensibles à la pollution du liquide conduisent à la même conclusion. La forme d'onde présentant un temps de montée rapide et une longue durée de descente, permet de mettre en évidence que la probabilité d'apparition ainsi que le retard à l'apparition des décharges sont identiques dans les liquides testés.

Comme pour l'huile minérale, l'eau n'a aucune influence sur la génération des streamers dans les esters naturels sous tension impulsionnelle, malgré une quantité d'eau très importante (\approx millier ppm). La dégradation de la tension de claquage à haute teneur relative en eau (observée à petite distance sous tension alternative) est donc due à des particules présentes dans l'huile, et non pas à la génération facilitée des décharges de type streamer.

L'étude de la propagation montre une différence nette entre l'huile minérale et les esters biodégradables. Dans des conditions de champ très divergent avec la distance entre les électrodes de 5 et 10 cm, le claquage se produit à tension plus élevée dans huile minérale que dans les huiles biodégradables. Cela représente un inconvénient des huiles biodégradables par rapport à l'huile minérale en termes d'applications. Ceci est dû au fait que des streamers rapides apparaissent à des tensions nettement plus faibles dans les esters que dans l'huile minérale. La tension « d'accélération » des huiles végétales est bien inférieure à celle trouvée dans les huiles minérales, et ceci aussi bien pour la polarité positive que négative, comme l'avait déjà observé C. Tran Duy dans l'huile RS50 [30]. En raison de leur plus grande conductivité, les streamers rapides peuvent se propager sur de plus grandes distances. En polarité positive, le claquage dans les huiles végétales est dû à des streamers rapides ($v \approx 100\text{km/s}$) alors qu'il est dû à des streamers lents ($v \approx 2\text{ km/s}$) dans l'huile minérale. Nous

avons montré qu'il n'existe pas de différence mesurable entre les esters testés, en dépit de leurs différences de composition, viscosité, etc. Comme la génération, la propagation de streamer n'est pas affectée par la concentration d'eau dans les liquides.

Pour les applications, la rapidité des streamers constitue un second handicap pour la tenue aux surtensions brèves du type onde de foudre, très généralement utilisées pour tester et valider les équipements haute tension. Cela doit également être pris en compte lors de la conception de dispositifs isolés par des huiles végétales.

Pour l'application visée (isolation d'un disjoncteur moyenne tension), les données obtenues dans cette étude montre que des esters liquides peuvent être utilisés pour se substituer au SF₆. Cette solution sera validée dans le chapitre V. La tenue aux basses températures oriente le choix vers des esters d'origine synthétique comme le MIDEL, qui présentent un point d'écoulement très bas (-60°C). D'autres types de caractérisations (compatibilité chimique, tenue aux décharges partielles, etc.) restent bien évidemment à réaliser pour complètement valider cette solution de remplacement.

Par ailleurs, les caractérisations de streamers réalisées, même si elles ne trouvent pas aujourd'hui d'explication physique, enrichissent la « base de donnée » expérimentale sur les streamers dans les liquides. Certains phénomènes nouveaux très intéressants (par exemple la constance remarquable de la vitesse de propagation sous très haute tension) n'ont été observés à ce jour que dans les esters.

Chapitre III Mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en champ quasi uniforme

Comme présenté dans le chapitre I, la recherche d'un gaz de remplacement "écologique" au SF_6 dans le domaine de l'isolation électrique se poursuit depuis plusieurs années. Notons qu'il n'est pas évident de trouver un gaz (ou un mélange de gaz) présentant l'équivalent des propriétés exceptionnelles du SF_6 (tenue diélectrique, point de liquéfaction, tenue aux décharges, etc.) sans présenter des caractéristiques néfastes pour l'environnement (effet de serre, toxicité, etc.). En effet, pour qu'un gaz possède une bonne tenue diélectrique, il faut qu'il soit très électronégatif. Or les gaz électronégatifs (e.g. SO_2 , CHCl_3 , CF_2ClBr , CF_3CN , etc.) sont souvent toxiques, chimiquement réactifs, peu écologiques et ils ont souvent une température de liquéfaction élevée. Par ailleurs, leurs produits de décomposition sont souvent dangereux ou non maîtrisés. Seul les gaz inertes comme l'azote ne présentent aucun danger pour l'environnement mais ils possèdent une tenue diélectrique bien trop faible pour être utilisables tels quels en isolation haute tension. Il est possible par contre d'utiliser des mélanges pauvres en SF_6 (5-20%) dans l'azote comme isolation des postes blindés mais en augmentant la pression de service. Par exemple, un mélange à 15% de SF_6 dans l'azote à une pression de 0,8MPa possède la tenue diélectrique du SF_6 pur à la pression de 0,4MPa.

Si on veut complètement éliminé le SF_6 pour l'isolation des appareillages moyenne et haute tension, le choix devient très limité. Très récemment, le trifluoroiodométhane (CF_3I) a été identifié comme un gaz potentiellement capable de remplacer le SF_6 dans certaines applications en électrotechnique. Il possède en effet un champ critique réduit plus élevé que celui du SF_6 , ce qui signifie une meilleure tenue diélectrique que le SF_6 en champ quasi-uniforme et son impact sur le réchauffement climatique est négligeable par rapport au SF_6 . Sa température de liquéfaction est cependant plus élevée que celle du SF_6 (-22°C par rapport à -64°C) ce qui implique qu'il ne pourra pas être utilisé pur dans la plupart des applications. Par contre, il pourrait être utilisé en mélange par exemple avec du N_2 ou du CO_2 . D'autre part, quelques études ont montré que le mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ possède une capacité de coupure de l'arc électrique presque équivalente à celle du SF_6 [64][65].

Les propriétés diélectriques du CF_3I et de ses mélanges sont par contre encore assez peu connues. Il reste donc nécessaire d'étudier ces propriétés en fonction de différents paramètres comme la pression, la nature du mélange, la configuration des électrodes, etc., afin de déterminer leurs performances en vue de son utilisation en isolation moyenne et haute tension.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord étudier la tenue diélectrique du CF₃I et de ses mélanges en champ quasi uniforme. Nous commençons tout d'abord par un rappel sur la physique des décharges dans les gaz et les travaux publiés sur le CF₃I et ses mélanges. La partie suivante présente les techniques expérimentales que nous avons utilisées. Nous proposons également dans cette partie une formule qui permet de calculer la pression maximale d'un mélange sans liquéfaction de CF₃I à basse température.

Ensuite nous présentons les résultats obtenus en champ quasi-uniforme avec le CF₃I et ses mélanges. Puis nous décrivons la formation, due à des décharges électriques, de produits de décomposition du CF₃I.

Ces résultats sont complétés par des mesures en champ non uniforme (configuration pointe - plan), qui seront présentés dans le chapitre IV.

III.1 Etude bibliographique

III.1.1 Physique des décharges dans les gaz en champ uniforme

III.1.1.1 Avalanches électroniques et décharges de Townsend

Nous considérons un gaz où un électron libre (électron germe) est soumis à un champ électrique E . Sous l'action de la force électrostatique $\vec{F} = q\vec{E}$ (q étant la charge en Coulomb et E le champ électrique), il est accéléré et acquiert une certaine énergie. Si cette énergie est suffisamment grande, l'électron peut ioniser les atomes (ou les molécules) du gaz lorsqu'il entre en collision avec eux pour créer de nouveaux électrons libres. Ce phénomène d'ionisation est opposé au phénomène d'attachement des électrons par les molécules du gaz.

Si le champ électrique appliqué dépasse une certaine valeur critique (E_{crit}), l'ionisation devient prépondérante par rapport à l'attachement et les collisions créent de nouveaux électrons qui pourront être accélérés et ioniser à leur tour les atomes du gaz ; c'est le mécanisme d'avalanche électronique qui peut conduire, sous certaines conditions, au claquage proprement dit du gaz.

Pour simplifier, on considère des électrodes planes et parallèles séparées par une distance d . Si $n(x)$ est le nombre d'électrons dans un plan d'abscisse x , n_0 le nombre d'électrons initiaux dans le plan de la cathode à $x=0$, α et η les coefficients d'ionisation et d'attachement, nous avons la relation

$$dn(x) = (\alpha - \eta)n(x)dx \quad \text{Eq. III.1}$$

Posons $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$, l'intégrale de l'équation Eq. III.1 donne

$$n(x) = n_0 e^{(\alpha-\eta)x} = n_0 e^{\bar{\alpha}x} \quad \text{Eq. III.2}$$

Le courant est alors donné par

$$I = e.n(d) = en_0 e^{\bar{\alpha}d} = I_0 e^{\bar{\alpha}d} \quad \text{Eq. III.3}$$

Les études expérimentales ont montré que l'Eq. III.3 n'est valable que pour $d < d_s$, où d_s est une distance critique pour laquelle le courant augmente plus rapidement que prévu par la relation Eq. III.3 et il conduit au claquage. Ceci indique qu'un nouveau phénomène apparaît qui n'est pas uniquement défini par les coefficients α et η . Il faut faire intervenir l'émission d'électrons secondaires à la cathode qui produiront de nouvelles avalanches. En effet, la collision d'électrons primaires (i.e. due à α) n'est pas la seule source de nouveaux électrons. Suivant les conditions (pression, nature et état du gaz et des électrodes, etc.), des électrons secondaires sont produits par différents processus secondaires tels que la collision des ions positifs ou des photons à la cathode. Townsend [66] a corrigé les relations Eq. III.2 et Eq. III.3 en introduisant le « coefficient généralisé d'ionisation secondaire γ », qui représente tous les processus secondaires possibles. Le nombre d'électrons et le courant sont alors donnés par les formules suivantes :

$$n(d) = n_0 \frac{e^{\bar{\alpha}d}}{1 - \gamma(e^{\bar{\alpha}d} - 1)} \quad \text{Eq. III.4}$$

$$I = I_0 \frac{e^{\bar{\alpha}d}}{1 - \gamma(e^{\bar{\alpha}d} - 1)} \quad \text{Eq. III.5}$$

L'Eq. III.5 décrit alors la variation, observée expérimentalement, du courant avec la distance d . On remarque que le courant a une valeur infinie lorsque son dénominateur s'annule, c'est ce qu'on appelle le critère de claquage de Townsend :

$$1 - \gamma(e^{\bar{\alpha}d} - 1) = 0 \quad \text{Eq. III.6}$$

Cette divergence de courant n'a évidemment pas de signification physique car en pratique, le courant est limité par la résistance du circuit électrique.

III.1.1.2 Loi de Paschen

La théorie de Townsend permet de rendre compte de la courbe de Paschen de manière satisfaisante. En effet, si on se place dans le cas où il y a équilibre énergétique des électrons

dans le gaz, les coefficients d'ionisation α et γ sont uniquement fonctions du champ électrique

réduit E/N avec N la densité du milieu : $\bar{\alpha} = g\left(\frac{E}{N}\right)$ et $\frac{\gamma}{N} = g\left(\frac{E}{N}\right)$

En remplaçant ces derniers dans le critère de Townsend (Eq. III.6) on abouti à :

$$h\left(\frac{E}{N}\right)\left(e^{g\left(\frac{E}{N}\right)Nd} - 1\right) = 1 \quad \text{Eq. III.7}$$

Or en champ uniforme, la tension de claquage V_c montre une relation avec le champ suivant la loi :

$$\left(\frac{E}{N}\right)Nd = V_c \quad \text{Eq. III.8}$$

En utilisant l'Eq. III.8 dans l'Eq. III.7, on obtient la relation entre la tension de claquage et le produit Nd :

$$h\left(\frac{V_c}{Nd}\right)\left(e^{g\left(\frac{V_c}{Nd}\right)Nd} - 1\right) = 1 \quad \text{Eq. III.9}$$

L'Eq. III.9 montre que la tension de claquage dépend du produit Nd . Dans un volume fermé, la densité moléculaire N est aussi proportionnelle à la pression P . La tension de claquage V_c peut donc aussi s'exprimer en fonction du produit Pd .

$$V_c = f(Pd) = f'(Nd) \quad \text{Eq. III.10}$$

Cette relation correspond à la loi de Paschen vérifiée expérimentalement. La tenue diélectrique d'un gaz, en champ quasi uniforme, est souvent présentée sous la forme d'une courbe de Paschen selon l'Eq. III.10 (Fig. III-1). Toutefois, cette loi n'est valable que dans un certain domaine de Pd (ou Nd). Pour des valeurs de Pd très grandes ou à l'inverse, très petites, des déviations à la loi de Paschen apparaissent.

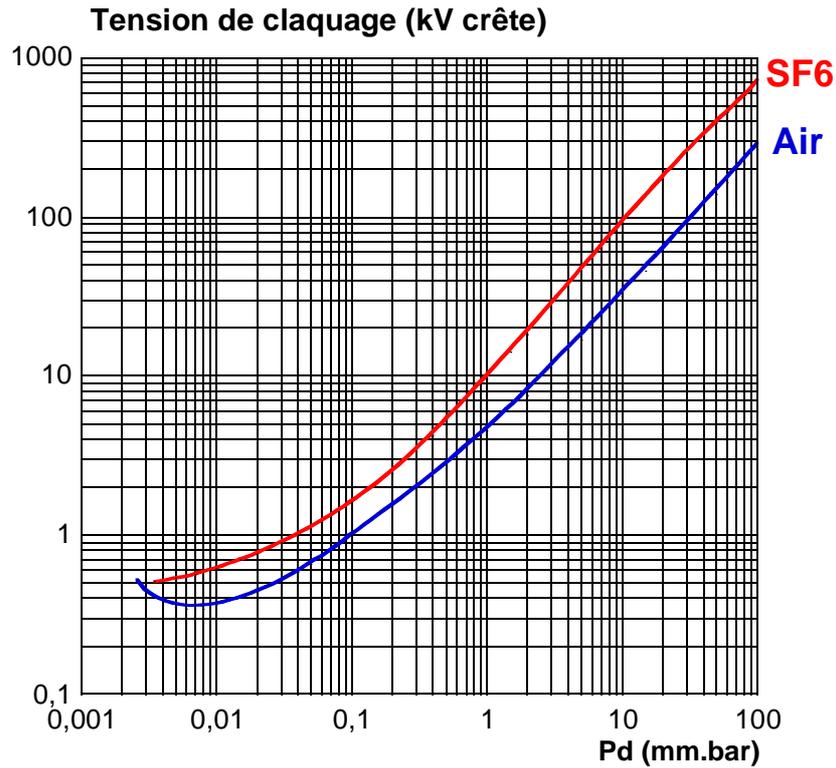


Fig. III-1 Courbe Paschen pour l'air et SF₆ en échelles logarithmiques, température 20°C [56]

III.1.1.3 Modèle analytique pour calculer la tension de claquage de gaz électronégatifs

Il a été montré que $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ est une fonction du champ réduit $\left(\frac{E}{N}\right)$. Autour de la valeur de $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$, à laquelle $\bar{\alpha} = 0$ la relation entre $\frac{\bar{\alpha}}{N}$ et $\left(\frac{E}{N}\right)$ suit une loi linéaire donnée par :

$$\frac{\bar{\alpha}}{N} = A + B \left(\frac{E}{N}\right) \quad \text{Eq. III.11}$$

A et B sont des constantes pour un gaz électronégatif donné.

Or comme $\left(\frac{E}{N}\right)_{cr}$ correspond à $\bar{\alpha} = 0$; on obtient $\left(\frac{E}{N}\right)_{cr} = -\frac{A}{B}$ ce qui donne :

$$\frac{\bar{\alpha}}{N} = B \left[\frac{E}{N} - \left(\frac{E}{N}\right)_{cr} \right] \quad \text{Eq. III.12}$$

Si on utilise maintenant la condition de claquage en champ homogène $\bar{\alpha} \cdot d = K$ (critère de Townsend impliquant plusieurs générations d'avalanches [67]), soit $\left(\frac{\bar{\alpha}}{N}\right)Nd = K$ avec d la distance inter-électrodes et K une constante dépendant du gaz et en utilisant l'Eq. III.12, on obtient :

$$B\left[\frac{E}{N} - \left(\frac{E}{N}\right)_{cr}\right] \cdot Nd = K \quad \text{Eq. III.13}$$

Ce qui donne $Ed - Nd\left(\frac{E}{N}\right)_{cr} = \frac{K}{B}$ et comme $Ed = V_{cl}$, on obtient:

$$V_{cl} = \left(\frac{E}{N}\right)_{cr} \left[Nd + \frac{K}{B\left(\frac{E}{N}\right)_{cr}} \right]$$

$$\text{Soit } V_{cl} = \left(\frac{E}{N}\right)_{cr} [Nd + M] \quad \text{Eq. III.14}$$

L'Eq. III.14 peut aussi s'écrire sous forme :

$$V_c = \left(\frac{E}{P}\right)_{lim} * [Pd + M] \quad \text{Eq. III.15}$$

Où :

$\left(\frac{E}{P}\right)_{lim}$ est le champ critique réduit. Il est de 8,9 kV /mmbar pour le SF₆.

P est la pression

M la figure de mérite qui est fonction du gaz. Pour les gaz électronégatifs, M est négligeable devant le terme Pd . Pour le SF₆, M est d'environ 0,04 .

Lorsqu'on utilise des mélanges d'un gaz très électronégatif avec un gaz non électronégatif, les relations précédentes s'appliquent encore avec des valeurs des coefficients A , B et M fonction du mélange.

III.1.2 Gaz CF₃I et mélanges CF₃I/N₂

Récemment, le trifluoroiodométhane (CF₃I) a été proposé comme une alternative potentielle au SF₆ dans des applications en électrotechnique. Il possède un champ critique

environ 1,2 fois plus élevé que celui du SF₆ [68] et ses impacts environnementaux sont négligeables par rapport au SF₆. Le CF₃I a été étudié comme gaz d'isolation [68][69][70] ainsi que comme gaz de coupure d'arc électrique [64][65]. Comme la coupure n'est pas le sujet de ce travail, seul l'aspect performance diélectrique du CF₃I et de ses mélanges en champ quasi uniforme est présenté dans ce chapitre. Les résultats obtenus en champ non uniforme seront présentés dans le chapitre suivant (chapitre IV).

III.1.2.1 Propriétés chimiques et impacts environnementaux du CF₃I

Le CF₃I est un gaz incolore et ininflammable. Il a une masse moléculaire de 194 g et un point d'ébullition d'environ -22°C.

Avantages du CF₃I

La raison pour laquelle le CF₃I est plus intéressant que les autres gaz précédemment étudiés (c.f. I.2.4), est sa compatibilité avec l'environnement. En effet, il contribue très peu au réchauffement climatique, son GWP est d'environ 5 [71], à comparer à 24000 pour le SF₆ et 1 pour le CO₂. Ceci s'explique par sa faible durée de vie (~ 1 jour) sous irradiation solaire en raison de la faiblesse de la liaison C-I [71]. Notons que ses produits de décomposition sous irradiation UV (CF₃ et I) peuvent nuire à la couche d'ozone si ils atteignent la stratosphère [72][73]. Cependant, si le CF₃I est rejeté à basse altitude (comme dans le cas des applications électrotechniques), son impact sur la couche d'ozone est négligeable (ozone depletion potential, ODP < 0,008 [71]).

Inconvénients du CF₃I

Le CF₃I a un point d'ébullition plus élevé que le SF₆ (-22°C pour le CF₃I et -64°C pour le SF₆). Par exemple, le CF₃I comprimé à 2 bars deviendra liquide si la température chute à -3°C, alors que la température de liquéfaction du SF₆ est de -50°C dans les mêmes conditions.

Le CF₃I est aussi un gaz légèrement toxique [74]. Basé sur les tests d'inhalation effectués sur animaux, le comité de toxicologie de NRC des Etats-Unis (National Research Council) a préconisé que le CF₃I n'a pas d'effet néfaste sur la sensibilisation cardiaque si sa concentration est inférieure à 2000 ppm. L'effet toxique peut être observé avec une concentration en CF₃I supérieure à 4000 ppm.

Le CF₃I est probablement un gaz mutagène. Il manque cependant les résultats fiables concernant l'effet mutagène de CF₃I. Les tests sur l'effet mutagène de CF₃I effectué par A.D.Mitchell donnent des résultats positif [75] ou négatif [76], dépend de la méthode de test. Dans les fiches de données de sécurité (MSDS), le CF₃I est actuellement classé mutagène type 3 (mutagène possible).

Tab. III-1: Impacts environnementaux, température de liquéfaction et toxicité de CF₃I

		CF ₃ I	SF ₆
Impacts sur l'environnement [71]	GWP (Global Warming Potential)	< 5	23900
	ODP (Ozone Depletion Potential)	0,008	0
	Durée de vie dans l'atmosphère	< 1 jour	3200 ans
Liquéfaction [77]	Point d'ébullition	-22°C	-64°C
Toxicité [74]	NOAEL (dose sans effet toxique)	2000 ppm	
	LOAEL (dose minimale observable de l'effet toxique)	4000 ppm	
	LC50 (concentration létale 50)	27,4% / 15 min	

III.1.2.2 Paramètres physiques de CF₃I et mélanges CF₃I-N₂

Les paramètres physiques du CF₃I et mélanges de CF₃I avec N₂ ont été mesuré par Urquijo [68][78] et Kimura et al.[79][80]. Les résultats trouvés par ces deux auteurs sont assez identiques. Le coefficient d'ionisation efficace du CF₃I et mélanges CF₃I/N₂ en fonction du champ critique réduit est présenté sur la Fig. III-2.

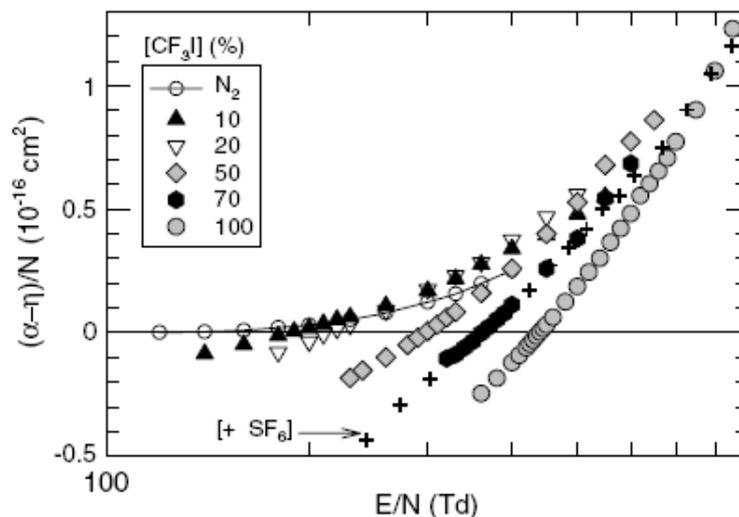


Fig. III-2 Coefficient d'ionisation efficace en fonction du champ critique pour le CF₃I et les mélanges CF₃I-N₂ [68]

Pour simplifier l'exploitation des résultats, Urquijo a proposé une formule permettant de calculer le coefficient d'ionisation efficace $\bar{\alpha}$ en fonction du champ réduit $\left(\frac{E}{N}\right)$ [68]

$$\frac{\bar{\alpha}}{N} = a + b\left(\frac{E}{N}\right) + c\left(\frac{E}{N}\right)^2 + d\left(\frac{E}{N}\right)^3 \quad \text{Eq. III.16}$$

Où :

$\frac{\bar{\alpha}}{N}$ est le coefficient d'ionisation efficace en cm²

$\left(\frac{E}{N}\right)$ est le champ réduit en Td

a, b, c, d sont les coefficients comme définis dans le Tab. III-2

Tab. III-2: Coefficients a, b, c, d dans l'Eq. III.16 [68]

% CF ₃ I	a	b (*10 ⁻³)	c (*10 ⁻⁵)	d (*10 ⁻⁸)
0 (N ₂)	0,533	-10,1	5,27	-3,71
1	-0,442	0,335	1,8	0,427
2	-2,449	-6,91	6,47	-7,09
5	-2,29	14,2	-0,798	1,55
10	-3,21	17,8	-0,468	0,2
20	-5,12	26,9	-1,79	1,4
50	-5,72	7,94	5,05	-4,41
70	-9,1	22,3	0,912	-0,34
100	-17,1	50,1	-3,32	1,74

La valeur du champ critique réduit $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$ peut être obtenue en résolvant l'Eq. III.15

lorsque $\frac{\bar{\alpha}}{N}$ s'annule.

Le champ critique réduit de mélanges CF₃I-N₂ en fonction du taux de CF₃I est présenté sur la Fig. III-3 [68]. Le champ critique réduit du SF₆ est aussi présenté pour comparaison. Nous pouvons constater que le CF₃I pur a un champ critique réduit plus élevé que SF₆ et le champ critique réduit de mélanges CF₃I-N₂ varie linéairement avec le taux de CF₃I. Kimura et al. [80] ont obtenus le même résultat.

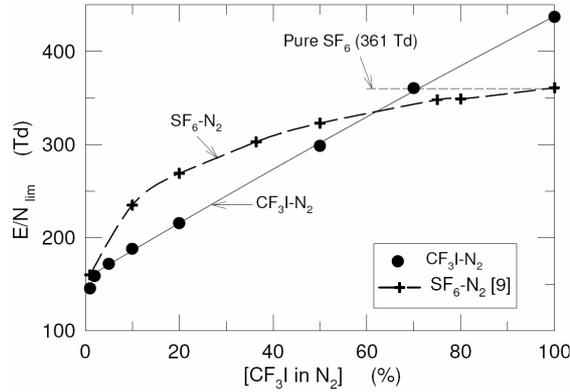


Fig. III-3 Champ critique réduit de mélanges CF₃I-N₂ en fonction du taux de CF₃I [68]

Pour faciliter les calculs théoriques, nous utilisons le champ critique réduit $\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}}$ (en kV/mm.bar) au lieu de $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$ (en Td) . En supposant les gaz parfaits et pour une température de 20°C = 293 K, le nombre de molécules est donné par :

$$N = \frac{PV}{kT} = \frac{10^{-1}}{1,38 \cdot 293 \cdot 10^{-23}} = 2,47 \cdot 10^{19} \text{ atom/cm}^3 \quad \text{Eq. III.17}$$

P : pression, fixée à 1 bar

N : nombre de molécules

V : volume fixé à 1cm³

k : constant de Boltzmann (1,38 · 10⁻²³ JK⁻¹)

Puis en utilisant l'Eq. III.17, nous avons la relation

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}} = \left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}} * 2,47 * 10^{-3} \quad \text{Eq. III.18}$$

Où $\left(\frac{E}{P}\right)_{\text{lim}}$ en kV/mm.bar et $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$ en Td

Comme montré dans l'Eq. III.14 et Eq. III.15, la tension de claquage dépend non seulement du champ critique réduit, mais aussi du coefficient M. Comme le CF₃I est un gaz très électronégatif, nous avons utilisé le terme M estimé par Pedersen pour les gaz et mélanges de gaz très électronégatifs [67]

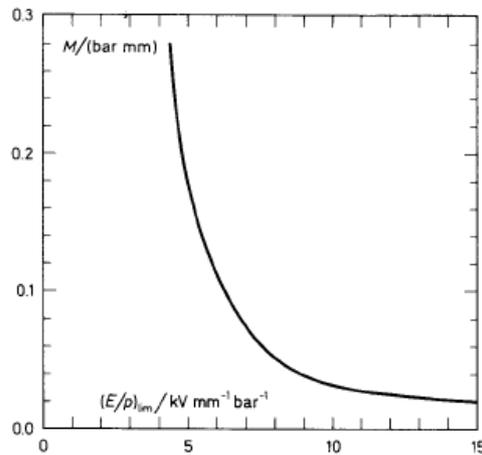


Fig. III-4 Figure de mérite M en fonction de $(E/P)_{lim}$ pour les gaz et mélanges de gaz très électronégatifs [67]

Les valeurs de champ réduit critique en $(E/N)_{lim}$, $(E/P)_{lim}$ et M de CF₃I et des mélanges CF₃I-N₂ sont résumées dans le Tab. III-3. Ces valeurs seront utilisées pour estimer les valeurs de tension de claquage théorique du CF₃I et de ses mélanges dans les parties suivantes en appliquant l'Eq. III.15.

Tab. III-3: Les valeurs du champ critique réduit et de M du CF₃I et des mélanges CF₃I/N₂

Taux de CF ₃ I (%)	$\left(\frac{E}{N}\right)_{lim}$ (Td)	$\left(\frac{E}{P}\right)_{lim}$ (kV/mm.bar)	M (bar.mm)
10	188,6	4,66	0,22
25	250	6,18	0,1
50	300	7,41	0,05
70	361	8,92	0,04
100	438	10,82	0,025

III.1.2.3 Tension de claquage du CF₃I et ses mélanges – état de l’art

Comme montré dans la partie précédente, le CF₃I possède un champ critique plus élevé que le SF₆ et ses mélanges avec N₂ montrent des valeurs de $(E/N)_{lim}$ augmentant linéairement avec le taux de CF₃I [68][80]. Ainsi, l’effet de synergie observé avec les mélanges SF₆/N₂ n’est pas obtenu avec les mélanges CF₃I-N₂ (Fig. III-3). Nous pouvons également constater que les mélanges CF₃I/N₂ peuvent égaler ou dépasser le champ critique du SF₆ pur pour des taux de CF₃I supérieurs à 70%.

La tension de claquage de CF₃I et mélanges de CF₃I avec air, N₂ ou CO₂ a été mesurée expérimentalement par certains auteurs. La Fig. III-5 présente la comparaison des tensions de claquage obtenues expérimentalement pour le CF₃I et le SF₆ [81]. Les essais ont été effectués entre deux sphères avec une distance interélectrodes de 1mm. La tension de claquage des deux gaz est comparable dans le domaine de pression étudié (1-3 bars).

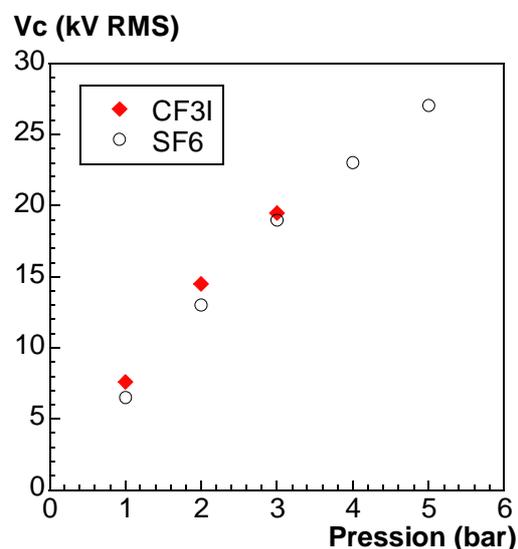


Fig. III-5 Tension de claquage de CF₃I en valeur efficace, configuration sphère – sphère, distance D = 1mm [81]

Peu d’études ont été publiées sur la performance diélectrique des mélanges contenant du CF₃I. Quelques résultats (courbes tension - temps de retard au claquage pour une distance de 10mm et une pression de 1bar) obtenus avec des mélanges CF₃I/N₂ et CF₃I/air ont été publiés par H. Toyota et al [70]. Les mélanges SF₆/N₂ ont été également étudiés, avec les mêmes techniques expérimentales, par ces mêmes auteurs [69]. Ces résultats ne concernent cependant qu’une pression et une distance interélectrode. Katagiri et al. [65] ont mesuré la tension de claquage du mélange CF₃I/CO₂ entre deux sphères ($d=10\text{mm}$, $P=1\text{bar}$), en utilisant une tension appliquée du type choc de foudre normalisé.

Comme les conditions d'essais des mesures précédentes [65][69][70] sont assez comparables (pression et distance interélectrodes identiques), nous avons tracé ces différents résultats sur la Fig. III-6. Les tensions de claquage des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{air}$ et SF_6/N_2 sont extrapolées des courbes tension – temps de retard.

Les courbes (tension de claquage vs. teneur en CF_3I) de la Fig. III-6 sont conformes aux variations du champ critique réduit de ces mêmes mélanges [68][80] (Fig. III-3). Comme attendu, la tenue diélectrique du mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ augmente linéairement avec le pourcentage de CF_3I . Par ailleurs, l'effet de synergie favorable du mélange SF_6/N_2 n'existe pour aucun des mélanges étudiés ($\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{air}$). Il est également observé que les mélanges avec une teneur en CF_3I supérieure à 60% possèdent, dans ces conditions de mesure, une tenue diélectrique meilleure que celle du SF_6 pur.

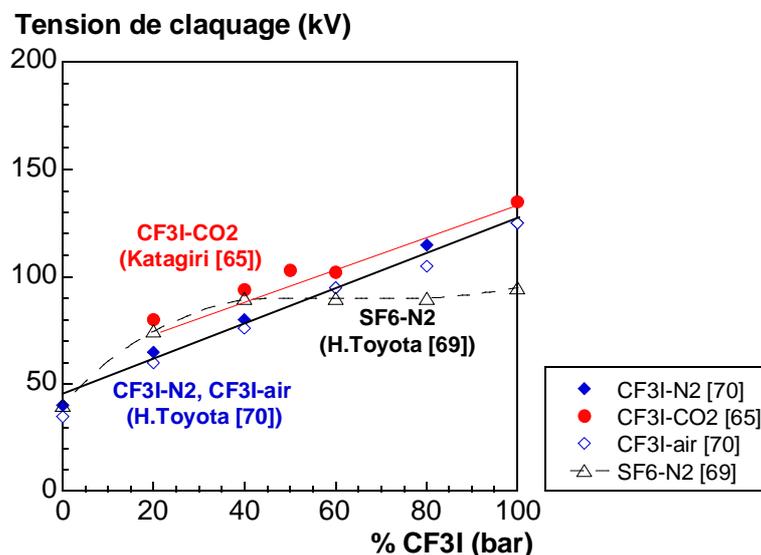


Fig. III-6 Tenue diélectrique des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, $\text{CF}_3\text{I}/\text{air}$ [70], $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ [65] et SF_6/N_2 [69] ; $d=10\text{mm}$, $P=1\text{ bar}$, champ quasi-uniforme (sphère-sphère ou sphère-plan).

III.2 Techniques expérimentales

Pour vérifier la validité des résultats publiés et présentés précédemment qui se limitaient à une seule valeur du produit pression-distance (Pd), nous allons mesurer la tension de claquage des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en faisant varier le produit Pd sur le plus grand domaine possible. En effet, pour établir une courbe de Paschen de ces mélanges il faut faire varier largement le paramètre Pd .

III.2.1 Cellule d'essai

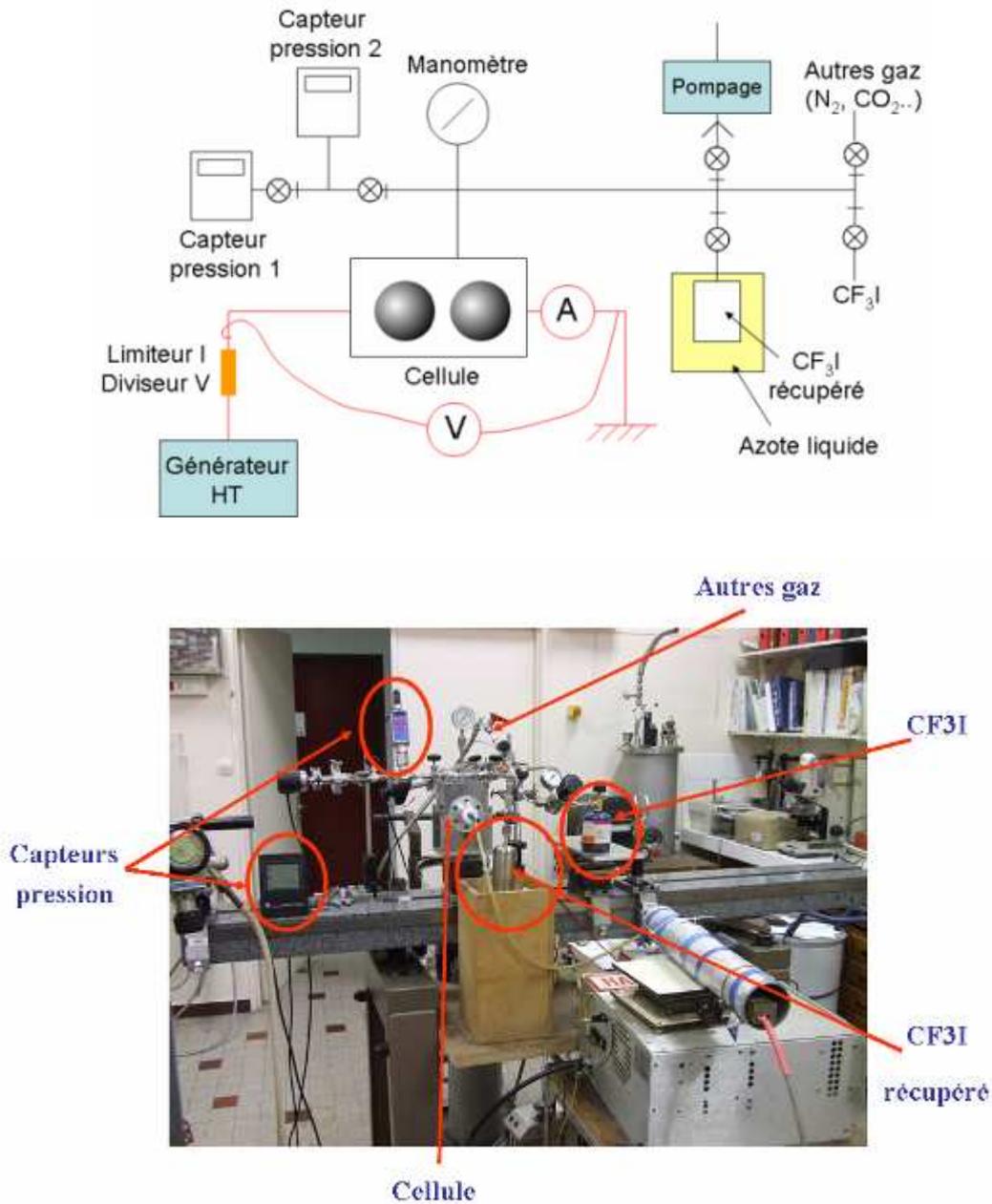


Fig. III-7 Cellule de mesure et photographie du banc d'essai

Les électrodes sont constituées de deux sphères de diamètre 10 mm. Au départ, des sphères en aluminium ont été utilisées, puis elles ont été remplacées par des sphères en inox. La configuration d'électrodes utilisée est sphère-sphère. En raison du coût très élevé du CF_3I (≈ 1000 euros pour 100g), la cellule utilisée a un volume très limité. La distance entre les deux sphères peut varier de 0 à 2 mm. Les décharges dans l'espace interélectrodes peuvent être observées à travers deux hublots de la cellule.

III.2.2 Circuit du gaz

Le circuit du gaz permet de vider, remplir la cellule et de récupérer le CF_3I utilisé. La cellule est mise sous vide ($\sim 2\text{Pa}$) avant chaque remplissage grâce une pompe primaire. La pression dans la cellule est mesurée à l'aide de deux capteurs de pression numériques, qui permettent de mesurer la pression jusqu'à 7 bar absolu. Le CF_3I utilisé peut être récupéré à l'aide d'un système de liquéfaction à l'azote liquide.

III.2.3 Circuit électrique

Le principe du circuit électrique est très simple. Il est constitué d'une source de tension, d'une résistance en série avec la cellule, d'un dispositif de mesure du courant et de mesure de la tension.

La source haute tension peut fournir une tension DC maximale de 100 kV. La cellule est mise en série avec une résistance de $2\text{M}\Omega$ afin de limiter le courant de claquage et un galvanomètre de sensibilité 1nA permet de mesurer le courant. La tension est mesurée par un diviseur de tension.

Pour mesurer la tension de claquage, on utilise une rampe de tension à la vitesse de 1-2 kV/s jusqu'au claquage. Le claquage est défini dans nos expériences par l'apparition d'un saut brutal de courant. Le temps de pause entre deux claquages est d'environ deux minutes.

III.2.4 Procédure de préparation de mélanges

Parmi les différentes méthodes pouvant être utilisées pour faire des mélanges de gaz, nous avons choisi la méthode de pression partielle par voie manométrique. Il s'agit de la méthode la plus simple à mettre en œuvre. Dans notre cas, le taux important de CF_3I (de 10% à 50%) dans le mélange permet l'utilisation de cette méthode bien que sa précision soit relativement faible.

Les deux constituants, le gaz 1 sous la pression P_1 et le gaz 2 sous la pression P_2 , sont introduits séparément dans la cellule afin d'obtenir un mélange des gaz 1 et 2 sous la pression totale P_1+P_2 . Le taux de chaque constituant dans le mélange est égal au taux de sa pression partielle.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la durée requise pour obtenir l'homogénéisation du mélange, celle-ci étant obtenue par diffusion d'un gaz dans l'autre. Cependant du fait du volume réduit de la cellule d'essai, ce temps de diffusion sera relativement court. Une estimation de ce temps de diffusion est déduite de l'expression suivante [82] :

$$t = \frac{0,04Ph^2}{D} \quad \text{Eq. III.19}$$

Où :

t : temps (jour)

D : valeur moyenne des coefficients de self diffusion des constituants

P : Pression en bar

h : hauteur du volume souhaité en m

Avec des valeurs de $P=6$ bars, $h=10$ cm, $D=0,15$ (valeur approximative), nous trouvons $t=0,016$ jour soit 23 minutes. Cette valeur préconise un temps d'attente d'environ une demi-heure afin d'obtenir une bonne homogénéité du mélange si on ne considère que le phénomène de diffusion, c'est donc une valeur maximale.

III.2.5 Calculs du taux optimal de CF₃I dans un mélange

Le point faible du CF₃I est sa température de liquéfaction élevée (-22,5°C) (Fig. III-8). La norme CEI60694 [83] indique que l'isolation doit être assurée à -40°C pour des utilisations extérieures et -25°C pour des utilisations intérieures. La pression maximale pour laquelle le CF₃I peut être utilisée sans liquéfaction à -25°C et à -40°C est de 0,88 et 0,44 bar respectivement. Or, en réalité, un gaz d'isolation doit toujours être utilisé à une pression supérieure à la pression atmosphérique (gaz comprimé) pour augmenter sa tenue diélectrique. Par conséquent, le CF₃I pur ne répond pas à cette condition pour une utilisation dans l'appareillage industriel.

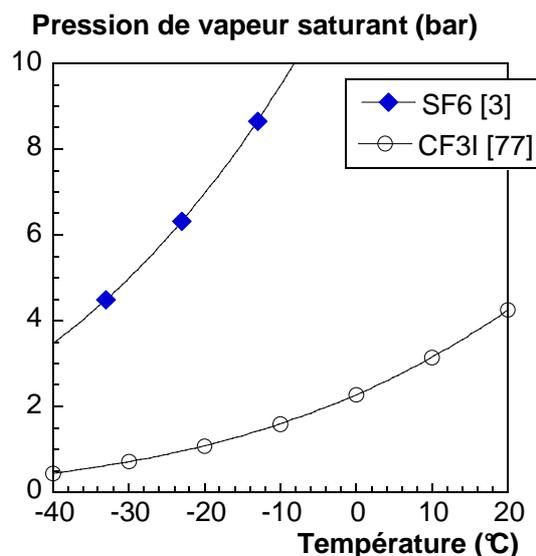


Fig. III-8 Pression de vapeur saturante du CF₃I [77] et du SF₆ [3]

Une solution technique afin d'éviter la liquéfaction à basse température consiste à baisser la pression partielle de CF₃I en faisant des mélanges CF₃I avec un gaz difficilement liquéfiable (N₂, air ou CO₂). Plus la quantité de CF₃I sera augmentée dans le mélange et plus sa qualité d'isolation (fonction de $(E/N)_{lim}$) sera améliorée. Par contre, plus le taux de CF₃I est important, plus la pression maximale d'utilisation du mélange est abaissée (< pression de liquéfaction à une température fixée). Ainsi, le taux optimal de CF₃I dans le mélange dépendra des conditions d'utilisation (contrainte électrique et température) d'un appareillage donné.

III.2.5.1 Pression maximum d'un mélange sans liquéfaction de CF₃I

Rappelons que le cahier de charge pour l'isolation d'une ampoule à vide impose que l'isolation soit assurée jusqu'à -40°C. La pression de vapeur saturante du CF₃I a été mesurée [77]. Elle s'écrit :

$$\ln\left(\frac{P}{P_c}\right) = (A_1\tau + A_2\tau^{1,25} + A_3\tau^3 + A_4\tau^7) * \frac{T_c}{T} \quad \text{Eq. III.20}$$

Où les constantes A_i sont égales à : $A_1 = -7,19045$, $A_2 = 1,34829$, $A_3 = -1,58035$ et $A_4 = -5,4668$. D'autre part, $T_c = 395,05$ K et $P_c = 3,8617$ Mpa, P est la pression de vapeur saturante du CF₃I en MPa et T la température en K.

Pour $T = 233$ K (-40°C), on trouve $P = 0,0445$ MPa \approx 0,45 bar (*)

Considérons un mélange à k % de CF₃I dans un autre gaz (N₂, CO₂...), comprimé à la pression P . La pression partielle de CF₃I dans ce cas peut être calculée par la loi de Dalton:

$$P_{CF_3I} = \frac{kP}{100} \quad \text{Eq. III.21}$$

La pression maximale du mélange sans liquéfaction de CF₃I à -40°C peut alors être calculée soit :

$$P_{CF_3I} < 0,45 \Leftrightarrow \frac{kP}{100} < 0,45 \Leftrightarrow P < \frac{45}{k} \quad \text{Eq. III.22}$$

La température -40°C est imposée pour les applications à l'extérieur. Pour les applications à l'intérieur, la contrainte de basse température est fixée à -25°C. Dans ce cas pour éviter la liquéfaction à -25°C, la pression partielle de CF₃I ne doit pas dépasser 0,885 bar.

III.2.5.2 Optimisation du taux de CF₃I

L'Eq. III.15 montre que la tension de claquage d'un gaz, à une distance fixée, dépend du produit $\left\{ \left(\frac{E}{P} \right)_{\text{lim}} * P \right\}$. Le premier terme augmente linéairement avec le taux de CF₃I (Fig. III-3), alors que le deuxième est gouverné par l'Eq. III.22.

Sur la Fig. III-9, nous avons tracé, en fonction du taux de CF₃I dans le mélange CF₃I/N₂, la pression de liquéfaction du mélange. La pression d'utilisation réelle devra être inférieure à la courbe P_{max} afin d'éviter la liquéfaction à -40°C. D'autre part, la performance d'isolation d'un mélange donné est donnée par la valeur de $\left(\frac{E}{P} \right)_{\text{lim}}$. Nous pouvons constater qu'avec un taux de CF₃I d'environ 20% à 30%, on obtient le meilleur compromis entre la qualité d'isolation et la pression de service par rapport à l'azote pur.

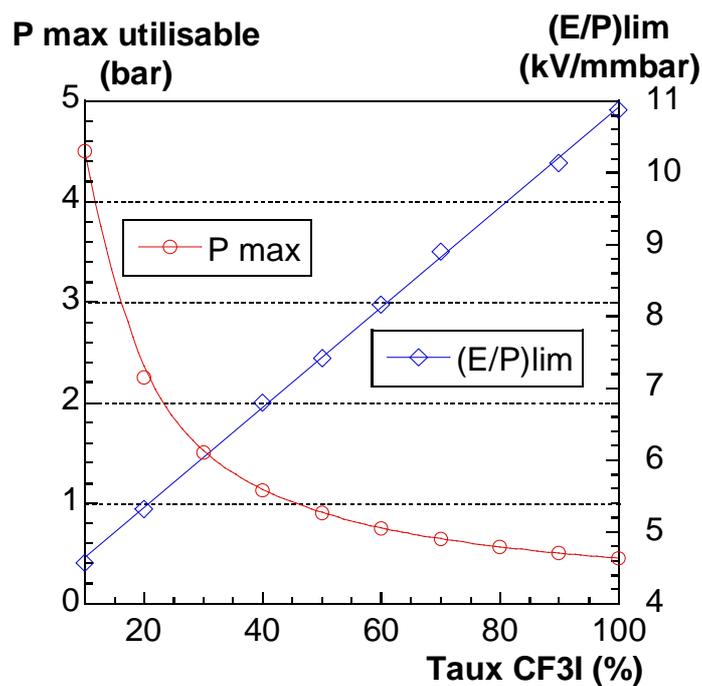


Fig. III-9 Pression de liquéfaction et champ réduit critique des mélanges CF₃I/N₂ en fonction du taux de CF₃I pour T=-40°C.

Nous concluons ainsi que le taux de CF₃I optimal pour des applications en moyenne tension est de 20% à 30%. La pression de service correspondant à ce mélange est d'environ 1,5 (pour 30%) à 2,2 (pour 20%) bars.

III.3 Résultats obtenus en champ quasi uniforme

III.3.1 Tension de claquage du CF_3I en champ quasi-uniforme

Le gaz CF_3I utilisé (pureté 99%) est fourni par Sigma Aldrich. L'évolution de la tension de claquage (V_c) en fonction du produit pression-distance (Pd) est présentée sur la Fig. III-10. La distance interélectrodes est mesurée à l'aide d'une lunette. Les valeurs théoriques sont calculées à l'aide de l'Eq. III.15, en utilisant le champ critique réduit (10,7kV/bar.mm) mesuré par [68] et une valeur de $M=0,025$ bar.mm (valeur extrapolée de la courbe présentée dans la Fig. III-4)

Quelques mesures sur le SF_6 ont été également effectuées, puis comparées avec les valeurs de référence données par la courbe de Paschen [56]. On remarque un bon accord de nos mesures avec les valeurs données par la courbe de Paschen du SF_6 et avec le calcul théorique (Eq. III.15 en prenant les valeurs de la littérature, $M=0,04$ bar.mm et $(E/P)_{\text{lim}}=9$ kV/bar.mm).

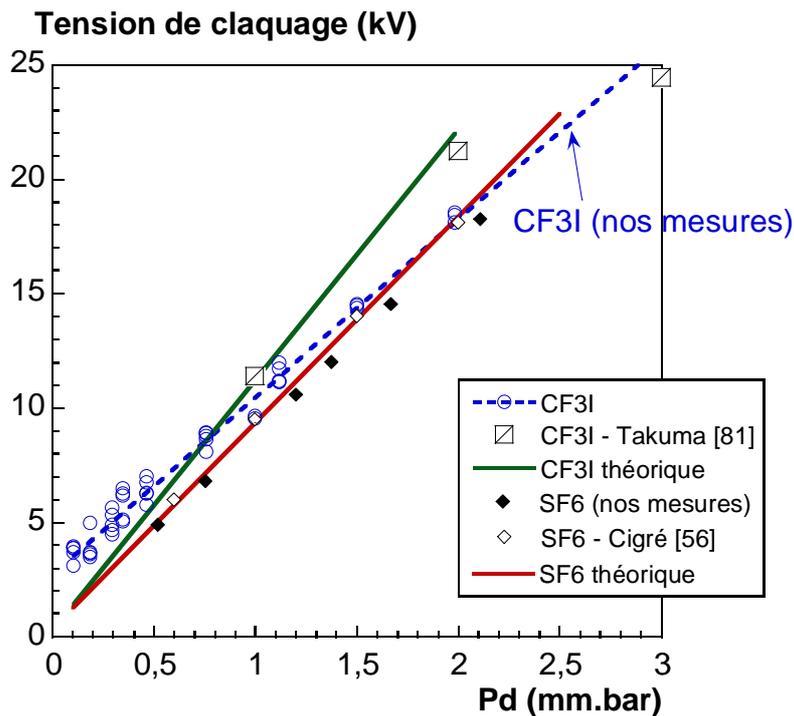


Fig. III-10 V_c de CF_3I et SF_6 . Les courbes théoriques sont données par l'Eq. III.15. V_c du SF_6 provenant de [56] et V_c (en valeur crête) du CF_3I provenant de Takuma et al. [81] sont aussi présentées, $D = 0,7$ mm

Pour le CF_3I , les points expérimentaux montrent une variation différente de la variation théorique. En effet, la pente théorique est égale à $(E/P)_{\text{lim}}=10,7$ kV/bar.mm alors que la pente

expérimentale (régression linéaire effectuée sur les points expérimentaux, pointillés bleus sur la Fig. III-10) vaut seulement 8kV/bar.mm, et la valeur de M déduite des points expérimentaux est de 0,32bar.mm. Cette valeur est plus élevée que celle attendue pour un gaz très électronégatif comme le CF₃I. Il semble que la même tendance est observée dans [81], malgré que la valeur V_c à Pd = 2 mm.bar soit plus élevée que nos mesures.

Ce résultat implique soit que les valeurs expérimentales aux faibles valeurs de Pd sont surévaluées soit que le champ critique réduit mesuré par [68] est surestimé. Des mesures complémentaires sont nécessaires afin de clarifier cette différence de comportement.

III.3.2 Mélanges CF₃I - N₂

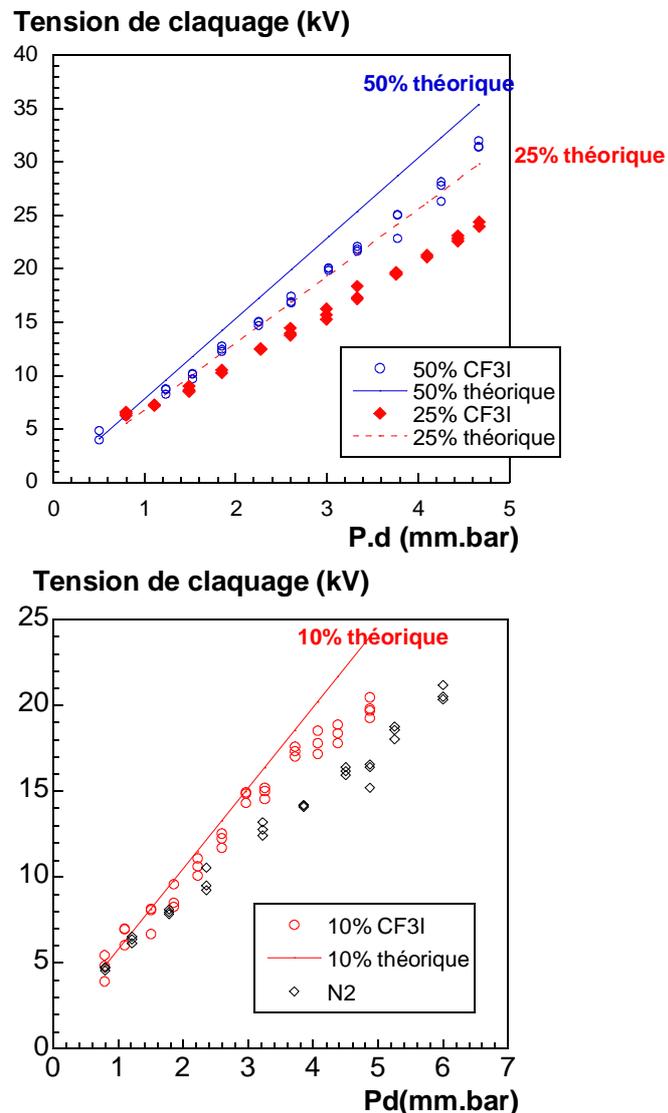


Fig. III-11 V_c des mélanges à 50%, 25% (haut) et mélange 10% (bas) de CF₃I dans N₂, D = 0,75 mm

Les tensions de claquage (V_c) des mélanges à 50%, 25% et 10% de CF₃I dans N₂ sont présentées sur la Fig. III-11. Notons que les tensions de claquage de N₂ pur que nous avons mesurées sont en bon accord avec les valeurs de référence données par [56]. Ce résultat

montre que les grandeurs (pression, distance et tension) sont mesurées correctement dans nos essais.

Les valeurs théoriques des mélanges à 50%, 25% et 10% de CF₃I dans N₂ sont calculées à partir de l'Eq. III.15 et des valeurs de $(E/P)_{lim}$ publiées dans [68]. On remarque sur la Fig. III-11 que l'accord, pour un mélange donné, entre les points expérimentaux et la courbe théorique est d'autant meilleur que la teneur en CF₃I est faible dans le mélange. La pente théorique est plus élevée que la variation expérimentale avec une différence qui diminue nettement lorsque la teneur de CF₃I passe de 50% à 10% dans le mélange avec l'azote. La différence la plus forte ayant été observée pour le CF₃I pur (Fig. III-10). Il semble donc que les valeurs de $(E/P)_{lim}$ données par [68] aussi bien pour le CF₃I pur que pour ses mélanges soient surestimées ou les valeurs de la figure de mérite M soient sous estimées.

Sur la figure III-12, nous avons comparé les valeurs de $(E/N)_{lim}$, déduites de nos mesures des pentes des courbes $Vc(Pd)$ (Fig. III-10 et Fig. III-11), avec les résultats de [68] où les $(E/N)_{lim}$ sont calculées à partir des courbes de $\frac{\bar{\alpha}}{N} \left(\frac{E}{N} \right)$. La différence entre ces valeurs augmente régulièrement avec le pourcentage de CF₃I dans le mélange. Rappelons que nos mesures pour l'azote pur et le SF₆ pur et ses mélanges ne présentent pas cette anomalie. Il reste à déterminer les raisons de ce comportement spécifique au CF₃I et à ses mélanges.

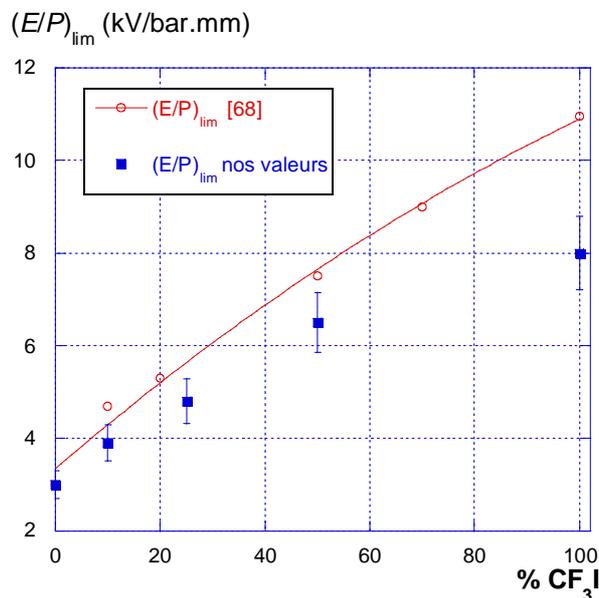


Fig. III-12 Courbes $(E/P)_{lim}$ en fonction du pourcentage de CF₃I dans N₂. Valeurs données par [68] à

partir des mesures de $\frac{\bar{\alpha}}{N} \left(\frac{E}{N} \right)$ et nos valeurs déduites des courbes de Paschen.

Il est nécessaire de vérifier la fiabilité de la méthode de mélange par pression partielle. La Fig. III-13 présente la tension V_c mesurée pour des mélanges successifs à une teneur donnée en CF_3I (soit 3 mélanges successifs à 25% et 2 à 50% de CF_3I dans N_2). Une bonne reproductibilité des résultats est observée aussi bien avec du CF_3I vierge qu'avec du CF_3I récupéré d'essais précédents.

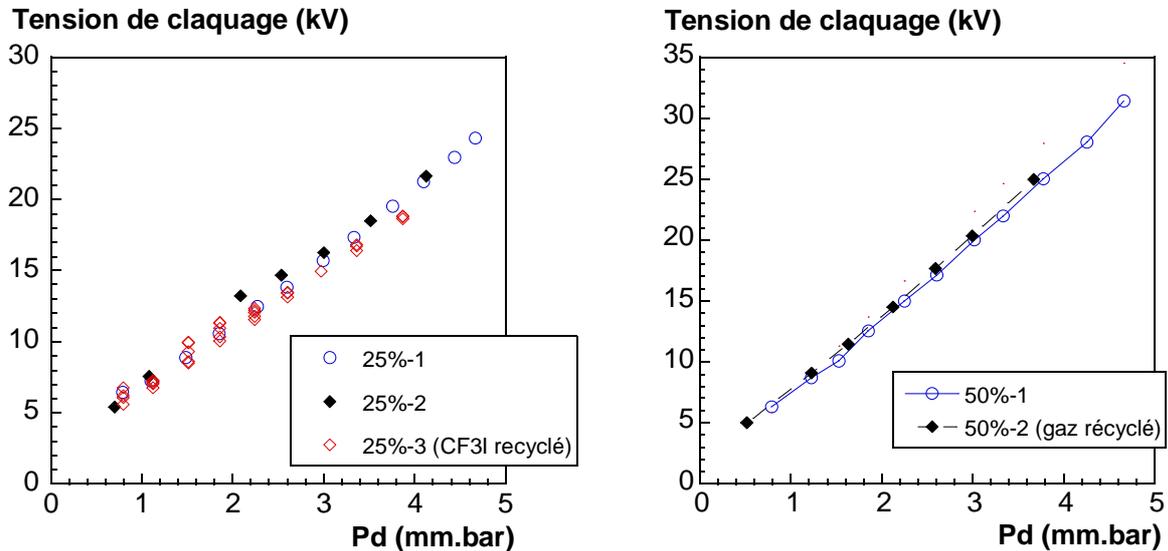


Fig. III-13 Courbes $V_c(Pd)$ pour différents mélanges à de CF_3I dans N_2 , $D = 0,75$ mm

III.3.3 Mélanges $\text{CF}_3\text{I} - \text{CO}_2$

Des recherches antérieures ont montré que les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$ sont préférables aux mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ pour la coupure d'arc électrique. Pourtant, très peu de données concernant la qualité d'isolation de ce mélange ont été trouvées dans la littérature.

Les tensions de claquage de ces mélanges, en fonction du produit pression-distance, sont présentées sur la Fig. III-14. On remarque que pour un taux donné de CF_3I , la tension de claquage est identique que le gaz additionnel soit du CO_2 ou de l'azote. Autrement dit, le mélange $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$ n'est pas meilleur que le mélange $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ en terme d'isolation.

Par ailleurs, le CO_2 étant lui-même un gaz à effet de serre, le mélange $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ est donc un meilleur candidat que le mélange $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$ du point de vue environnemental.

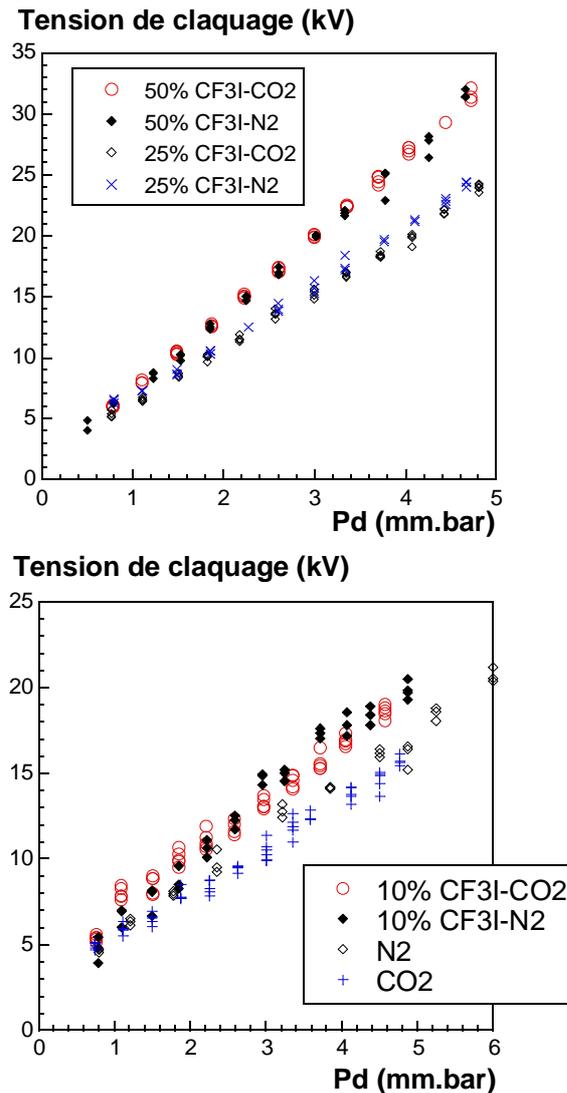


Fig. III-14 $V_c(Pd)$ pour des mélanges à 50% et 25% de CF_3I dans CO_2 (haut) et mélanges à 10% de CF_3I dans CO_2 et CO_2 pur (bas), $D = 0,75$ mm

III.3.4 Comparaison avec mélange $\text{SF}_6 - \text{N}_2$

Les tensions de claquage des mélanges SF_6/N_2 ont été rapportées dans plusieurs publications. Les résultats publiés correspondent en général à des produits pression-distance variant de 10 à quelques centaines de mm.bar. Quelques résultats avec des produits pression-distance inférieurs à 10 mm.bar sont publiés mais ils sont trop dispersés pour pouvoir être utilisés.

Afin de comparer les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ et SF_6/N_2 dans des conditions similaires, nous avons fait des mesures des tensions de claquage avec des mélanges SF_6/N_2 à 10%, 25% et 50% de SF_6 . La Fig. III-15 représente les tensions de claquage V_c du mélange SF_6/N_2 à 25% en fonction de Pd . La valeur de V_c pour les mélanges SF_6/N_2 sont plus élevée que celle de

mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$. Un mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ à 25% de CF_3I a une tenue diélectrique 1,45 fois plus élevée que celle du N_2 alors que ce rapport est de 1,75 pour le mélange SF_6/N_2 .

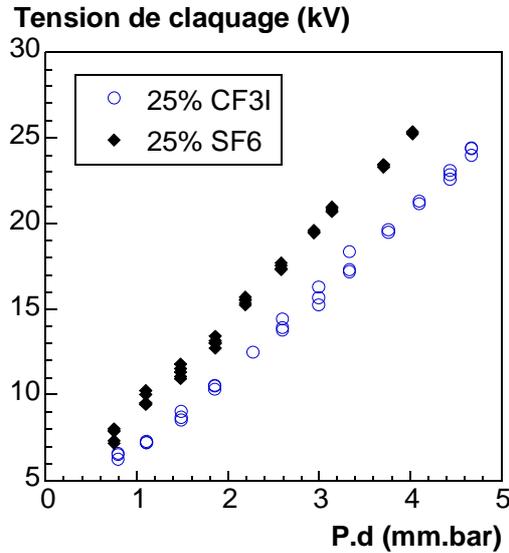


Fig. III-15 $V_c(Pd)$ pour des mélanges à 25% de SF_6 et 25% de CF_3I dans N_2 , $D = 0,75$ mm

L'influence des taux de CF_3I et SF_6 sur les mélanges avec N_2 et CO_2 est présentée sur la Fig. III-16. La tension de claquage V_c des mélanges SF_6-N_2 monte très rapidement avec le taux de SF_6 jusqu'à 10% puis tend à saturer. Par contre, pour les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ et $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$, V_c varie quasi linéairement avec le taux de CF_3I . Ceci confirme que l'effet de synergie obtenu avec les mélanges SF_6-N_2 n'est pas observé avec les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$.

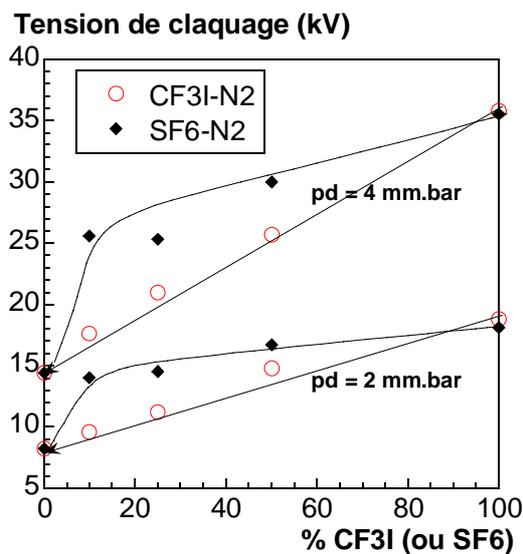


Fig. III-16 Influence du taux de CF_3I et SF_6 pour $Pd=2$ mm.bar et $Pd = 4$ mm.bar

Cette évolution linéaire pour les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ implique un taux élevé de CF_3I dans le mélange afin d'obtenir une tension de claquage comparable à celle du SF_6 pur. La

combinaison de cette contrainte d'isolation avec la contrainte de liquéfaction conduit à un taux optimal du CF_3I autour de 20% (voir la partie III.2.5).

III.3.5 Produits de décomposition

III.3.5.1 Apparition de particules solides

Après une série de claquage en présence de CF_3I , on observe des particules noires dans l'espace entre les deux électrodes. Avec des électrodes en aluminium, une distance inter-électrodes de 0,5mm et du CF_3I à 4 bars, après plusieurs séries de claquages, nous avons observé une quantité de particules très importante dans l'espace inter-électrodes (Fig. III-17). Après environ 12 heures de repos, la plupart des particules se déposent sur les électrodes (Fig. III-17,d). Après démontage de la cellule, on observe que des particules se sont également déposées sur les parois en téflon de la cellule. Le même phénomène est observé en diminuant la pression du CF_3I jusqu'à 1 bar (Fig. III-17,e).

Nous avons également étudié l'influence du matériau des électrodes en remplaçant les électrodes en aluminium par des électrodes en inox. Après plusieurs claquages à 3 bars pour une distance inter-électrodes de 0,75mm, des particules sont toujours observées. Cependant, la quantité de dépôt semble moins importante dans ce cas qu'avec des électrodes en aluminium (Fig. III-17,f).

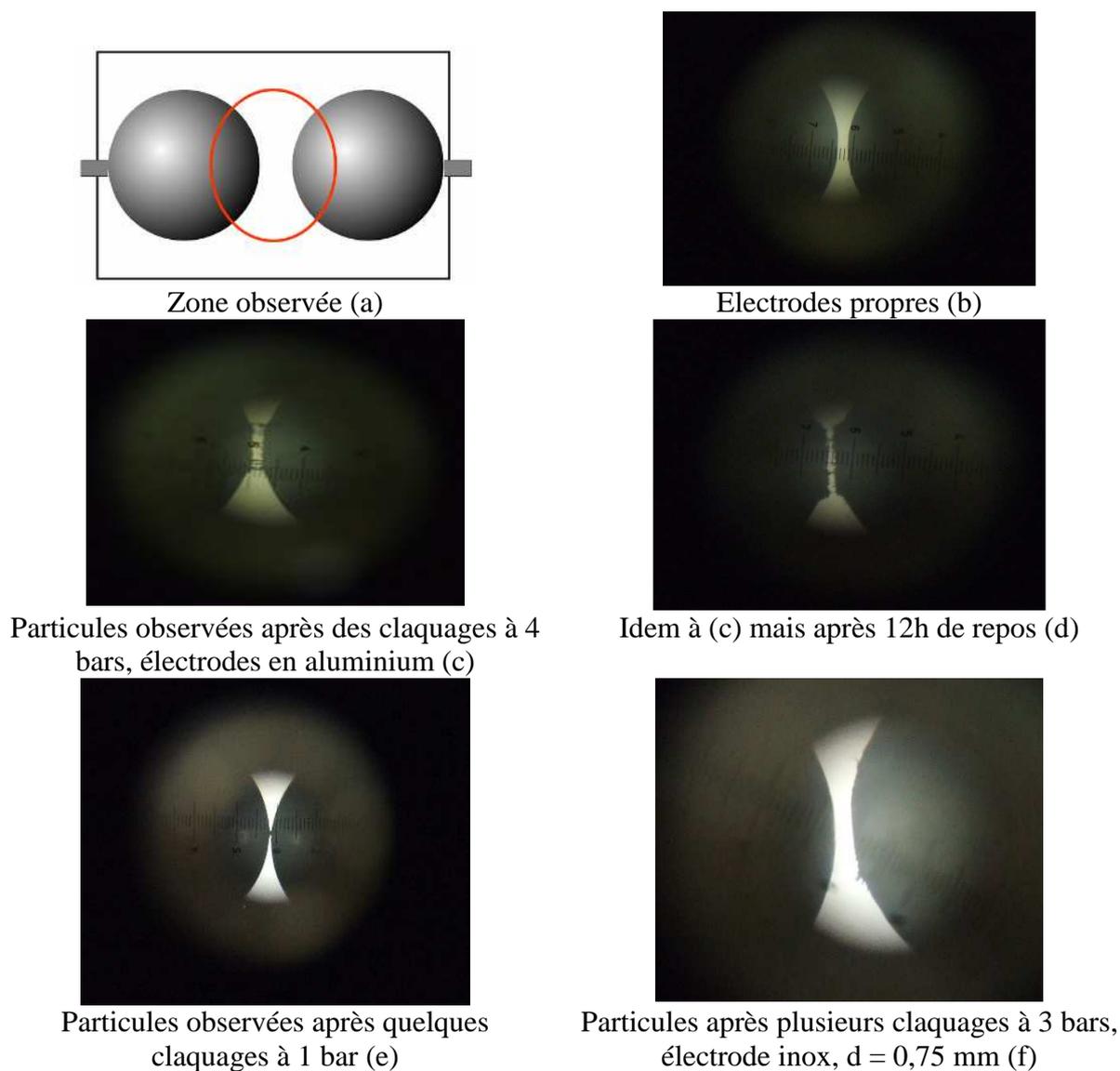
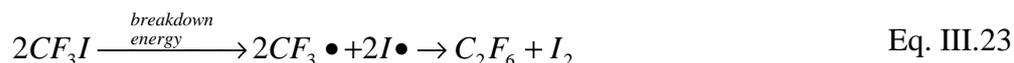


Fig. III-17 Surface des électrodes en fonction des claquages à différentes pressions de CF_3I

III.3.5.2 Nature des produits de décomposition solides et gazeux

L'analyse des particules a été effectuée afin d'en déterminer leur nature. Les particules sont solubles dans l'eau distillée en formant une solution jaune. Cette solution dans l'eau est très ressemblante à une solution d'iode sublimé. La nature des particules est donc attribuée à l'iode solide.

En effet, la liaison C-I dans CF_3I est faible. L'énergie de dissociation de la liaison C-I est de 225 kJ/mol. L'énergie de dissociation de la liaison C-F dans CF_3I n'est pas disponible dans la littérature. Cependant, elle doit être similaire de celle du CF_3Cl ou du CF_4 , qui est supérieure à 500 kJ/mol [84]. Ainsi, la liaison C-I peut être cassée par l'énergie du claquage. Une chaîne de réaction possible a été proposée par M. Kamarol [85]:



A l'aide d'étude de spectroscopie de masse, l'auteur a montré que le C₂F₆ est le sous-produit dominant dans le gaz CF₃I soumis à des décharges partielles (Fig. III-18). La concentration de C₂F₆ est d'environ 1300 ppm après 20h de décharges partielles dans le CF₃I à une tension qui correspond à 80% de la tension de claquage. Les autres sous-produits comme C₂F₄, C₂F₅I, ... sont également observés, mais avec une concentration négligeable par rapport à celle du C₂F₆.

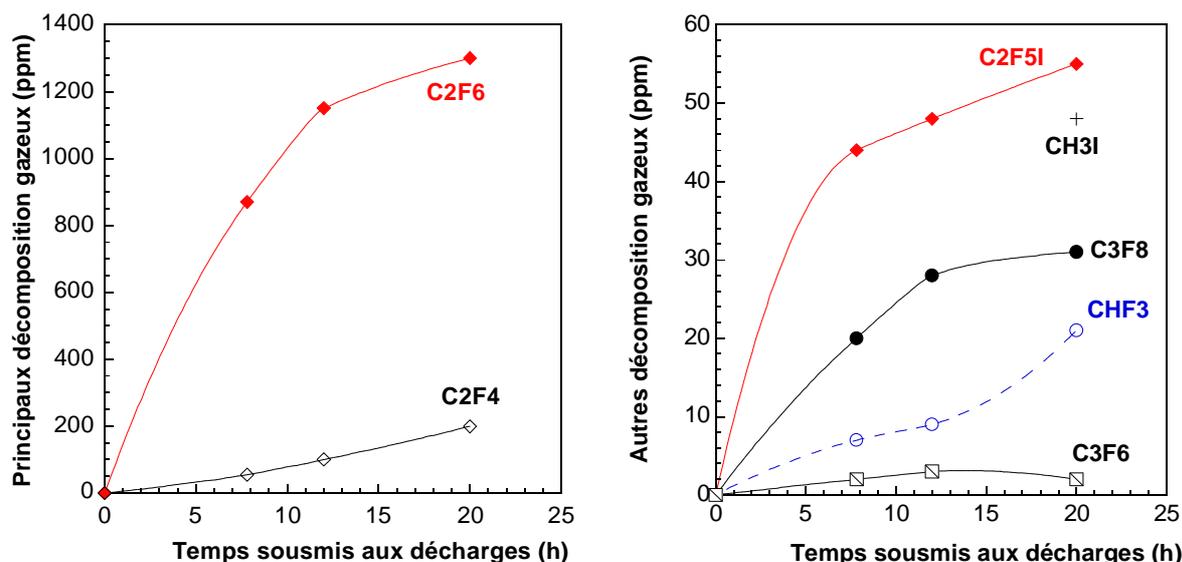


Fig. III-18 Produits de décomposition de CF₃I soumise aux DP, configuration pointe – plan, distance 10mm entre les électrodes, pression 1 bar [85]

Les produits de décomposition solides après décharges dans le CF₃I sont identifiés comme étant de l'iode par Yumoto et al. [86]. Dans le travail de Yumoto et al., les particules ont été analysées par la méthode EPMA (Electron Probe Micro Analysis). Ce résultat confirme notre conclusion que les particules formées par nos claquages sont formées essentiellement d'iode.

III.3.5.3 Influence sur la conductivité

En présence des particules solides, un courant de conduction de l'ordre du μA est détectable dans nos essais à des tensions bien inférieures à la tension de claquage (Fig. III-19). Le courant démarre à une tension faible et augmente exponentiellement avec la tension. Un saut brutal du courant est observé quand la tension atteint la tension de claquage. L'origine de ce courant de conduction est attribuée aux particules d'iode, qui sont légèrement conductrices.

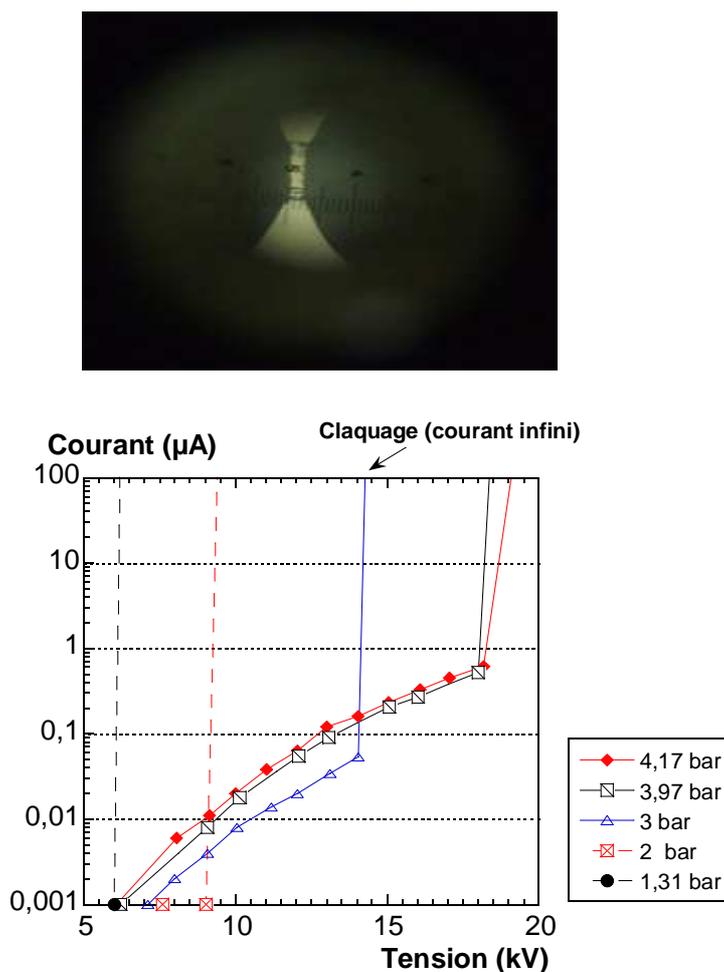


Fig. III-19 Courant de conduction mesuré dans l'état d'électrode « sale »

Afin de mieux justifier le lien entre le courant de conduction et la présence de particules, nous avons refait les mesures avec des électrodes propres. La cellule a été nettoyée, vidée jusqu'à ~ 2 Pa, puis remplie avec du gaz CF_3I neuf jusqu'à 3 bar. La distance entre les deux sphères est : $d=0,75$ mm. Nous avons ensuite fait plusieurs séries de claquage dans la cellule et le courant a été mesuré en fonction de la tension pour chaque série. A chaque fois, la tension est augmentée jusqu'au claquage et est ensuite maintenue pendant 3-4 secondes à cette valeur dans le but de favoriser la formation des particules. Dans ces conditions, le claquage se manifeste de manière répétitive avec une fréquence de quelques dizaines de Hz, qui dépend de la constante de temps de recharge de la cellule (déterminée par la résistance série de $2\text{M}\Omega$ et la capacité de la cellule de mesure). La pause entre deux séries successives est de deux minutes. Les courbes courant en fonction de la tension ainsi obtenues sont présentées sur la Fig. III-20.

Pour le CF_3I , à la première montée en tension (cellule et gaz propres), le courant n'est pas détectable tant que la tension est inférieure à V_c . Puis, pour les essais suivants, le courant devient mesurable à des tensions bien inférieures à V_c et il augmente exponentiellement avec

la tension (Fig. III-20). Ces résultats impliquent que le courant de conduction est lié à l'accumulation des particules d'iode formées au cours des claquages précédents.

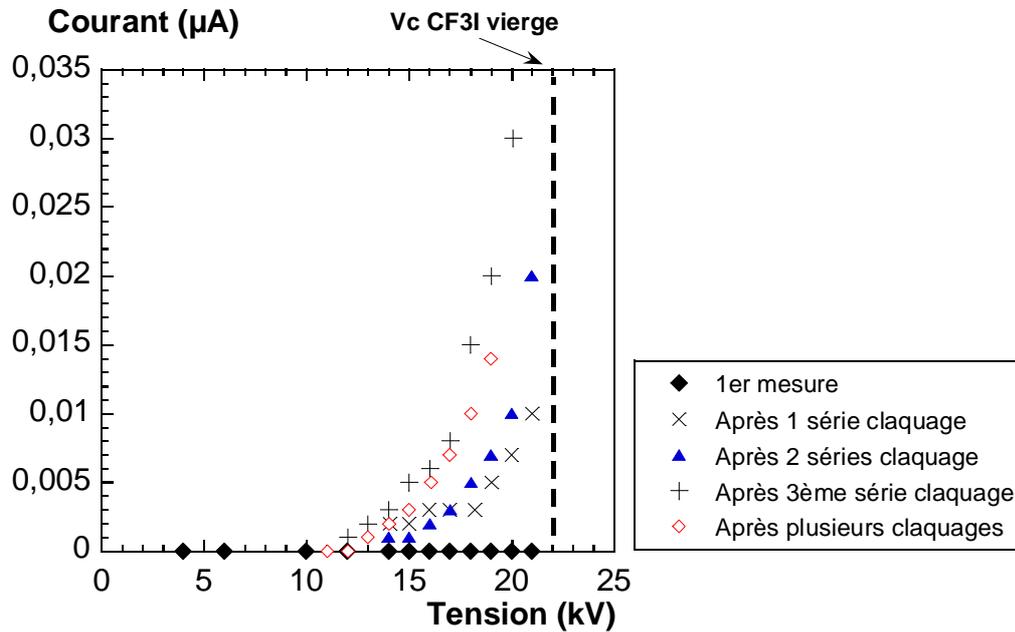


Fig. III-20 Courbes courant-tension successives dans le CF_3I , $d=0,75\text{mm}$ et $P=3\text{bar}$

Nous avons ensuite mesuré le courant (I) en fonction de la tension (V) pour le SF_6 pur en utilisant les mêmes procédures. Comme attendu pour le SF_6 où la formation de particules ne se produit pas, aucun courant de conduction n'est détecté, même après plusieurs séries de claquage (Fig. III-21). Ceci est une preuve supplémentaire que le courant observé avec le CF_3I est bien dû aux particules d'iode formées par les claquages précédents.

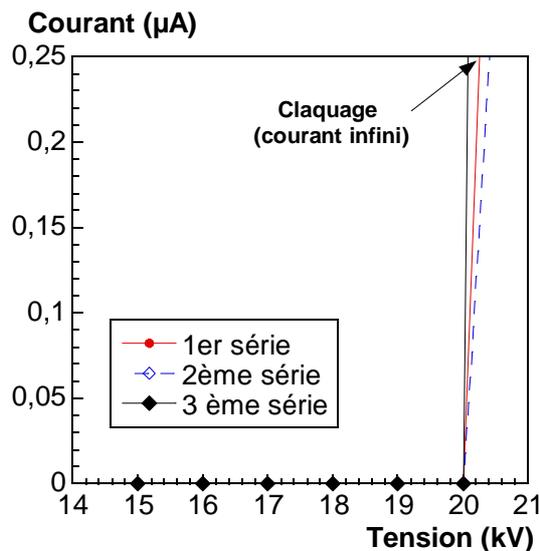


Fig. III-21 Courbes courant-tension successives dans le SF_6 , $d=0,75\text{ mm}$ et $P=3\text{bar}$

III.3.5.4 Influence des particules sur la tension de claquage

La Fig. III-22 présente les mesures $I(V)$ avec le CF_3I à 4 et 1,7 bars avec et sans particules. Comme déjà mentionné, le courant est beaucoup plus important dans le cas avec particules. Cependant, la tension de claquage (la tension à laquelle un saut brutal du courant est observé) reste peu influencée par la présence des particules d'iode.

La Fig. III-20 montre un phénomène identique. La tension de claquage V_c diminue très légèrement en fonction du nombre de claquage (teneur en particules) effectués dans le gaz initialement vierge. Ceci reste qualitatif car nous n'avons pas mesuré la concentration de particules d'iode dans la cellule.

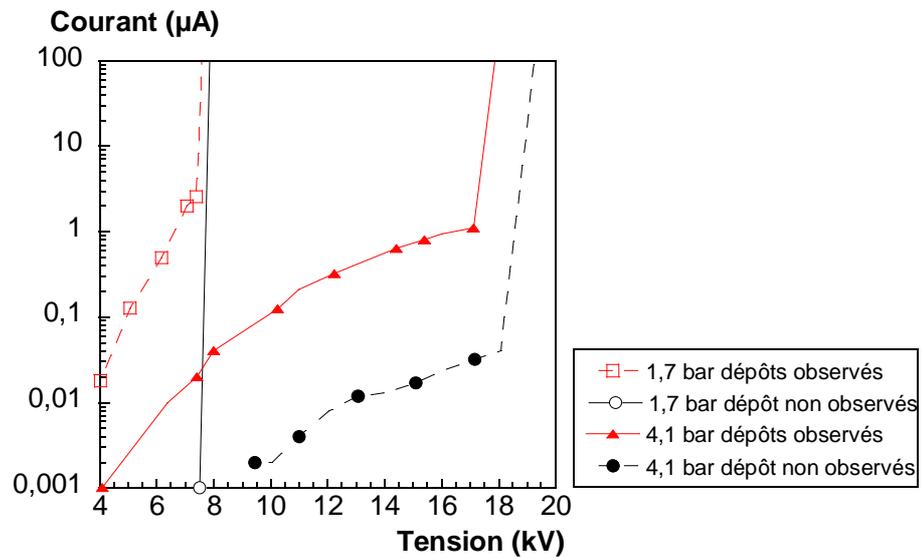


Fig. III-22 Influence de particules sur la tension de claquage de CF_3I , $d=0,75$ mm et $P=1,7$ et 4 bars

III.4 Conclusions

Dans ce travail, la tenue diélectrique du CF_3I a été mesurée expérimentalement. Les mesures des tensions de claquage du CF_3I en champ quasi-uniforme (avec une distance de l'ordre du mm) ont montré que la tenue diélectrique du CF_3I est comparable à celle du SF_6 . L'anomalie observée entre nos mesures de V_c et celles calculées à partir des valeurs du coefficient d'ionisation mesurées par [68] ne peut pas s'expliquer par l'influence des particules d'iode formées au cours des claquages successifs. Par contre, elle pourrait provenir de l'iode atomique avant la formation des particules solides (le CF_3I ayant une stabilité thermique faible par rapport au SF_6) qui peut fortement abaisser le champ critique réduit par sa présence. Rappelons que dans le SF_6 , la formation de fluor atomique à haute température ($\sim 2000\text{K}$ et un $(E/P)_{\text{lim}} \sim 0,05\text{kV}/\text{bar}\cdot\text{mm}$) explique le phénomène de transition au leader.

Le CF_3I a une température de liquéfaction bien plus élevée que celle du SF_6 . Le CF_3I comprimé sous une pression de 2 bars deviendra liquide si la température chute à -3°C , alors

que pour le SF₆ il faudra atteindre -50°C. Il est donc obligatoire de mélanger le CF₃I avec un gaz difficilement liquéfiable (par exemple N₂ ou CO₂) pour réduire sa pression partielle et éviter sa liquéfaction à basse température, afin de pouvoir fonctionner à -40°C pour les applications à l'extérieur et, -25°C pour les applications à l'intérieur. Avec les données thermodynamiques, nous avons montré que la pression partielle de CF₃I dans les mélanges ne doit pas dépasser 0,45 bar pour éviter la liquéfaction à -40°C et 0,885 bar pour éviter la liquéfaction à -25°C.

Avec les mélanges CF₃I-N₂ et en champ quasi-uniforme, l'évolution linéaire de la tension de claquage (V_c) en fonction du taux de CF₃I est bien vérifiée expérimentalement. Un mélange CF₃I-N₂ contenant 25% de CF₃I conduit à un gain d'environ 1,4-1,5 fois par rapport à N₂, alors que ce coefficient est d'environ 1,75 avec le mélange SF₆-N₂ à 25% de SF₆. Pratiquement les mêmes résultats sont observés avec les mélanges CF₃I-CO₂. L'effet de synergie important obtenu dans les mélanges SF₆-N₂ n'est pas observé dans les mélanges CF₃I-N₂ et CF₃I-CO₂.

La température de liquéfaction élevée du CF₃I implique un faible taux de CF₃I dans le mélange afin d'éviter la liquéfaction à basse température. En revanche, comme l'effet de synergie n'existe pas pour les mélanges de CF₃I, le taux de CF₃I doit être suffisamment important afin d'obtenir une qualité d'isolation nettement améliorée par rapport à N₂ pur. Nos calculs aboutissent à un taux optimal de CF₃I d'environ 20-30%.

Le claquage (= arc électrique) du CF₃I génère des particules d'iode. La présence de ces particules est visible après plusieurs claquages et elle s'accompagne d'un courant de conduction plus ou moins important. Notons que, dans nos conditions d'essai, la présence des particules d'iode ne modifie pas de façon appréciable la tension de claquage V_c .

Des particules d'iode pourraient également se former dans les zones de renforcement de champ d'un appareillage sous tension où peuvent se produire des décharges partielles. Ceci pourrait s'avérer être un inconvénient majeur pour l'utilisation de ce gaz en isolation très haute tension.

Pour l'application d'isolation à l'extérieur d'une ampoule à vide moyenne tension, la coupure n'est pas une contrainte pour le gaz d'isolation. De plus, le champ moyen autour d'une ampoule à vide n'est pas très élevé et donc les risques de décharges partielles sont réduits. L'utilisation de mélanges à base de CF₃I pour cette application en moyenne tension est envisageable comme nous le verrons par la suite.

Chapitre IV Etude de CF_3I et mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en champ non uniforme

Dans le Chapitre III, la performance d'isolation du CF_3I et de ses mélanges en champ quasi-uniforme a été caractérisée. Dans ce chapitre, le comportement de ces gaz en champ non uniforme sera étudié.

Nous commençons tout d'abord par des rappels sur les phénomènes de décharge dans les gaz en champ non uniforme : mécanismes de décharges « streamer », « leader », et des facteurs influençant la tenue diélectrique des gaz. Nous effectuons un rappel de tous les travaux déjà publiés sur le CF_3I et ses mélanges en champ non uniforme, qui restent encore assez limités. Les techniques expérimentales sont présentées dans la partie suivante. Dans ce chapitre, les mesures ont été faites dans la configuration pointe/plan, avec une distance interélectrode fixée à 30 mm, et en utilisant une impulsion de tension (choc de foudre normalisé) appliquée à la pointe. Deux paramètres sont étudiés : la tension d'apparition des décharges et la tension de claquage. Les gaz étudiés sont le CF_3I , le SF_6 et les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, et SF_6/N_2 . Les résultats obtenus avec ces gaz sont ensuite comparés.

IV.1 Etude bibliographique

IV.1.1 Décharges électriques dans les gaz en champ non uniforme

IV.1.1.1 Décharge « streamer »

Selon le modèle de décharge de type Townsend présenté dans le chapitre précédent, la décharge se propage entièrement dans l'espace interélectrode par la formation d'avalanches successives à partir d'électrons primaires puis secondaires. Par conséquent, le temps de retard au claquage doit être au moins égal au temps de transit d'un électron dans l'espace interélectrode. Or, les expériences ont montré que dans certaines conditions, le claquage peut intervenir avant qu'un électron n'ait pu traverser cette distance, en tenant compte de la mobilité de l'électron et de la valeur du champ appliqué. La propagation de la décharge dans ce cas ne peut pas s'expliquer par le modèle de Townsend qui est la conséquence du développement d'une avalanche unique. Ce mécanisme de propagation est souvent appelé « streamer ».

Considérons une première avalanche électronique qui se développe à partir d'un électron germe dans l'espace interélectrode. Si le nombre d'électrons produits par cette avalanche atteint une certaine valeur critique, le champ créé par sa charge d'espace deviendra

non négligeable par rapport au champ appliqué et modifiera fortement la distribution locale de celui-ci (Fig. IV-1). Le champ électrique devant la tête de l'avalanche devient supérieur au champ critique et de nouvelles avalanches peuvent se développer à partir d'électrons formés par l'action des radiations UV dans ce volume. Il se forme ainsi un canal de streamer qui se propage vers l'électrode opposée. Le processus se répète et conduit à un claquage si le canal traverse la distance interélectrode, ou il s'arrête si la chute de tension dans le canal ne permet plus de maintenir un champ supérieur au champ critique en tête de ce canal. Le modèle de Townsend n'est plus valable dans ce cas.

Meek [87] a établi un critère de transition entre l'avalanche électronique et le streamer en considérant que cette transition intervient lorsque le champ dû à la charge d'espace devient du même ordre de grandeur que le champ appliqué. Ce critère est satisfait si le nombre d'électrons dans l'avalanche est de l'ordre de 10⁸.

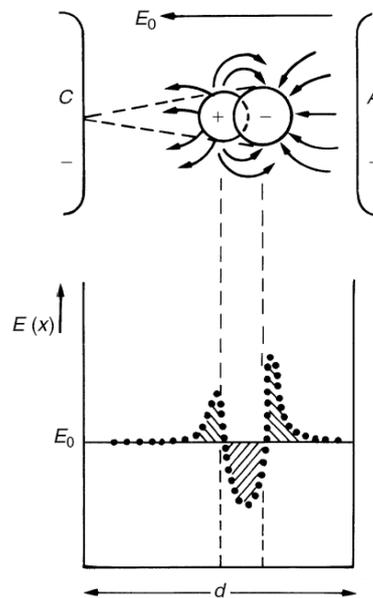


Fig. IV-1 Distorsion du champ dans l'espace interélectrode dû aux charges d'espace d'une avalanche électronique [88]

De son côté, Raether [89] a formulé un autre critère qui rejoint celui de Meek ; pour lui, il y a transition si l'avalanche atteint une taille suffisante, ce qui se traduit par l'équation :

$$\ln N_{cr} = \int_0^{x_0} (\alpha - \eta).dx = K_{str} \quad \text{Eq. IV.1}$$

avec x_0 la distance par rapport à l'origine de l'avalanche, N_{cr} le nombre d'électrons dans l'avalanche critique et $(\alpha - \eta) = \bar{\alpha}$ le coefficient d'ionisation efficace du gaz.

Si N_{cr} prends la valeur de 10⁸, nous avons :

$$K_{\text{str}} = \ln 10^8 \approx 18 \quad \text{Eq. IV.2}$$

K est cependant un coefficient strictement empirique.

IV.1.1.2 Transition au « Leader »

Dans certaines conditions et plus particulièrement pour les gaz très électronégatifs, le claquage peut se produire pour un champ moyen encore inférieur au champ requis pour la propagation des canaux de streamer. Il est donc impossible d'expliquer le claquage par le mécanisme de Townsend ou par le mécanisme de streamer. Il s'agit de claquage de type « leader ».

Le leader est composé d'un canal de décharge préférentiel (où la plus grande partie du courant de décharge s'écoule), qui suit la formation d'un streamer. La température dans le canal de leader est très élevée ($T > 1500 \text{ K}$), et donc le canal devient fortement conducteur. Le leader apparaît quand le produit densité * distance dépasse une certaine valeur critique, dépendant de la nature du gaz. Dans l'air, ce mécanisme apparaît pour des valeurs élevées du produit densité*distance ($> 2,4 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ soit $> 100 \text{ cm.bar}$) alors que dans le SF₆ le seuil est $Nd > 2,4 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ($> 1 \text{ cm.bar}$).

Sous certaines conditions (pression élevée, gaz électronégatif), une décharge leader peut se propager dans l'intervalle alors que le champ minimum est nettement inférieur au champ critique. Dans ce cas, le mécanisme de propagation de la décharge est le suivant [90][91]

- développement d'une couronne de streamers dans la zone de champ fort et par concentration du courant dans une zone réduite de la couronne, échauffement du gaz qui conduit à la formation d'un premier canal de leader ;
- développement rapide d'une zone d'ionisation en tête de ce canal de leader accompagnée d'une brève réillumination du canal et d'un pic de courant ;
- temps de pause τ à la fin duquel la zone d'ionisation se transforme en une nouvelle section de canal leader et crée une nouvelle zone d'ionisation en avant de la décharge. Comme le canal de leader est fortement conducteur, il se comporte comme une nouvelle « électrode » en forme de pointe, au bout de laquelle se forme un nouvel effet couronne.

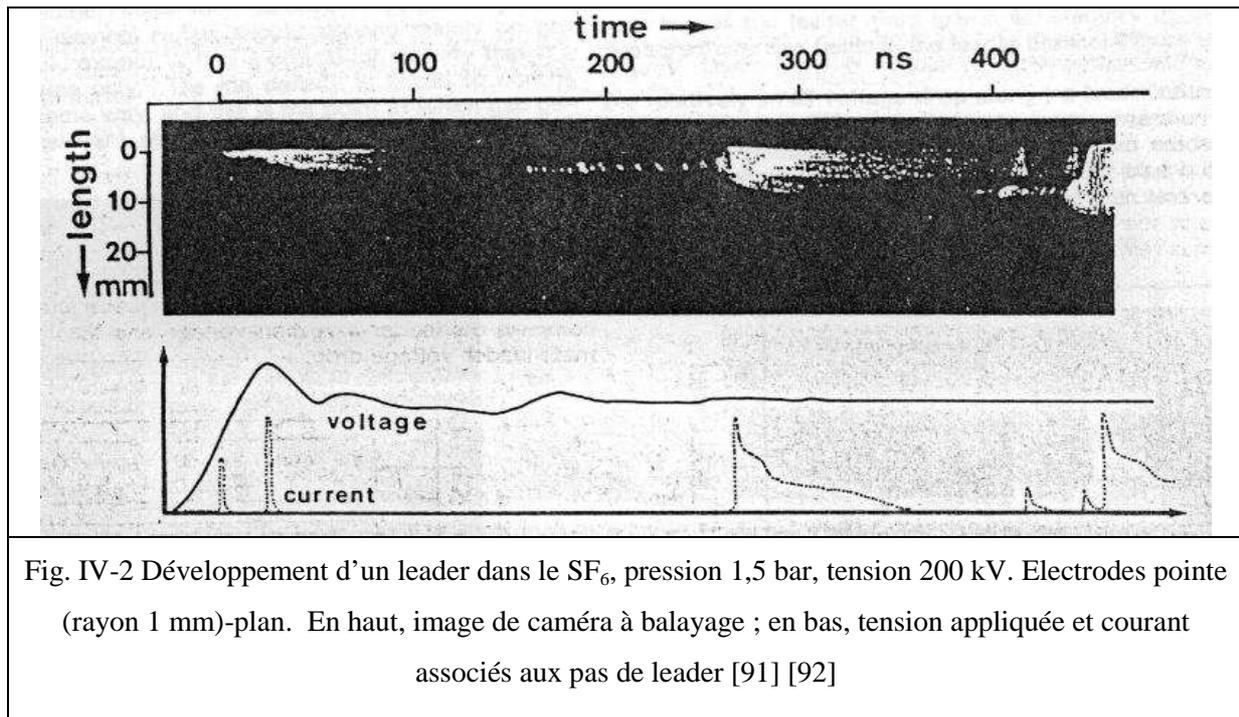


Fig. IV-2 Développement d'un leader dans le SF_6 , pression 1,5 bar, tension 200 kV. Electrodes pointe (rayon 1 mm)-plan. En haut, image de caméra à balayage ; en bas, tension appliquée et courant associés aux pas de leader [91] [92]

IV.1.1.3 Influence de la pression et de l'onde de tension appliquée

Nous avons vu que, pour qu'une décharge existe, une condition nécessaire est la présence d'électrons germes dans la zone où le champ électrique est suffisant ($E > E_{crit}$) pour déclencher l'ionisation du gaz. Si la tension appliquée est continue ou alternative, la probabilité que cette condition soit réalisée est égale à 1, et la condition nécessaire porte uniquement sur le champ électrique. Par contre, si la tension est impulsionnelle, il n'est pas assuré qu'un électron soit présent quand le champ est supérieur au champ critique. Le temps séparant l'instant d'application de la tension du moment d'apparition d'un électron germe est appelé temps de retard statistique.

Ainsi, quand le champ est quasi-homogène, la tension de claquage sous onde impulsionnelle est une grandeur statistique puisque l'application d'un champ supérieur au champ critique ne conduira pas systématiquement au claquage. Dans ce cas, on détermine le niveau de tension pour lequel la probabilité de claquage est égale à une valeur donnée (le plus souvent 5%, 10% ou 50%).

Comme présenté dans le chapitre précédent, en champ homogène et pour une distance inter-électrodes fixée, la tension de claquage varie de la même manière que la pression. Si l'on considère un champ électrique fortement inhomogène, l'évolution de la tension de claquage (V_c) en fonction de la pression est tout à fait particulière (voir Fig. IV-3).

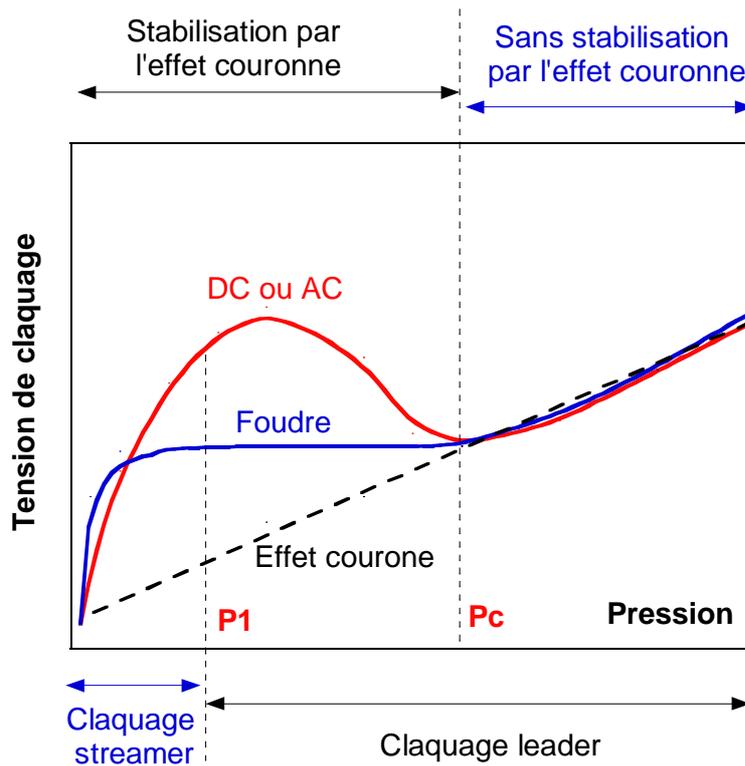


Fig. IV-3 Régimes de claquage sous champ divergent en fonction de la pression [93]

La tension d'apparition de l'effet couronne croît toujours linéairement avec la pression, alors que la tension de claquage suit une autre évolution. Sous tension continue ou alternative, la tension de claquage croît avec la pression, puis atteint un maximum avant de décroître jusqu'à rejoindre la tension seuil couronne pour une valeur de la pression appelée pression critique et notée P_c . La décroissance de la tension de claquage correspond au changement de régime de claquage de type streamer au type leader. En effet, à pression inférieure à P_1 , le claquage est dû à des streamers alors qu'il est de type leader si la pression est supérieure à P_1 . Si on continue d'augmenter la pression au-delà de P_c , la tension de claquage se confond avec la tension d'apparition de l'effet couronne et redevient croissante avec la pression.

Pour des pressions inférieures à P_c , il se produit une stabilisation par effet couronne. Dans cette région, la charge d'espace créée par l'effet couronne est de même polarité que celle de l'électrode de faible rayon de courbure, ce qui conduit à une diminution du champ électrique sur cette électrode.

La stabilisation par l'effet couronne est moins importante lorsque la tension appliquée est impulsionnelle (e.g. choc de foudre). Cela s'explique par le temps de montée rapide de la tension ($\sim 1\mu s$), qui laisse peu de temps à la charge d'espace pour se former. Ainsi, la tension de claquage est inférieure sous onde impulsionnelle que sous onde alternative.

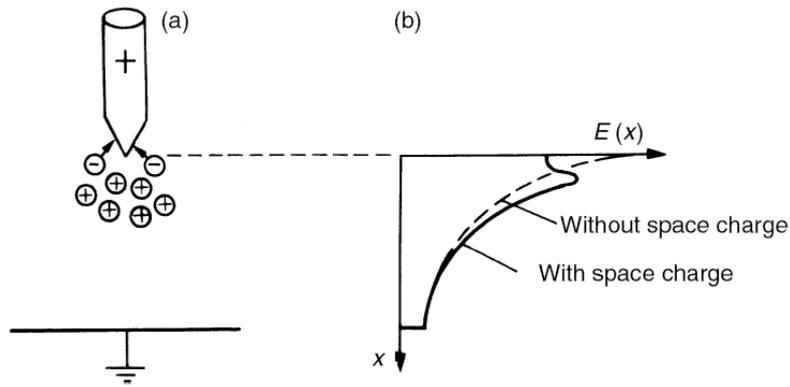


Fig. IV-4 Distribution de la charge d'espace en géométrie pointe/plan (pointe positive) et distribution du champ modifiée par la charge d'espace [88]

Pour les formes de tension continue ou onde de choc et avec une distribution de champ non homogène, la polarité a une influence importante sur la tension de claquage. Considérons le cas d'une pointe chargée positivement face à un plan comme montré dans la Fig. IV-4. Comme les électrons sont très mobiles, ils se déchargent très rapidement à l'anode et une charge d'espace positive apparaît. La charge d'espace positive conduit à une réduction du champ près de l'anode et elle renforce le champ en allant vers la cathode. Il apparaît ainsi une distorsion de champ comme montrée sur la Fig. IV-4. Dans ce cas, la région de champ fort se développe vers le plan et elle facilite la propagation de la décharge.

Quand la polarité de la pointe est négative, les électrons se propagent vers la région de champ faible et ils laissent une charge d'espace positive autour de la pointe. Le champ est toujours renforcé vers la pointe mais sur une zone plus réduite qu'en polarité positive. La condition de propagation est plus difficile à atteindre et il faut continuer à augmenter la tension pour que le processus continue. Ainsi, quand le champ est non homogène, la tension de claquage en polarité négative est souvent plus élevée que celle en polarité positive.

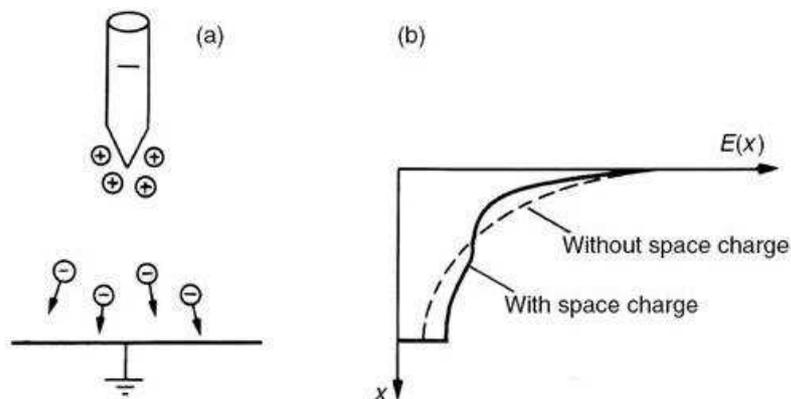


Fig. IV-5 Distribution de la charge d'espace en géométrie pointe/plan (pointe négative) et distribution du champ induite par cette charge d'espace [88]

IV.1.2 Comportement du SF_6 et des mélanges en champ non uniforme

Comme en champ quasi uniforme, le SF_6 a une très bonne tenue diélectrique en champ non uniforme. Une comparaison de tenue diélectrique du SF_6 avec celle de l'air et du N_2 est montrée sur la Fig. IV-6 [94]. La tenue diélectrique du SF_6 est environ 3 fois plus élevée que celle de N_2 . La différence entre le SF_6 et l'air est moins remarquable qu'en champ quasi uniforme. Celle-ci s'explique par le régime de décharge conduisant au claquage. En effet, dans la plage de pression étudiée, le claquage dans le SF_6 est dû aux décharges leaders alors qu'il est dû aux décharges streamers pour l'air.

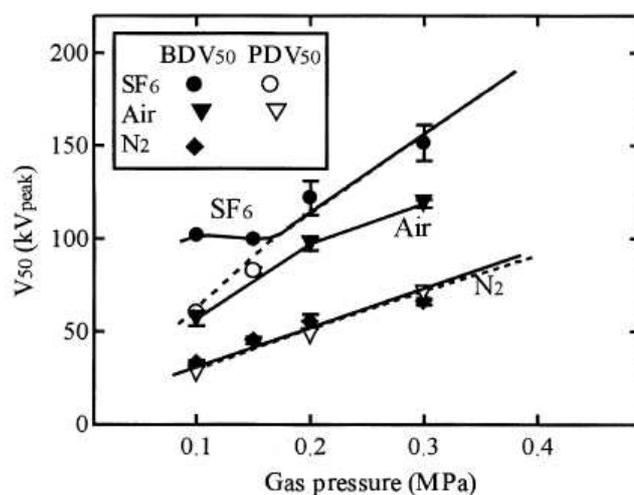


Fig. IV-6 Tenue diélectrique en configuration tige – plan de SF_6 , air et N_2 , diamètre de tige $d = 5$ mm, distance $l = 40$ mm [94]

En champ non homogène, il est plus difficile de conclure sur l'effet de synergie des mélanges de SF_6 avec un autre gaz (air, N_2 , CO_2 , ...) qu'en champ quasi uniforme. L'effet de synergie peut être observé ou pas, suivant la configuration et la distance entre les électrodes, la pression, ... Cela peut s'expliquer par le régime de décharge conduisant au claquage et par l'influence des charges d'espaces qui modifie la distribution de champ initiale.

En configuration pointe/plan et avec une pointe très fine, A.Quenin [57] a trouvé que les mélanges à 5%, 10% et 15% de SF_6 dans N_2 ne sont pas meilleurs que le N_2 pur. D'autres auteurs, comme N.Hayakawa [95] trouvent que l'addition de 2% de SF_6 au N_2 peut nettement améliorer la tenue diélectrique du N_2 pur. Par ailleurs, des mélanges SF_6/N_2 , SF_6 /air ou SF_6/CO_2 [96][97] avec un taux de SF_6 élevé (de 60 à 90%) peuvent montrer une tenue diélectrique supérieure au SF_6 pur. Dans l'exemple montré sur la Fig. IV-7, (configuration tige/plan, distance interélectrode=50mm), un mélange de 60 à 80% de SF_6 dans N_2 sous une pression de 2 bars possède une tension de claquage supérieure à celle du SF_6 pur sous la même pression.

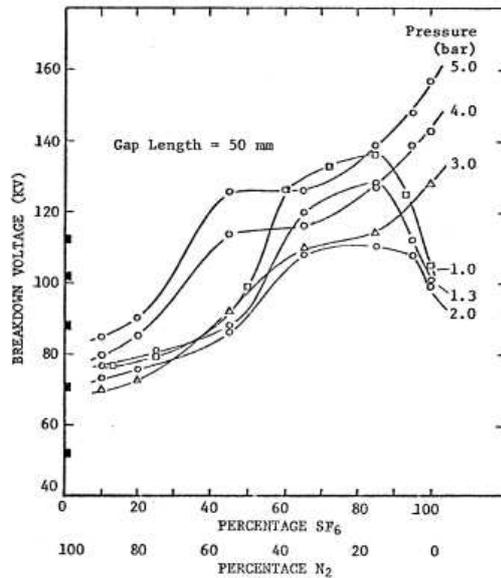


Fig. IV-7 Tension de claquage en fonction du taux de SF₆ dans la configuration tige-plan et sous tension impulsionnelle [97]

IV.1.3 CF₃I et ses mélanges en champ non uniforme

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les études sur la performance diélectriques du CF₃I et de ses mélanges en champ quasi uniforme. En champ non uniforme, très peu d'informations sont disponibles dans la littérature.

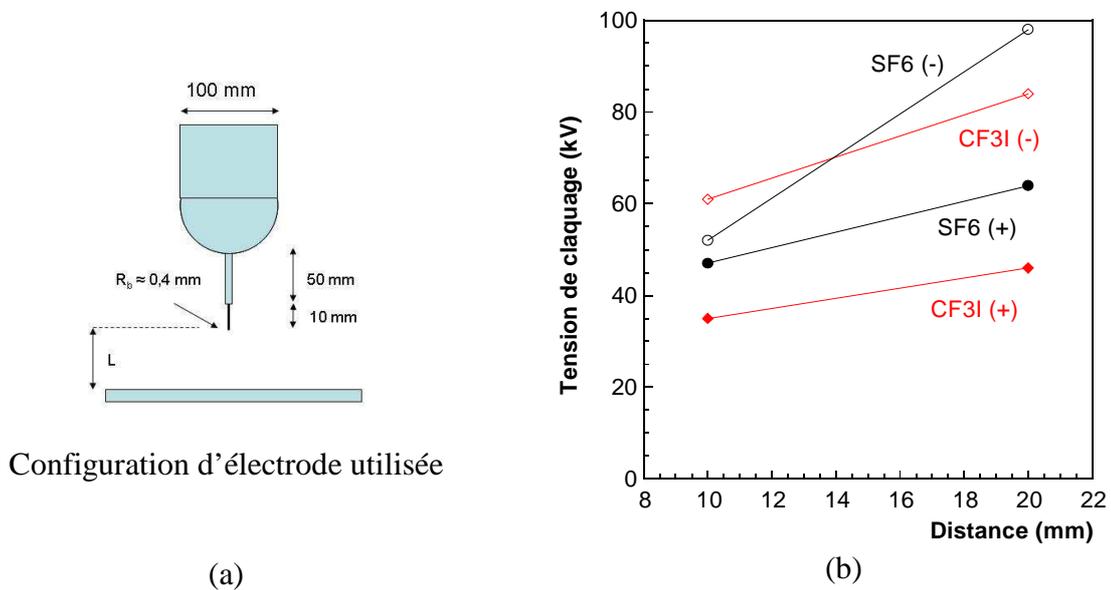


Fig. IV-8 Tension de claquage de CF₃I et SF₆, géométrie pointe plan, rayon de courbure $R_b \approx 0,4$ mm, distance $L = 10$ mm et 20 mm, pression 1 bar, créneau de tension appliqué à la pointe [98]

H.Toyota et al [98] a effectué des mesures avec CF₃I et SF₆ dans la configuration pointe-plan, sous une pression de 1 bar. La configuration d'électrodes utilisée est présentée

sur la Fig. IV-8a. En appliquant un créneau de tension avec un temps de montée ultra rapide (≈ 20 ns), la tension de claquage des deux gaz à des distances inter-électrodes de 10 mm et 20 mm est présentée sur la Fig. IV-8b. En polarité positive, le CF₃I a une tension de claquage (V_c) bien inférieure à celle du SF₆. En polarité négative et une distance de 10mm, V_c de CF₃I est supérieure à V_c de SF₆. Elle devient inférieure à celle du SF₆ à la distance de 20mm entre la pointe et le plan.

La comparaison des tensions de claquage de CF₃I et SF₆ à différentes pressions a été faite par M.Kamarol [85] . La tension de claquage (V_c) et la tension d'apparition des décharges partielles (VDP) de CF₃I et SF₆ sont présentées sur la Fig. IV-9. Les résultats ont été obtenus en géométrie pointe/plan, pour une distance inter-électrodes de 10 mm et en tension alternative appliquée à la pointe. En cycle positif de la tension, le VDP de CF₃I est plus élevé que le VDP de SF₆. En cycle négatif, les deux gaz ont pratiquement la même valeur de VDP.

Contrairement à la tension VDP, la tension de claquage de CF₃I est nettement inférieure à celle de SF₆. La différence est la plus remarquable à 2 bars de pression. V_c de CF₃I à 2 bars est seulement la moitié de V_c de SF₆.

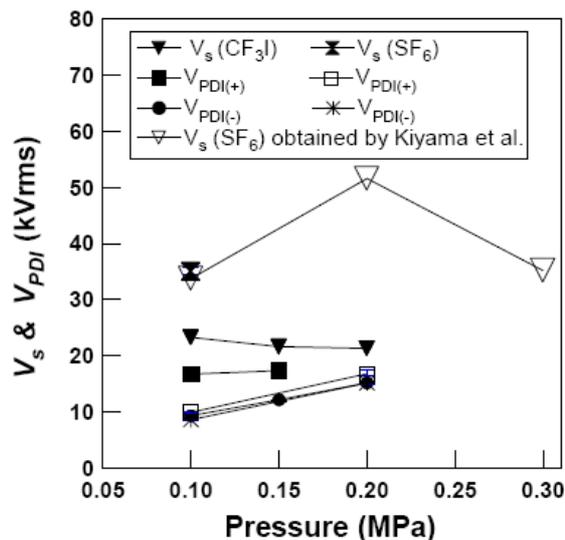


Fig. IV-9 La comparaison de la tension de claquage de CF₃I et SF₆ à différentes pressions, géométrie pointe plan, distance 10mm entre les électrodes, tension AC [85]

Le temps de retard au claquage dans CF₃I et SF₆ a été également investi par H.Toyota et al. [98]. La configuration d'électrodes est la même que celle présentée sur la Fig. IV-8a. Pour ces mesures, une source de tension de type créneau avec un temps de montée ultra rapide (≈ 20 ns) a été utilisée. Celle-ci permet d'étudier le phénomène à très courte durée (\approx centaines ns) avec une bonne précision. Par ailleurs, pour cette mesure, une source radioactive (⁶⁰Co) permet de produire des électrons germes dans l'espace interélectrodes, et ainsi de minimiser le

temps de retard statistique t_s . Le temps de retard mesuré est donc essentiellement le temps de retard formatif t_f . Rappelons que t_s est le temps de retard à la génération d'une décharge, alors que t_f est le temps nécessaire pour qu'une décharge puisse traverser l'espace interélectrodes (voir plus de détails dans [88]). Les résultats obtenus sont présentés sur la Fig. IV-10.

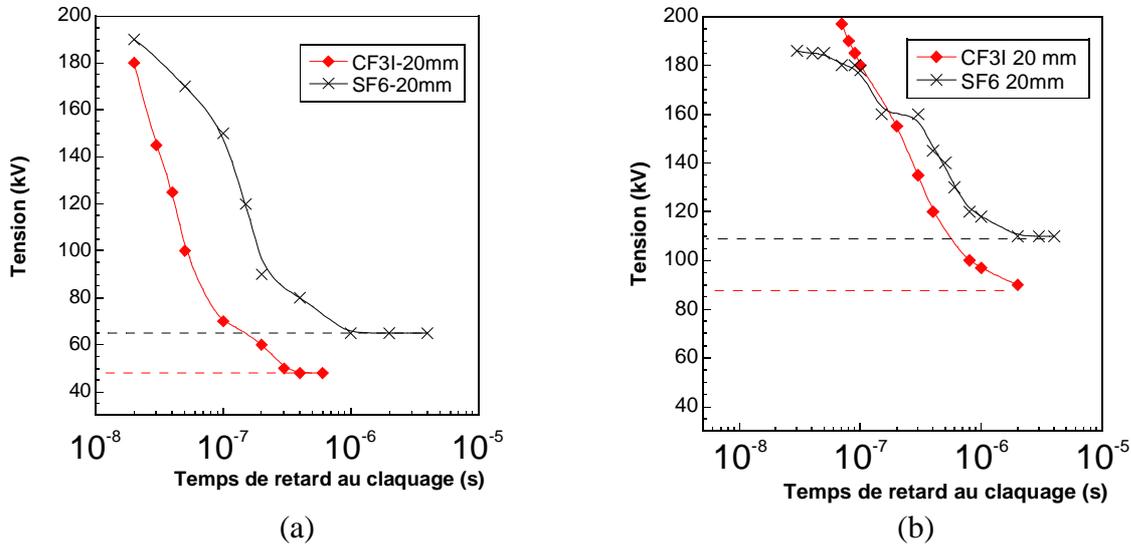


Fig. IV-10 Temps de retard au claquage de CF₃I et SF₆ en champ non uniforme et polarité positive (a) et polarité négative (b), distance 20 mm entre la pointe et le plan [98]

Les claquages à faible surtension ($V \approx V_c$) se produisent avec un retard de l'ordre de la μ s après l'application de la tension. Ce temps de retard ensuite diminue avec l'augmentation de la surtension. Cela suggère que la vitesse de propagation de la décharge dans les gaz augmente avec le niveau de surtension.

En champ non homogène, avec une même tension appliquée à la pointe, le claquage se produit avec un temps de retard plus faible dans le CF₃I que dans le SF₆. Par conséquent, la vitesse de propagation de la décharge est inversement plus rapide dans le CF₃I. A l'aide d'une caméra à balayage de fente, H. Toyota [98] a mesuré la vitesse de propagation des décharges dans le CF₃I et le SF₆ à 1 bar, avec une tension de 200kV appliquée à la pointe. Dans les deux polarités, la décharge se propage avec une vitesse beaucoup plus élevée dans le CF₃I (Tab. IV-1).

Tab. IV-1: Vitesse de propagation de décharges dans CF₃I et SF₆, tension 200 kV (créneau avec temps de montée 20ns), pression 1 bar, distance D = 20 mm [98]

	Polarité positive	Polarité négative
SF6	$1,4 \cdot 10^3$ km/s	$0,47 \cdot 10^3$ km/s
CF3I	$4,8 \cdot 10^3$ km/s	$4,1 \cdot 10^3$ km/s

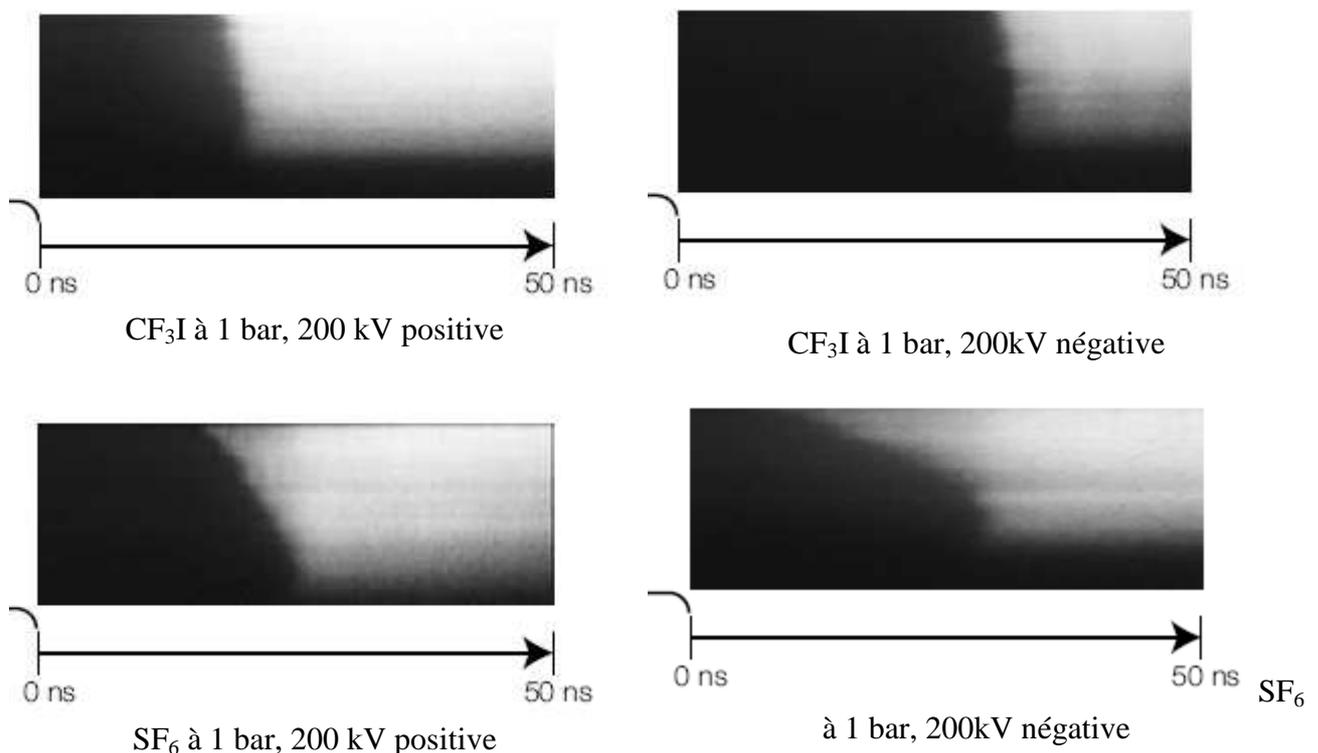


Fig. IV-11 Propagation de décharge dans CF₃I et SF₆ en polarité positive et en polarité négative, distance inter-électrode 10 mm [98]

Les résultats obtenus en champ non uniforme montrent que la performance d'isolation du CF₃I est moins bonne que celle du SF₆. En effet, si la tension d'apparition des décharges (PDV) du CF₃I est comparable, parfois même plus élevée, que celle du SF₆, le claquage, au contraire, se produit plus facilement dans le CF₃I que dans le SF₆. En conclusion, ces études montrent que, par rapport au SF₆, le claquage du CF₃I en champ divergent se produit à une tension plus faible et la décharge se propage à une vitesse beaucoup plus élevée.

La tension d'apparition des décharges est comparable dans le CF₃I et le SF₆, ceci est cohérent avec les résultats obtenus en champ quasi uniforme où le claquage est uniquement déterminé par le champ de génération des décharges. Rappelons que le CF₃I et le SF₆ ont des valeurs de champ critique très proches $\sim 9 \text{ kV/mm.bar}$. D'autre part, en champ quasi-uniforme, le champ moyen est largement suffisant pour qu'une décharge puisse se propager (par avalanches électroniques). Une fois qu'une décharge est générée, elle conduit automatiquement au claquage.

Les informations concernant la performance d'isolation des mélanges CF₃I/N₂, en champ divergent, n'ont pas été publiées. Dans ce chapitre, nous allons donc étudier la tenue diélectrique des mélanges CF₃I/N₂ en utilisant une géométrie pointe/plan (i.e. un champ très divergent). Cette étude est essentielle pour bien caractériser les mélanges CF₃I/N₂ en vue d'applications en haute tension.

IV.2 Techniques expérimentales

IV.2.1 Configuration d'électrode et cellule d'essai

Pour étudier le comportement du CF_3I et de ses mélanges en champ divergent, nous avons utilisé la configuration d'électrodes pointe/plan. La pointe en acier a un diamètre de 1mm, avec une extrémité conique de rayon de courbure $100\mu\text{m}$. Le plan est en duralumin, avec un diamètre $\approx 60\text{mm}$ et une épaisseur $\approx 15\text{mm}$. Ses bords sont arrondis afin d'éviter le renforcement de champ. Pour limiter le nombre d'essais, la distance interélectrodes est fixée à 30mm.

Les électrodes sont placées dans une cellule étanche, qui est constituée par un tube transparent en polyméthacrylate de méthyle (PMMA) et de deux brides en laiton. Le diamètre extérieur, intérieur et la longueur du tube sont respectivement de 150, 95, et 400 mm. Sa transparence permet de visualiser les décharges électriques dans l'espace interélectrodes. La cellule peut supporter une pression de 3 bars (pression absolue). Des pièces en téflon sont installées dans la cellule afin d'en réduire son volume et donc la quantité de gaz à utiliser pour chaque essai.

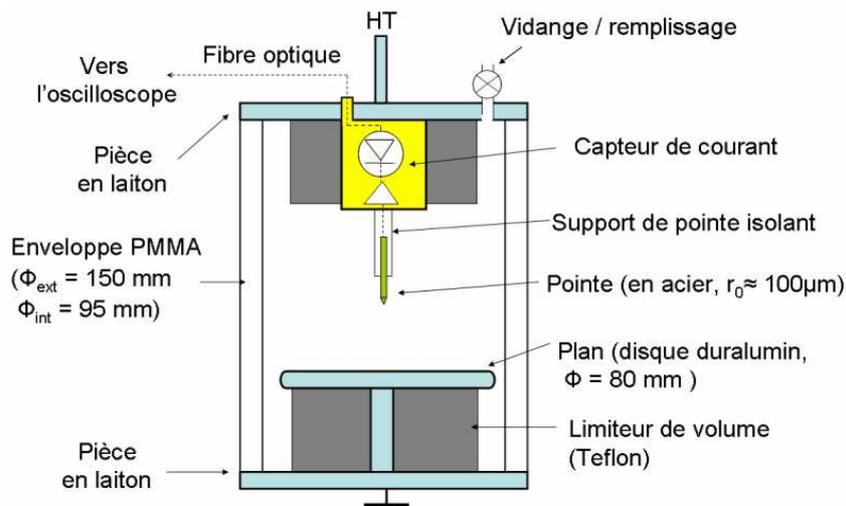


Fig. IV-12 Cellule d'essais et le système d'électrode pointe – plan

IV.2.2 Forme de tension utilisée

Pour cette étude, nous avons utilisé la forme de tension normalisée ($1,2 / 50\mu\text{s}$), définie par la norme CEI60060-1. Un choc de foudre normalisé est caractérisé par les paramètres suivants (Fig. IV-13) :

- Amplitude : la différence entre la valeur crête et la ligne de base
- Vraie origine O: le moment où la tension commence à monter (pour la polarité positive) ou descendre (pour la polarité négative).

- Origine virtuelle O1: intersection entre la ligne AB et l'axe temps. Les points A et B correspondent au moment où la tension atteint 30% et 90% de sa valeur crête.
- Temps de montée t1 : 1,67 fois le temps mis par le signal pour passer de 30% à 90% de sa valeur maximale (du point A au point B).
- Temps de descente t2 : temps mis par le signal pour passer de l'origine virtuelle O1 à une valeur de la tension descendante égale à 50% de sa valeur maximale.

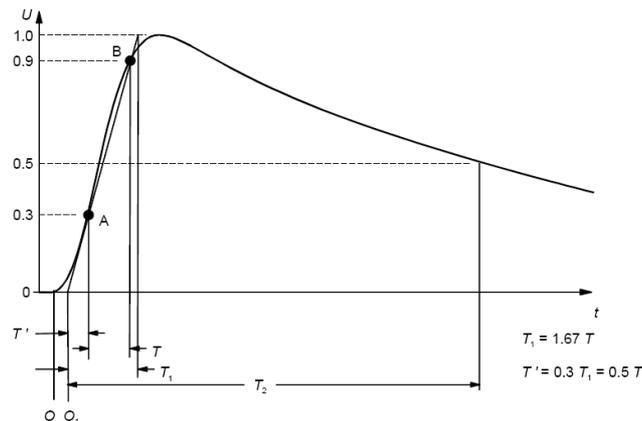


Fig. IV-13 Choc de foudre normalisé 1,2/50 μ s (défini par la norme CEI60060-1)[99]

Pour faire les essais avec la forme de tension normalisée, nous avons utilisé le même générateur que celui précédemment décrit (Chapitre II, partie II.2.3) mais en introduisant les modifications suivantes :

- Les trois derniers étages du générateur sont court-circuités. Par conséquent, seul les deux premiers étages du générateur sont utilisés. Cela permet de régler la tension de manière plus fine.
- Une résistance de 6,6 k Ω est mise en parallèle avec les résistances en série du générateur afin d'obtenir une durée de descente de 50 μ s.
- La résistance de sortie R_s est remplacée par une résistance à eau/sulfate de cuivre. La quantité de sulfate de cuivre est contrôlée jusqu'à l'obtention de la valeur souhaitée. Le temps de montée souhaitée (1,2 μ s) est obtenu avec la valeur R_s = 2,1 k Ω .

IV.2.3 Enregistrement du courant

Le système de mesure du courant est basé sur le même principe que celui décrit dans le Chapitre II (partie II.2.4). Le courant est mesuré par une résistance non inductive de 5 Ω en série avec la pointe. Cependant, pour mesurer correctement le courant transitoire dans les gaz,

une bande passante plus large (100 MHz) a été utilisée (dans les liquides elle était limitée à 35 MHz).

Le signal du courant est ensuite amplifié, converti et transmis par fibre optique à l'oscilloscope. Les signaux de courant et tension sont enregistrés à l'aide de l'oscilloscope Tektronix TDS544A à haute vitesse d'échantillonnage (250 Ms s⁻¹). Le système de transmission opto-électrique utilisé est bipolaire. Le courant obtenu peut avoir la polarité positive ou négative en fonction de la polarité de la tension appliquée.

IV.2.4 Enregistrement de l'image

Le système d'enregistrement de l'image est le même que celui décrit dans le chapitre II, partie II.2.5.

IV.2.5 Préparation des mélanges

Avant chaque essai, la cellule est vidée jusqu'à une pression d'environ 0,05 mbar grâce à une pompe primaire. Les mélanges sont ensuite préparés par la méthode des pressions partielles par voie manométrique, comme décrit dans le chapitre III, partie III.2.4.

Pour estimer la durée nécessaire pour obtenir l'homogénéité du mélange, nous pouvons appliquer la formule Eq. III.19. Avec une hauteur de cellule d'environ 50 cm, et la pression souhaitée de 3 bars, nous trouvons une durée $t \approx 0,2$ jour ≈ 5 h. Afin d'avoir une bonne homogénéité des mélanges, les essais sont effectués 12 à 16 heures après le remplissage.

Le CF₃I et ses mélanges sont caractérisés par la tension d'apparition de décharge partielle (VDP) et la tension de claquage (Vc). En champ non uniforme, VDP reflète le champ nécessaire pour générer une décharge alors que VC reflète le champ requis pour que cette décharge puisse traverser l'espace interélectrode.

IV.2.6 Mesure de la tension d'apparition de décharge (VDP)

Dans nos expériences, VDP est la tension minimale à laquelle une décharge est détectée soit par enregistrement d'images, soit par enregistrement de courant (Fig. IV-14). A chaque niveau de tension, 6 chocs de foudre sont appliqués à la pointe avec un temps de pause de 2 minutes entre 2 chocs successifs afin d'éviter l'influence des charges d'espace résiduelles. La tension est augmentée par palier de 4 kV si aucune décharge n'est détectée. La procédure continue jusqu'à l'apparition d'une décharge dans l'espace interélectrodes.

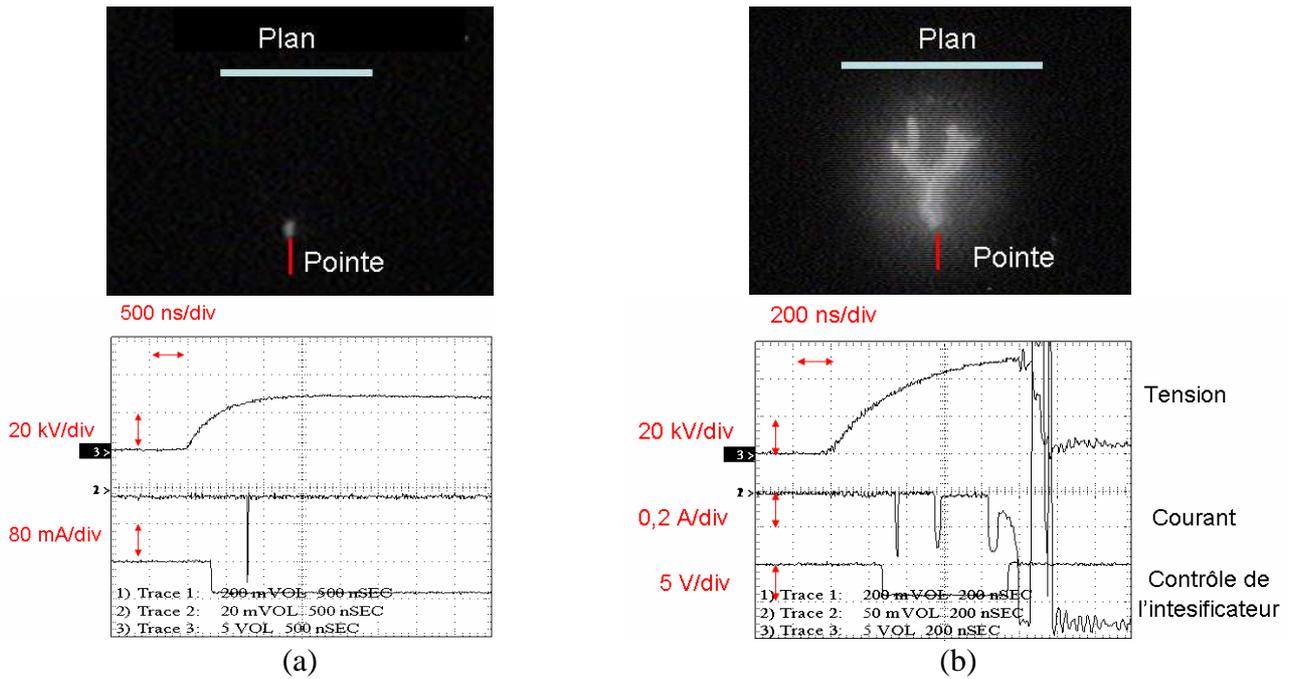


Fig. IV-14 Photographie et courant enregistrés (a) lors d'une décharge partielle dans le CF₃I à 1 bar et, (b) lors d'un claquage dans le CF₃I à 2,9 bars

IV.2.7 Mesure de la tension de claquage (V_c)

Quand une tension impulsionnelle est appliquée, la tension de claquage est une valeur statistique comme nous l'avons précédemment rappelé (la présence d'un électron germe n'est pas toujours assurée). La tenue diélectrique d'un gaz peut être présentée sous la forme de courbes de probabilité en fonction de la tension appliquée.

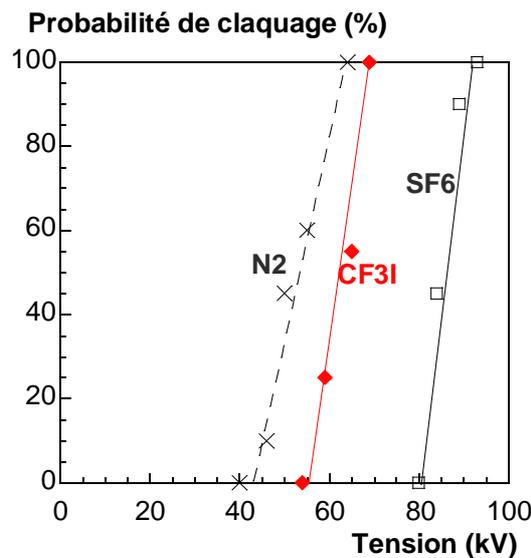


Fig. IV-15 Probabilité de claquage de N₂, CF₃I et SF₆, pression 1 bar, polarité positive

La probabilité de claquage, à chaque niveau de tension, est calculée sur 20 essais. La tension est augmentée par incrément de 6kV jusqu'à la valeur à 100% de claquage (V_{100} est la tension à laquelle tous les chocs appliqués à la pointe conduisent à un claquage). L'évolution de la probabilité de claquage en fonction de la tension pour N₂, CF₃I et SF₆ est présentée sur la Fig. IV-15. Pour les trois gaz, la probabilité de claquage varie rapidement de 0% à 100%. Ainsi, la tension de claquage à 50% V_{50} sera utilisée pour représenter la tenue diélectrique des gaz dans notre étude. Ces mesures étant réalisées avec une pointe fine, les tensions d'apparition de décharges sont nettement inférieures aux tensions de claquage. Par conséquent, comme pour les mesures réalisées dans les liquides la tension de claquage représente la tension nécessaire à la propagation de la décharge.

IV.3 Résultats obtenus en champ non uniforme

IV.3.1 Mélanges SF₆/N₂

La validité de notre approche expérimentale doit être établie en effectuant des essais avec le SF₆ et les mélanges SF₆/N₂ où de nombreux résultats ont été publiés. Les résultats, que nous avons obtenus, sont présentés sur la Fig. IV-16, avec des barres d'erreurs représentant l'incrément de tension entre deux paliers successifs. Ces résultats sont en bon accord avec ceux publiés avec des conditions expérimentales similaires.

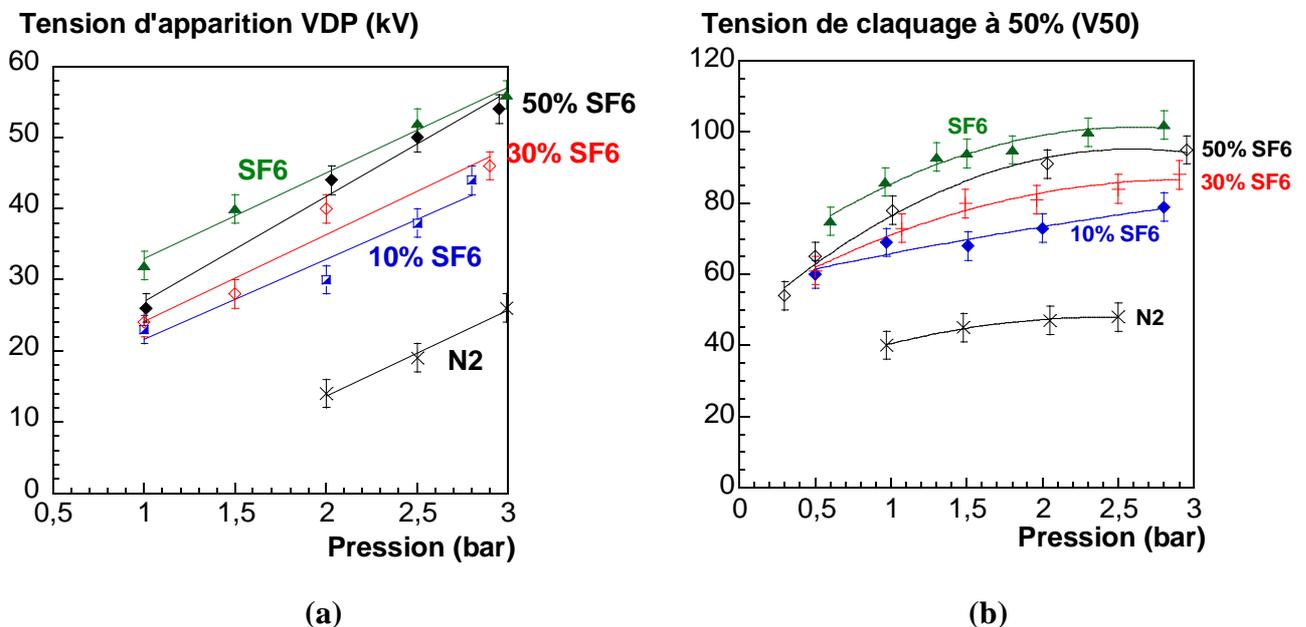


Fig. IV-16 Tension d'apparition de décharge partielle VDP (a) et tension de claquage V_c (b) de N₂, SF₆ et mélanges SF₆/N₂, les barres d'erreur représentent l'incrément de la tension, polarité positive

L'effet de synergie important pour une faible teneur en SF₆ peut être observé aussi bien sur V_{DP} que sur V_c . Par exemple, un mélange avec un taux de SF₆ de 10% a des valeurs de

V_{DP} et V_c nettement supérieures à celles du N₂ pur. Si le taux de SF₆ est ensuite augmenté de 10% à 30%, 50% ou 100%, V_{DP} et V_c continuent de s'améliorer mais avec un gain moins important. On peut donc remarquer que l'effet de synergie favorable des mélanges SF₆/N₂ est aussi important en champ divergent qu'en champ quasi homogène.

Les valeurs de V_{DP} et V_c obtenues sont proches de celles obtenues par N.Hayakawa et al [95], si on tient compte de la différence de distance entre les électrodes (30mm dans notre cas et 40mm dans le cas de N.Hayakawa).

IV.3.2 Comparaison CF₃I, SF₆ et N₂

Les tensions d'apparition de décharge partielle (V_{DP}) et de claquage (V_c) de CF₃I en polarités positive et négative sont présentées sur la Fig. IV-17 et Fig. IV-18. Les résultats obtenus avec SF₆ et N₂ sont également ajoutés pour comparaison. La tension V_{DP} varie linéairement avec la pression.

En polarité positive, V_{DP} de CF₃I est supérieure à celle du SF₆ pour des pressions inférieures à 1,5 bar. Quand la pression dépasse cette valeur, V_{DP} de CF₃I devient plus faible que celle du SF₆. En polarité négative, V_{DP} de CF₃I et de SF₆ sont très comparables dans tout le domaine de pression étudié. Dans les deux polarités, V_{DP} de CF₃I et SF₆ sont nettement supérieures à celles de N₂. Ces résultats sont en accord avec la tension de claquage des gaz obtenus en champ quasi homogène. En effet, en champ quasi homogène, le CF₃I et le SF₆ ont une tension de claquage comparable et bien supérieure à celle de N₂ ($V_c(\text{CF}_3\text{I}) \approx V_c(\text{SF}_6) \gg V_c(\text{N}_2)$). Ceci indique que le champ de génération E_g des décharges dans ces deux gaz doit avoir une valeur comparable soit $E_g(\text{CF}_3\text{I}) \approx E_g(\text{SF}_6) \gg E_g(\text{N}_2)$.

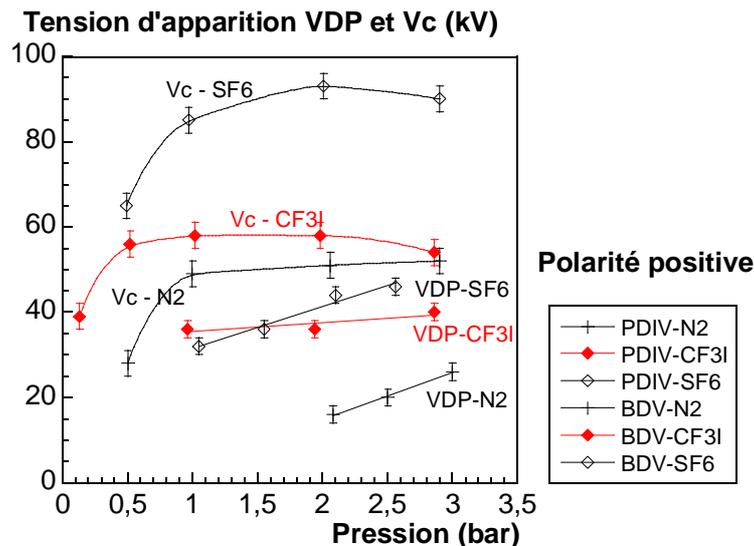


Fig. IV-17 Comparaison de la tension d'apparition de décharge et tension de claquage de CF₃I, SF₆ et N₂ en polarité positive

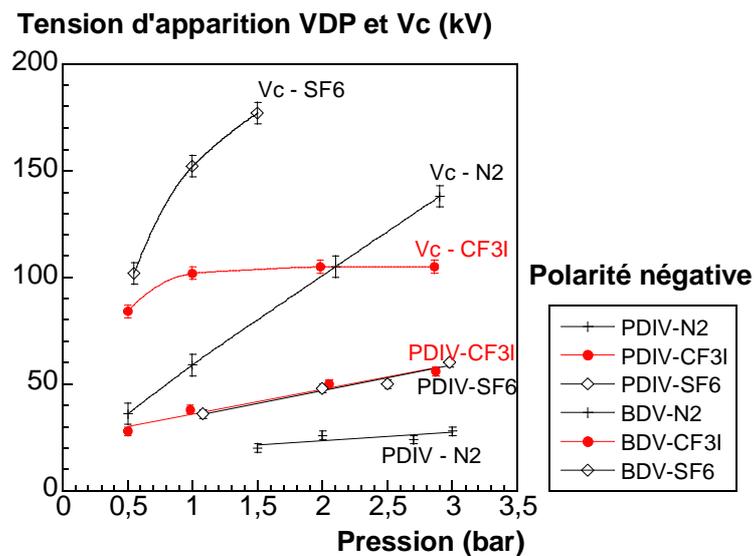


Fig. IV-18 Comparaison de la tension d'apparition de décharge et tension de claquage de CF_3I , SF_6 et N_2 en polarité négative

Contrairement à la tension d'apparition de décharge, la tension de claquage est très différente entre le CF_3I et le SF_6 . Les V_c de ces deux gaz sont relativement comparables uniquement à faible pression ($P < 0,5$ bar). Avec des pressions plus élevées, la tension V_c du SF_6 est bien supérieure à celle du CF_3I . En polarité positive, $V_c(CF_3I) \cong 70\% V_c(SF_6)$. En polarité négative, la différence est encore plus importante, $V_c(CF_3I) \cong 50-60\% V_c(SF_6)$. La différence entre les tensions de claquage du CF_3I et du SF_6 peut s'expliquer par la propagation facilitée des décharges dans le CF_3I par rapport au SF_6 comme cela a été montré par les mesures des temps de retard et des vitesses de propagation dans ces gaz [85][98]. Il est également remarquable de noter, qu'en polarité négative, $V_c(N_2)$ varie linéairement avec la pression et, que pour une pression supérieure à 2 bars, $V_c(N_2) > V_c(CF_3I)$.

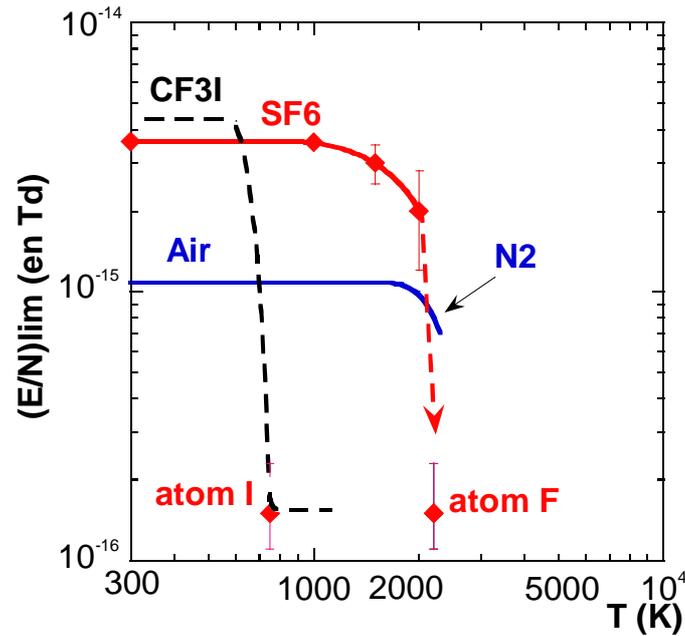


Fig. IV-19 : $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$ en fonction de la température pour SF_6 , air [90] et CF_3I (température de décomposition de CF_3I provient de [100] et $\left(\frac{E}{N}\right)_{\text{lim}}$ de l'iode est supposé égal à celui du fluor)

Si on utilise les résultats largement commentés de la propagation des décharges dans le SF_6 en champ divergent qui s'explique par l'apparition d'un mécanisme de leader, nous pouvons envisager que la transition streamer/leader apparaît avec des conditions différentes entre ces deux gaz. Il semble qu'un leader se produit plus facilement dans le CF_3I que dans le SF_6 . Avec la même distance interélectrodes, la transition streamer/leader est observée à une tension plus basse que dans le SF_6 . Ceci peut correspondre au fait que la formation d'iode (I) est beaucoup plus facile que celle de fluor (F) dans le SF_6 .

En effet, le mécanisme de leader met en jeu une élévation importante de température qui induit une formation de fluor (effet thermique) par la décomposition du SF_6 . Niemeyer et Pinnekamp [100] ont estimé qu'à une température supérieure à 2000K, le SF_6 est entièrement décomposé en fluor atomique et en soufre. Comme le champ critique associé au fluor est environ 100-200 fois plus faible que celui du SF_6 , les conditions d'ionisation dans le canal de décharge sont ainsi fortement abaissées.

Le même scénario peut s'appliquer au CF_3I , mais, dans ce cas, comme la stabilité (thermique, impact d'électrons) de ce composé est bien plus faible que celle du SF_6 , la formation d'iode comme nous l'avons observé est facile. Comme expliqué dans la Fig. IV-19, le champ critique du CF_3I est supérieur à celui du SF_6 à température ambiante mais il est entièrement décomposé pour former de l'iode atomique à une température $>700\text{K}$ [100].

Comme la température de décomposition du CF₃I est bien plus faible que celle du SF₆ et que le champ critique de l'iode doit être encore plus faible que celui du fluor, la propagation du canal de décharge sera encore plus facile que dans le SF₆. D'où les résultats obtenus. Des expériences supplémentaires sont cependant nécessaires afin de mieux quantifier ces phénomènes de propagation dans le CF₃I.

Pour tous les gaz, V_c en polarité négative est beaucoup plus élevée qu'en polarité positive. Ce phénomène est le plus souvent observé dans les gaz en configuration pointe/plan. Il est expliqué par l'influence différente de la charge d'espace en fonction de la polarité de la tension appliquée sur la pointe (voir IV.1.1.3).

IV.3.3 Résultats obtenus avec les mélanges CF₃I/N₂

La tension d'apparition des décharges partielles pour des mélanges CF₃I/N₂ est présentée sur la Fig. IV-20. La V_{DP} de tous les mélanges augmente linéairement avec la pression. Par ailleurs, V_{DP} augmente également avec le taux de CF₃I dans le mélange. Cette augmentation de V_{DP} avec la teneur en CF₃I est conforme à l'augmentation du champ critique des mélanges, qui augmente avec le taux de CF₃I (voir chapitre III).

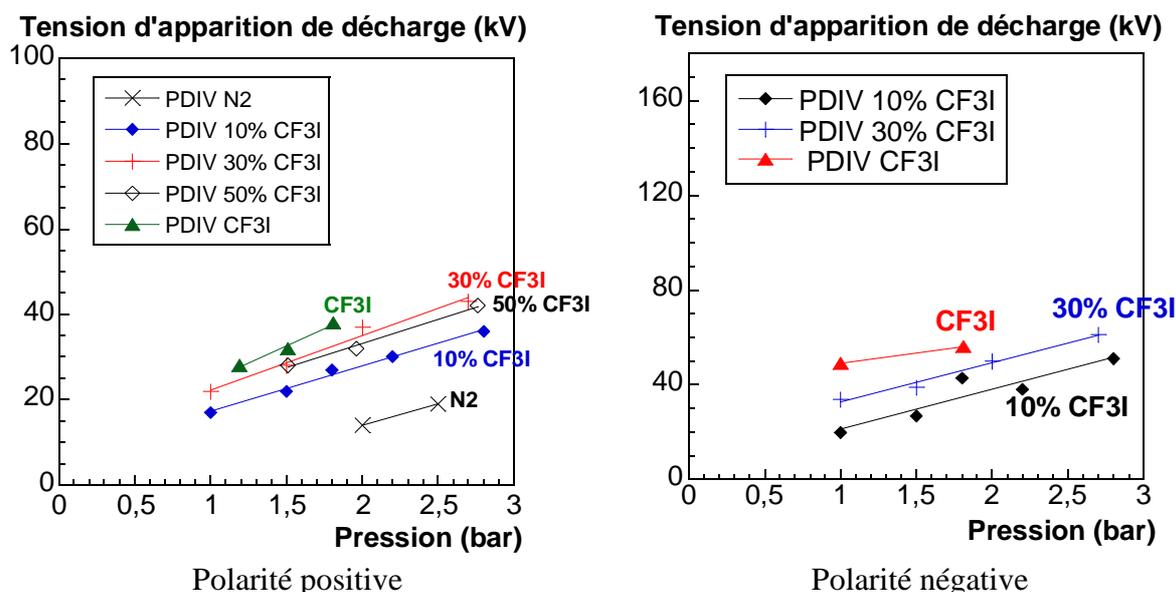


Fig. IV-20 Comparaison de la tension d'apparition de décharge partielle de mélanges CF₃I/N₂ en polarité positive (a) et polarité négative (b)

Les tensions de claquage des mélanges CF₃I/N₂ sont présentées sur la Fig. IV-21 et la Fig. IV-22. Dans les deux polarités, la corrélation entre la tension de claquage et le taux de CF₃I n'est observée qu'à faible pression (<0,5 bar). Aux pressions plus élevées, les mélanges CF₃I/N₂ peuvent présenter une tension de claquage plus élevée que celle du CF₃I pur.

Ce phénomène très étonnant, validé par plusieurs séries de mesures, est observé notamment en polarité positive de la pointe. En polarité positive (Fig. IV-21), le mélange 1%

CF₃I dans N₂ a une tension de claquage nettement plus élevée que celle du CF₃I pur et de N₂ pur. A une pression de 3 bars, V_c du mélange 1% CF₃I/N₂ est d'environ 80kV, alors que les valeurs de CF₃I et N₂ sont d'environ 50 kV et 42 kV respectivement. Par ailleurs, l'augmentation du taux de CF₃I dans le mélange conduit à un abaissement de V_c. Par exemple, à 3 bars, le mélange 50% CF₃I/N₂ a une tension de claquage d'environ 70 kV, à comparer à 80kV pour le mélange 1% CF₃I/N₂ et 50kV pour le CF₃I pur.

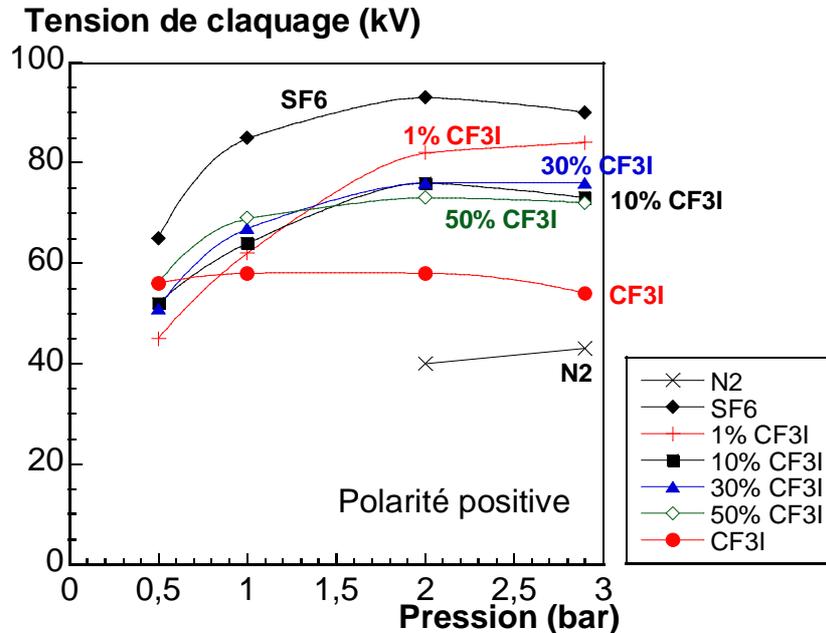


Fig. IV-21 Comparaison de la tension de claquage de mélanges CF₃I/N₂ en polarité positive

En polarité négative, l'effet est moins remarquable (Fig. IV-22). Comme en polarité positive, V_c est corrélé avec le taux de CF₃I à faible pression (<0,5 bar). Avec l'augmentation de la pression, V_c(CF₃I) < V_c des mélanges CF₃I/N₂. Cependant, jusqu'à 3 bars, l'écart entre V_c(CF₃I) et celui des mélanges n'est pas très évident. A 3 bars, les mélanges 1%, 10% et 30% CF₃I/N₂ ont pratiquement la même valeur pour V_c, celle-ci étant sensiblement plus élevée que la valeur V_c de CF₃I pur. Notons que V_c(N₂) à 3 bars est bien supérieur au V_c de CF₃I pur et de ses mélanges.

Ainsi, l'avantage des mélanges CF₃I/N₂ n'est significatif qu'en polarité positive. Mais comme la tension de claquage en champ divergent est pratiquement toujours plus faible en polarité positive qu'en polarité négative, c'est le comportement sous tension positive qui est le phénomène dominant et donc le paramètre dimensionnant. Les mélanges CF₃I/N₂ sont donc plus performants que le CF₃I pur pour une isolation haute tension en condition de champ très divergent sous tension impulsionnelle selon ce paramètre.

Enfin, il faut remarquer que tous ces résultats en champ très divergent pour le CF₃I pur et ses mélanges sont toujours bien inférieurs à ceux du SF₆ de même qu'à ceux de ses mélanges.

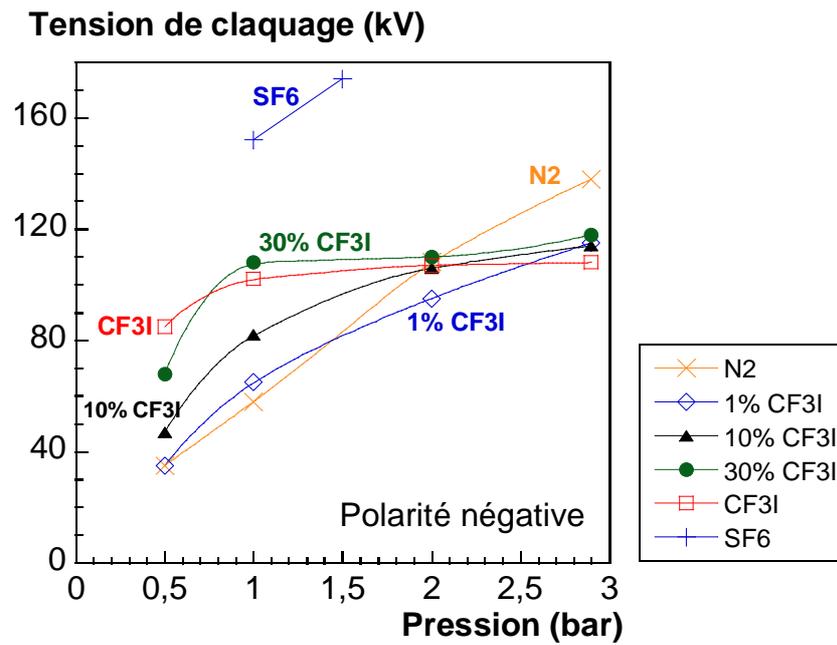


Fig. IV-22 Comparaison de la tension de claquage de mélanges CF_3I/N_2 en polarité négative

IV.3.4 Produit de décomposition

Comme dans la configuration d'électrodes sphère/sphère, des particules solides sont observées après plusieurs claquages dans le CF_3I , ces particules se déposant notamment sur le plan. La Fig. IV-23.a est l'image du plan avec les solides déposés (couche noire sur la figure), alors que la Fig. IV-23.b montre l'électrode après nettoyage. La nature de ces particules a été attribuée à l'iode.

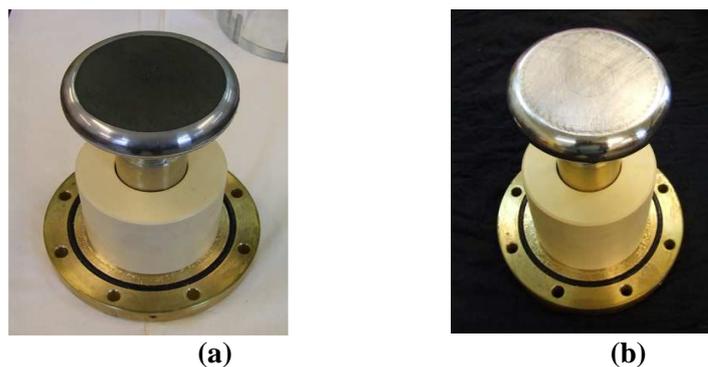


Fig. IV-23 Produits de décomposition accumulés sur le plan après des décharges dans le CF_3I (a) et l'état initial (b)

IV.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats des mesures des tensions d'apparition des décharges (V_{DP}) et des tensions de claquage (V_c) du CF₃I et de ses mélanges avec N₂. Les résultats ont été obtenus en condition de champ très divergent entre une pointe et un plan, avec un choc de foudre normalisé appliqué à la pointe. Les expériences avec du SF₆ et des mélanges SF₆/N₂ ont été également effectuées afin de valider nos méthodes expérimentales.

Les résultats obtenus avec le SF₆ et les mélanges SF₆/N₂ sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature. Comme en champ quasi-uniforme, l'effet de synergie favorable apparaissant dans les mélanges SF₆/N₂ est toujours observé en champ très divergent.

Dans le chapitre III, nous avons montré que, en champ quasi uniforme, le CF₃I a une tenue diélectrique comparable à celle du SF₆. Quand la distribution de champ est fortement non homogène, sa tenue diélectrique devient remarquablement plus faible que celle du SF₆ avec les deux polarités de la tension. Cette différence peut s'expliquer par l'apparition plus facile des décharges leaders dans le CF₃I que dans le SF₆ en raison de la faible température de décomposition du CF₃I. A une température supérieure à 700K, le CF₃I se décompose pour former l'iode atomique. Comme le champ critique associé à l'iode doit être environ 100-200 fois plus faible que celui du CF₃I pur, les conditions d'ionisation dans le canal de décharge sont fortement abaissées. Rappelons que le même scénario peut être envisagé pour le SF₆ mais à une température beaucoup plus élevée ($\geq 2000K$).

La tension d'apparition des décharges partielles dans les mélanges CF₃I/N₂ est bien corrélée au taux de CF₃I. L'augmentation du taux de CF₃I entraîne une amélioration de la tension d'apparition de ces décharges. Dans les applications, les décharges partielles seront réduites ou même supprimées en augmentant au maximum la teneur en CF₃I dans le mélange.

Pour nos mesures en champ divergent, la tenue diélectrique des mélanges CF₃I/N₂ n'augmente avec le taux de CF₃I que pour des pressions inférieures à environ 0,5 bar. Lorsque la pression devient supérieure à 1 bar, il n'y a plus de corrélation entre la tenue diélectrique et le taux de CF₃I dans le mélange. Les mélanges CF₃I/N₂ présentent souvent une tenue diélectrique plus élevée que celle du CF₃I pur. Par ailleurs, en polarité positive, le mélange avec le taux le plus faible de CF₃I (1%) montre la tenue diélectrique la plus élevée à la pression de 3 bars. Les mélanges 10%, 30% et 50% de CF₃I dans N₂ ont une tenue diélectrique assez comparable.

Cette anomalie doit être liée à la formation de l'iode atomique lors de la décharge dans le CF₃I. Comme discuté précédemment, le champ critique de l'iode est faible et ce dernier facilite la formation et la propagation du canal de décharge leader dans le CF₃I ainsi que dans les mélanges CF₃I/N₂. On remarque que cet effet est réduit lorsque la teneur en N₂ dans le

mélange devient très importante. Pour mieux comprendre ce phénomène, plusieurs études sont envisageables, par exemple les mesures de spectroscopie d'émission de la décharge.

L'effet est surtout évident avec la polarité positive de la pointe. Il s'agit d'un point très favorable pour ces mélanges par rapport au CF₃I au point de vue des applications. Ces mélanges permettent de réduire la distance entre les électrodes tout en conservant la même valeur de la tension de tenue par rapport au CF₃I pur. Pour les dispositifs en haute tension, où la condition de champ non uniforme est inévitable, les mélanges CF₃I/N₂ doivent permettre d'améliorer les performances diélectriques de l'appareillage par rapport au CF₃I pur. Le taux de CF₃I doit être cependant optimisé afin de satisfaire les contraintes liées à la tenue diélectrique, aux décharges partielles ainsi qu'à la température de liquéfaction. Des expériences supplémentaires avec un disjoncteur industriel de type CBR sont envisagées afin de valider ce point.

Chapitre V Validation des systèmes d'isolation

Dans les chapitres II, III, IV, nous avons étudié la performance d'isolation de liquides biodégradables, du CF_3I et des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en utilisant des configurations d'électrodes sphère/sphère (champ quasi-uniforme) et pointe/plan (champ divergent). Dans un système d'isolation réel, la distribution de champ est située entre ces deux cas limites avec une distribution de champ non homogène et plusieurs régions présentant un renforcement local du champ. La distribution de champ autour d'une ampoule à vide est représentative de cette complexité (voir le chapitre I). Par ailleurs, la présence d'isolants solides peut modifier la distribution de champ et de charge d'espace dans le système. Par exemple, dans le cas de l'isolation d'une ampoule à vide, une décharge électrique peut se propager le long de la surface de l'enveloppe en céramique de l'ampoule, et cette propagation peut être différente de celle observée dans la configuration pointe/plan. Aussi dans ce chapitre, nous allons étudier la tenue diélectrique des esters liquides et des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ dans des conditions proches de celles des appareillages réels.

V.1 Isolation d'une ampoule à vide par les liquides

V.1.1 Cellule d'essai

Pour tester le liquide pour l'isolation d'une ampoule à vide, une cellule dont le principe est décrit dans la Fig. V-1 a été fabriquée. L'ampoule à vide de type VG2, fabriquée par Areva T&D est placée dans une cellule étanche en PMMA. Le diamètre intérieur, extérieur et la hauteur du tube sont respectivement de 94mm, 100mm et 50cm. Les contacts dans l'ampoule sont maintenus en position ouverte par une vis de fixation reliée au contact mobile de l'ampoule. Les deux pièces en laiton qui sont fixées aux deux extrémités du tube en PMMA, permettent de maintenir l'étanchéité de la cellule.

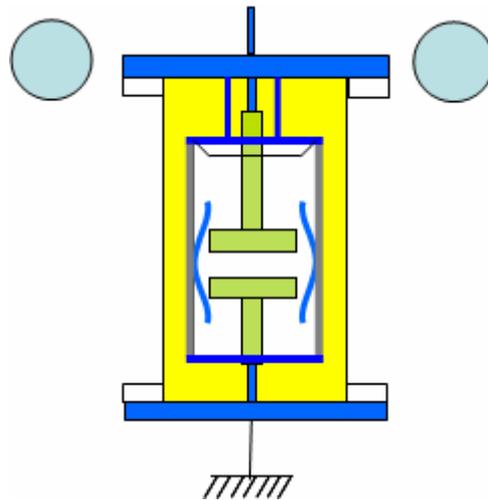


Fig. V-1 Cellule pour tester l'isolation d'une ampoule à vide par les liquides

Le contact mobile de l'ampoule est connecté à la haute tension et le contact fixe est connecté à la masse. Un tore métallique (en aluminium) est ajouté pour réduire le risque de décharge dans l'air à l'extérieur de la cellule. Une photo de la cellule est montrée dans la Fig. V-2.



Fig. V-2 Photo de la cellule

La distribution de champ autour de l'ampoule à vide a été étudiée dans le chapitre I. Le chemin AB a été identifié comme le chemin critique de propagation des décharges. Pour conduire à un claquage, une décharge générée dans la région A ou B doit traverser le chemin AB avec une distribution de champ très homogène au long de celui-ci (Fig. V-4).

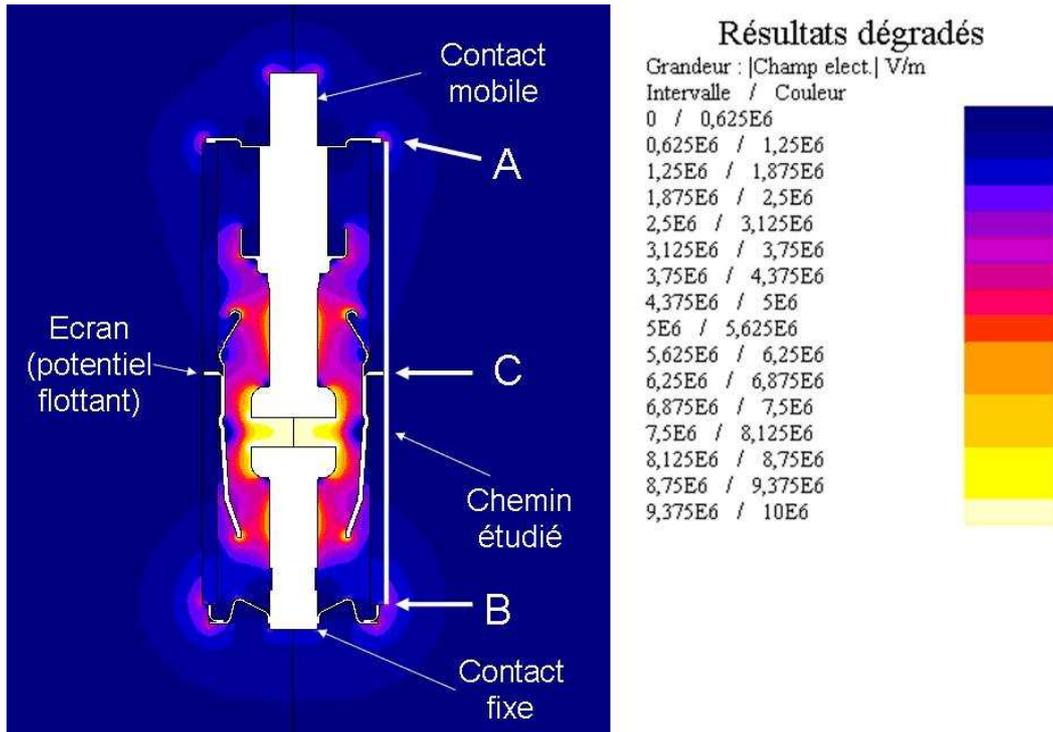


Fig. V-3 Distribution de champ dans la cellule

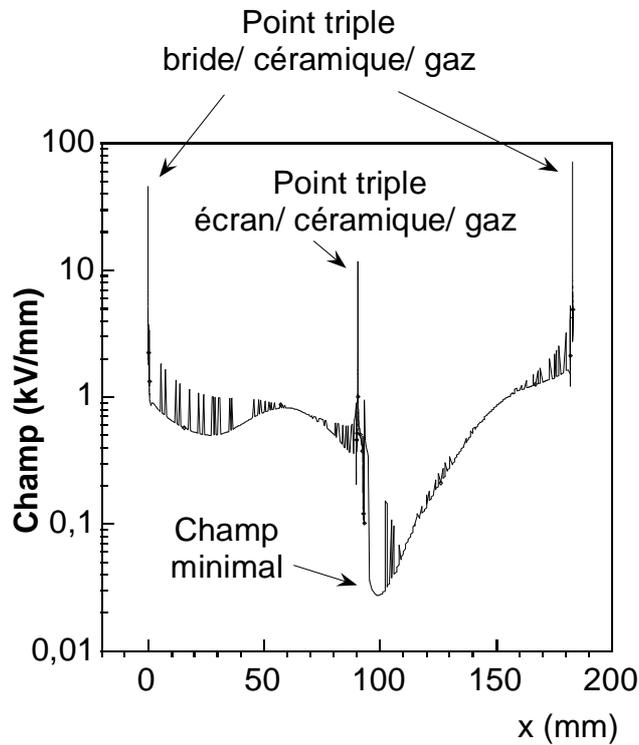


Fig. V-4 Distribution de champ le long du chemin critique AB

V.1.2 Cahier des charges imposé

Le Tab. V-1 présente le cahier des charges imposé pour cette application (voir chapitre I). L'ampoule à vide VG2 est conçue pour une tension nominale de 24 kV. Cependant, il est requis que le système d'isolation puisse supporter de fortes surtensions, soit 80 kV sous tension alternative pendant 1mn et 170 kV en choc de foudre normalisé (positif et négatif). Selon les données fournies par Areva T&D, l'ampoule à vide est capable de tenir ces niveaux de tension sans claquage dans le vide entre les deux contacts.

Tab. V-1: Rappel du cahier de charge

Tension nominale	24 kV
Surtension en 50Hz	80 kV efficace pendant 1 mn
Tenue aux chocs de foudre normalisés (1,2/50 μ s)	170 kV crête
Décharges partielles	< 10 pC à tension 27 kV

V.1.3 Procédure d'essais

Les procédures d'essais appliquées sont conformes à la norme CEI60060-1 « Techniques des essais á haute tension Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais » [99].

- Tension alternative : la tension est augmentée de 0 à 80 kV, puis maintenu à 80 kV pendant 60 secondes. En cas de claquage, la tension est coupée rapidement à l'aide d'une boucle de détection du courant. Le test est réussi s'il n'y a pas de claquage pendant la durée d'une mn.
- Tension choc de foudre : quinze chocs successifs sont appliqués pour chaque polarité de la tension. Le test est réussi s'il n'y a pas plus de deux claquages pendant la série des chocs.
- Mesure des décharges partielles sous tension alternative : Les décharges partielles sont mesurées à 27 kV efficace (1,1 fois la tension nominale).

V.1.4 Résultats de validation

La cellule est remplie avec l'ester naturel Cooper FR3. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tab. V-2.

Tab. V-2: Résultats de test avec l'ester naturel FR3

Tenue en tension alternative 80kV Rms	Aucun claquage à 80 kV pendant 1 minute
Choc de foudre positif 170 kV	0 claquage sur série de 15
Choc de foudre négatif 170 kV	0 claquage sur série de 15
Décharge partielle à 27 kV	Non détectée (seul de bruit 0,1pC)

Nous pouvons constater que l'isolation par l'ester naturel FR3 satisfait parfaitement le cahier des charges imposé. Notons que ce cahier des charges est également satisfait en utilisant l'air à la pression atmosphérique pour l'isolation extérieure de l'ampoule. Les résultats sont rassemblés dans le Tab. V-3.

Il est à noter que le cahier des charges initialement défini (Tab. V-1) est basé sur les normes CEI pour isolation d'un appareillage de tension nominale 24 kV. Il s'agit d'une norme minimale. En réalité, le client utilisateur peut demander des contraintes beaucoup plus sévères que celles définies par les normes CEI. Par exemple, pour les disjoncteurs 24 kV, le client SNCF exige une tenue au choc de foudre de 250 kV, alors que la norme CEI 62271 – 100 ne demande que 145 kV.

Le Tab. V-3 montre aussi que les contraintes pour l'isolation externe d'une ampoule à vide VG2 ne sont pas trop élevées et l'air simple peut aussi être une option pour le remplacement du SF₆. En effet, Areva T&D a réussi à utiliser l'air à pression atmosphérique comme isolation externe de l'ampoule à vide pour certaines gammes de disjoncteur, en ajoutant un ou plusieurs joints en matériaux isolants solides autour de l'ampoule [101]. Ces joints jouent le rôle des « barrières » pour empêcher la propagation de décharges et permettent ainsi d'améliorer la tenue diélectrique.

Tab. V-3: Résultats des tests avec l'air

Tenue en tension alternative 80kV rms	Aucun claquage à 80 kV pendant 1 mn
Choc de foudre positif à 170 kV	1 claquage sur une série de 15 chocs
Choc de foudre négatif à 170 kV	0 claquage sur une série de 15 chocs

V.2 Isolation extérieure du disjoncteur par des mélanges CF₃I/N₂

La fonction d'isolation des mélanges CF₃I/N₂ a été testée à l'aide d'une maquette de disjoncteur de type CBR, fabriquée par Areva T&D. Il s'agit d'un disjoncteur monophasé de tension nominale 24 kV, dont le principal client est la SNCF pour le réseau ferroviaire. La

coupure du courant s'effectue dans l'ampoule à vide et l'isolation extérieure est actuellement assurée par le SF₆.

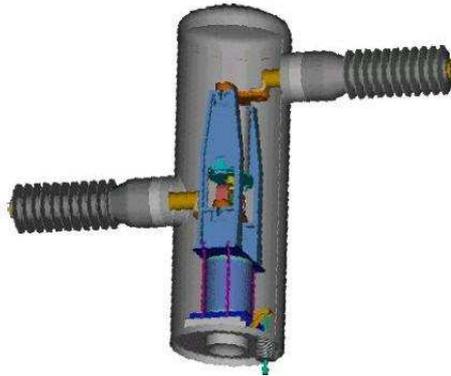


Fig. V-5 Disjoncteur CBR

Tab. V-4: Données techniques du disjoncteur CBR isolé dans SF₆ sous 1,5 bar

Données techniques	Unité	
Tension assignée	kV efficace	27,5
Courant assigné	A	2000
Tenue aux chocs de foudre normalisé	kV crête	250
Tenue à la surtension en AC	kV efficace	95
Fréquence	Hz	50 ou 60
Séquence d'opération		0 – 0,3s – CO – 15s – CO
Courant admissible assigné (courte durée)	kA efficace	25
Valeur crête du courant admissible assigné	kA	65
Durée de court-circuit	s	3
Gaz d'isolation		SF ₆
Pression du SF ₆ (20°C)		
Pression nominale	bar	1,5
Pression minimal	bar	1,3
Alarme (fuite de SF ₆)	bar	1,3
Masse du SF ₆ à pression nominale	kg	1,04

Les données techniques du disjoncteur CBR sont détaillées dans le Tab. V-4. Avec une isolation au SF₆ sous une pression de 1,5 bars, le disjoncteur est capable de supporter une tension alternative de 95kV pendant 1 minute et des chocs de foudre normalisés de 250 kV.

V.2.1 Cahier des charges imposé

Pour la gamme de tension nominale 24 kV, la norme CEI62271-100 [102] exige que l'appareillage soit capable de supporter une surtension de 60 kV pendant une durée de 60 secondes. Face aux chocs de foudre, il est imposé que l'appareillage soit capable de supporter 145 kV dans les deux polarités avec des ondes de chocs normalisées.

Certains clients exigent parfois des tenues diélectriques plus élevées que celles imposées par les normes CEI. Dans le cas du disjoncteur CBR, le client SNCF demande une tenue diélectrique en alternatif de 95 kV (pendant 1mn) et de 250 kV pour des chocs de foudre normalisés.

Dans cette partie, nous allons vérifier le niveau d'isolement atteint avec des mélanges CF₃I/N₂. Pour l'application disjoncteur CBR, il est souhaité par AREVA que le système d'isolation puisse supporter 95 kV AC pendant 1mn et 200 kV en choc de foudre normalisé.

Tab. V-5 Cahiers des charges du disjoncteur CBR

	AC 50 Hz	Choc de foudre 1,2 /50
CEI (62271-100)	60 kV	145 kV
Areva	95 kV	200 kV

V.2.2 Procédure d'essais

La procédure utilisée est conforme à la norme CEI60060-1 « Techniques des essais en haute tension Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais » [99] (c.f V.1.3).



Fig. V-6 Vue d'ensemble du banc d'essai

Les mélanges de gaz sont effectués par la méthode des pressions partielles par voie manométrique (c.f III.2.4). Le CF_3I est introduit en premier dans le CBR sous la pression P_1 , puis l'azote est ajouté pour obtenir une pression finale P . Le taux de CF_3I dans le mélange est donc donné par :

$$\tau = \frac{P_1}{P} \quad \text{Eq. V.1}$$

Dans ce chapitre, nous allons vérifier les performances diélectriques des mélanges à 30%, 20%, 10% et 5% de CF_3I dans N_2 .

Pour l'application disjoncteur CBR, la pression maximale autorisée est de 1,8 bars. En effet, la partie la plus sensible à la pression est le soufflet métallique situé sur le contact mobile de l'ampoule à vide (son rôle est d'assurer le déplacement du contact mobile tout en maintenant l'étanchéité de l'ampoule). Ainsi, la pression ne doit pas dépasser 1,8 bars pour ne pas casser ce soufflet métallique. Les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ seront testés à deux pressions soit 1,7 et 1,5 bars. La durée nécessaire pour obtenir l'homogénéité du mélange est calculée avec l'Eq. III.19 (chapitre III). Avec la pression de 1,7 bars et une hauteur de cellule de 1m, nous obtenons : $t \approx 11$ h.

V.2.3 Résultats des tests

Les résultats sont présentés dans le tableau Tab. V-6. Les tests ont été faits avec des mélanges à 30%, 20%, 10% et 5% de CF_3I dans N_2 mais également avec du N_2 pur et du SF_6 pur, pour comparaison. Pour éviter la formation des particules d'iode, les tests sous tension alternative sont stoppés à la tension de 95 kV.

Tab. V-6: Résultat des essais

		1,7 bars	1,5 bars
30% CF ₃ I	AC 50 Hz	95	95
	Choc 1,2/50 µs positif	215	190
	Choc 1,2/50 µs négatif	240	210
20% CF ₃ I	AC 50 Hz	95	95
	Choc 1,2/50 µs positif	190	175
	Choc 1,2/50 µs négatif	230	210
10% CF ₃ I	AC 50 Hz	95	
	Choc 1,2/50 µs positif	170	
	Choc 1,2/50 µs négatif	200	
5% CF ₃ I	AC 50 Hz	95	
	Choc 1,2/50 µs positif	165	
	Choc 1,2/50 µs négatif	190	
N ₂	AC 50 Hz	80	
	Choc 1,2/50 µs positif	140	
	Choc 1,2/50 µs négatif	160	
SF ₆	AC 50 Hz	95	
	Choc 1,2/50 µs positif	250	
	Choc 1,2/50 µs négatif	250	

Les résultats précédents permettent de conclure sur le comportement des mélanges en fonction des deux cahiers des charges décrits précédemment. Nous pouvons constater que, comme le SF₆ à 1,7 bars, tous les mélanges CF₃I/N₂ à cette même pression satisfont la condition de tenue à 95 kV en alternatif. Par contre en choc de foudre, seul le mélange à 30% de CF₃I satisfait la contrainte la plus élevée soit 200kV dans les deux polarités. Les mélanges CF₃I/N₂ avec un taux de 10 et 20% de CF₃I satisfont la condition de tenue au choc de foudre négatif mais ne la satisfont pas avec un choc de foudre positif. On vérifie ici que la tenue diélectrique face au choc de foudre positif est bien le paramètre dimensionnant.

Le coefficient de sécurité de la tenue diélectrique face au choc de foudre positif peut être calculé par la formule suivante

$$\eta = \frac{V_{mesuré}}{V_{souhaité}} \quad \text{Eq. V.2}$$

Où :

η : coefficient de sécurité

$V_{mesuré}$: Tension de claquage mesuré

$V_{souhaité}$: Tension de claquage exigée par la norme CEI ou par Areva T&D

Rappelons que la tenue exigée par la norme CEI62271-100 est de 145 kV et celle souhaitée par Areva T&D est de 200 kV. Un coefficient supérieur à 1 signifie que la tenue demandée est satisfaite.

Tab. V-7: Coefficient de sécurité de tenue au choc de foudre positif (par rapport à la norme CEI et à la valeur demandée par Areva)

Mélange	Cahier de charge	Pression 1,7 bar		Pression 1,5 bar	
		Coef. sécurité	Temp. Liquéfac.	Coef. sécurité	Temp. Liquéfac.
30% CF ₃ I	CEI	1,48	-38°C	1,31	-40°C
	Areva	1,08		0,95	
20% CF ₃ I	CEI	1,31	-46°C	1,21	-49°C
	Areva	0,95		0,88	
10% CF ₃ I	CEI	1,17	-59°C		-67°C
	Areva	0,85			
5% CF ₃ I	CEI	1,14	<-70°C		<-70°C
	Areva	0,83			
N ₂	CEI	0,97			
	Areva	0,70			
SF ₆	CEI	1,72			
	Areva	1,25			

Nous pouvons constater que la performance diélectrique des mélanges s'améliore avec le pourcentage de CF₃I. L'isolation par N₂ est déjà proche de la contrainte CEI (avec un coefficient de sécurité de 0,97). Ceci montre que dans ce type d'application en moyenne tension, les contraintes diélectriques sont relativement faibles, très inférieures à celles que l'on peut trouver dans des applications comparables en très haute tension.

L'ajout de 5% de CF_3I dans N_2 permet d'améliorer le coefficient de sécurité de 0,97 à 1,14. Le mélange 30% CF_3I dans N_2 sous 1,7 bars a un coefficient de sécurité de 1,48 par rapport à la norme CEI et de seulement 1,08 par rapport à la condition définie dans le cahier des charges d'Areva. Nous notons également que pour la même pression appliquée (1,7bars), le SF_6 présente les meilleures caractéristiques d'isolation.

Cependant, l'addition de CF_3I dans un mélange augmente aussi la température de liquéfaction de ce dernier. Un mélange 30% de CF_3I à pression 1,7 bar satisfait la tenue au choc de foudre normalisé à 200 kV mais celui-ci se liquéfie à -38°C . Par conséquent, il ne satisfait pas la condition requise pour l'application à l'extérieur (fonctionnement à -40°C). Ce mélange peut par contre être utilisé pour des applications à l'intérieur (fonctionnement à -25°C).

V.2.4 Influence du taux de CF_3I dans le mélange

Dans le cas du disjoncteur CBR, la tenue diélectrique des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ augmente avec le taux de CF_3I . L'évolution de la tenue diélectrique en fonction du taux de CF_3I est présentée dans la Fig. V-7. L'addition de 30% de CF_3I permet d'obtenir une tension de claquage de 215 kV par rapport à 140 kV pour N_2 pur. La variation de V_c mesurée dans le disjoncteur montre une variation proche (la pente est cependant plus faible) de celle estimée à partir des variations de $(E/P)_{\text{lim}}$ en fonction du pourcentage de CF_3I en champ quasi-uniforme (Fig. III-12). Elle ne correspond pas du tout à celle observée en champ divergent où l'effet de la teneur en CF_3I est très faible (Fig. IV-22).

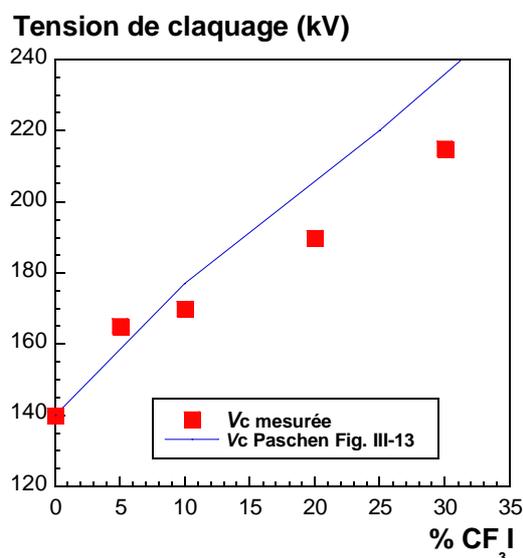


Fig. V-7 Influence du pourcentage de CF_3I sur la tenue au choc de foudre positif du disjoncteur CBR et variation calculée à partir de nos mesures de V_c en champ uniforme (voir Fig. III-12).

En effet, en configuration pointe/plan la tenue diélectrique des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ n'a pas de relation simple avec le taux de CF_3I : un mélange 10% $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ possède une tenue

diélectrique supérieure à celle d'un mélange 30% $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ (Fig. IV-22). Cet effet n'est pas retrouvé dans le cas de l'isolation d'une ampoule à vide, malgré une distribution de champ très non homogène autour de l'ampoule (sur le chemin AB). La tenue diélectrique du disjoncteur réel suit à un coefficient près (e.g. 0,85 pour 30% de CF_3I) les valeurs attendues à partir de notre courbe de Paschen expérimentale, mesurée en champ quasi-uniforme.

Cela peut en partie s'expliquer par la présence de l'isolation solide, qui peut accumuler de la charge en surface et donc modifier la répartition du champ calculée en l'absence de cette charge. Très récemment (en 2010), T.Takeda [103] a étudié la propagation de décharges dans des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ le long de la surface d'un diélectrique (résine acrylique ou PTFE). Une décharge peut être générée au point de contact entre le gaz, le diélectrique et le métal (point triple), puis se propager au long de cette surface isolante.

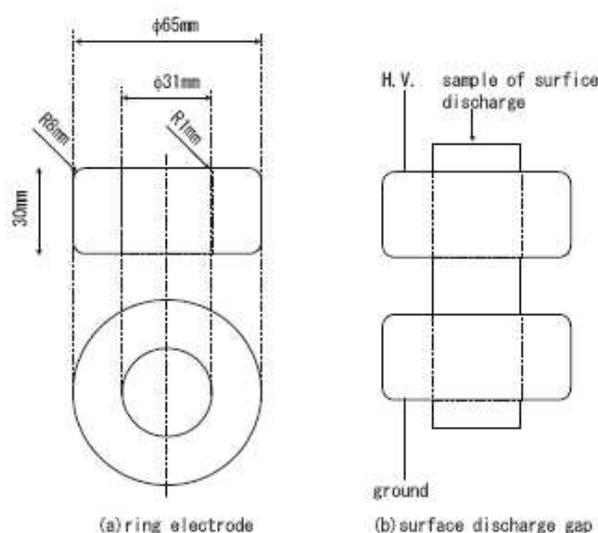


Fig. V-8 Configuration d'électrodes pour étudier la propagation de décharges sur la surface du diélectrique [103]

La tension de claquage minimale en fonction du pourcentage de CF_3I est montrée sur la Fig. V-9. Quand le taux de CF_3I dans le mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ est faible, l'addition de CF_3I améliore nettement la tension de claquage des mélanges alors que l'effet est moins important quand le taux de CF_3I devient assez important ($\approx 40\%$ avec des impulsions et $\approx 10\%$ avec une tension AC 50 Hz). Avec la tension impulsionnelle, la tension de claquage est pratiquement indépendante du pourcentage de CF_3I lorsqu'il varie de 40 à 80%. Un effet de synergie est donc observé dans ce cas alors qu'il est absent dans le cas sans isolation solide [65]. Rappelons que sans le diélectrique solide, la tenue diélectrique de mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ varie linéairement avec le taux de CF_3I [65].

Nous pouvons constater que la présence de la surface du solide isolant modifie le comportement de la propagation dans les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ mais on retrouve bien une influence de la teneur en CF_3I (en moyenne V_c augmente avec la teneur en CF_3I) sur la

tension de claquage le long d'une surface isolante. Ce comportement est intermédiaire entre le claquage observé en champ quasi-uniforme et celui obtenue en champ divergent. Cela permet d'expliquer que nos résultats avec le disjoncteur ne peuvent pas être extrapolés du comportement des mélanges en champ divergent sous tension impulsionnelle mais plutôt de celui observé en champ quasi-uniforme.

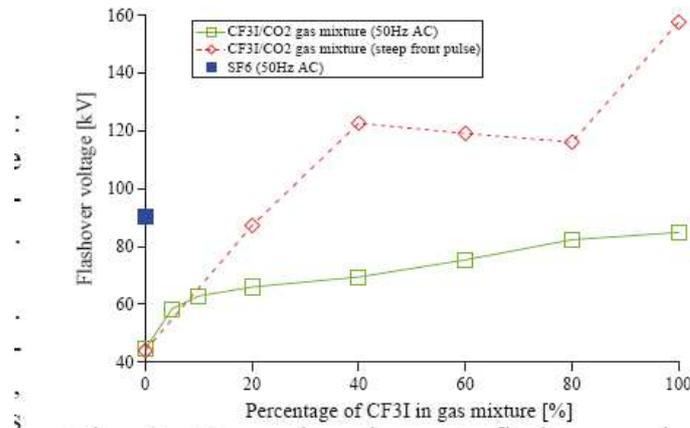


Fig. V-9 : Décharge de surface en fonction de la teneur en CF₃I dans le mélange [103]

Une autre raison pourrait également provenir du fait qu'une géométrie très divergente (pointe fine de rayon $\approx 100\mu\text{m}$) a été utilisée pour étudier les mélanges de gaz. Dans la réalité, la distribution du champ dans le disjoncteur est fortement non homogène, mais les renforcements de champ locaux près des interfaces triples (~ 20 , voir Fig. V-4) restent bien inférieurs à ceux présents dans nos essais en pointe/plan (~ 85). En pointe-plan, les tensions d'apparition étaient bien inférieures aux tensions de claquage, et celui-ci dépendait essentiellement de la propagation des décharges. Dans le cas du disjoncteur, le champ étant moins divergent il n'est pas évident que la situation soit parfaitement identique. Dans l'impossibilité de réaliser des mesures de courant et de visualiser les phénomènes, nous ne pouvons pas conclure sur ce point. Cependant, si l'apparition du claquage est essentiellement déterminée par les conditions de génération des décharges (c'est-à-dire si une décharge générée conduit systématiquement au claquage), cela pourrait expliquer que la variation en fonction du taux de CF₃I est plus proche de celle observée en géométrie uniforme.

V.3 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons montré que l'isolation extérieure d'un disjoncteur réel utilisant une ampoule à vide peut être assurée par un ester naturel ou par des mélanges CF₃I/N₂. Les grandeurs mesurées sont la tenue en tension AC 50Hz, la tenue aux chocs de foudre normalisés positif et négatif. Les procédures d'essais définies par la norme CEI60060-1 ont été appliquées.

Pour tester l'ester naturel, une cellule spécifique, remplie avec l'ester naturel FR3, a été construite. Les résultats montrent que l'ester naturel satisfait le cahier des charges exigé par la norme CEI. L'ampoule à vide, avec une isolation extérieure assurée par l'ester FR3, est capable de tenir 80kV AC pendant 1 minute et 170 kV en choc de foudre normalisé dans les deux polarités.

Les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ ont été validés avec un disjoncteur réel de type CBR fourni par Areva T&D. Le taux de CF_3I dans le mélange est de 0%, 5%, 10%, 20% et 30% avec une pression de gaz de 1,7 bars ou 1,5 bars. Pour les mélanges de gaz, nous avons effectué des mesures en fonction du cahier des charges CEI puis un cahier de charge plus sévère établi pour la tension nominale 24 kV.

Les résultats des tests montrent que le test avec un choc de foudre positif est dimensionnant. En effet, pour une surtension alternative de 1mn, l'isolation par N_2 pur satisfait déjà le niveau d'isolement exigé par la norme CEI 62271-100, mais elle ne passe pas le test avec une impulsion positive (coefficient de sécurité obtenu 0,97). L'addition de CF_3I permet d'obtenir une amélioration nette de la tenue diélectrique. Un mélange 30% $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ sous une pression de 1,7 bars présente un coefficient de sécurité de 1,48 par rapport à la norme CEI. Cependant, seul ce mélange à 30% de CF_3I à 1,7 bars satisfait le cahier de charge d'Areva, avec un coefficient de sécurité de 1,08. Cependant, ce mélange se liquéfie à température -38°C et il ne satisfait pas la condition d'utilisation d'un appareillage à l'extérieur. Ce mélange peut donc être utilisé pour les applications à l'intérieur uniquement.

Dans le cas de l'isolation extérieure d'une ampoule à vide, la performance d'isolation augmente régulièrement avec le taux de CF_3I (au maximum 30% dans nos essais). Ceci montre que pour le disjoncteur réel, bien que le champ soit fortement divergent, les résultats ne sont pas bien corrélés aux mesures réalisées précédemment en champ divergent (pointe-plan) sous tension impulsionnelle. En effet, en configuration pointe/plan, nous avons montré que la performance d'isolation n'est pas simplement corrélée au taux de CF_3I . Cela pourrait provenir du fait que les mesures ont été réalisées avec un champ trop divergent (pointe de rayon $100\mu\text{m}$), qui tend à maximiser l'influence de la propagation des décharges sur le claquage final. Ce point pourrait être vérifié en réalisant d'autres mesures, par exemple en faisant varier le rayon de l'électrode, ou encore en reproduisant un point triple représentatif à échelle 1 dans une cellule de laboratoire.

La présence de la surface solide isolante (i.e. l'enveloppe de l'ampoule à vide en céramique) peut également modifier la propagation des décharges qui se produisent probablement le long de cette surface. Des expériences supplémentaires sont donc nécessaires pour caractériser plus finement ces décharges glissantes dans la configuration d'un disjoncteur à ampoule à vide.

Conclusions générales

Dans ce travail, nous avons étudié expérimentalement la performance d'isolation des esters biodégradables et des mélanges de CF_3I avec N_2 ou CO_2 dans différentes conditions. L'objectif recherché à court terme est de remplacer le SF_6 dans un disjoncteur à coupure sous vide, dans lequel il faut assurer l'isolation externe de l'ampoule à vide. Les résultats sont également intéressants en vue d'autres types d'applications, par exemple les transformateurs de puissance dans lesquels le remplacement de l'huile minérale par les esters est envisageable. Dans cette thèse, nous avons mis en évidence les résultats suivants :

Concernant les propriétés diélectriques des esters

- L'étude de la génération de streamers a montré que les conditions locales d'apparition de décharges sont très comparables dans l'ester synthétique, les esters naturels et l'huile minérale. Sous tension alternative, ceci est vérifié quand le conditionnement du liquide (teneur en eau et en particules) est strictement contrôlé et identique entre liquides.
- L'étude de la propagation montre une différence nette entre l'huile minérale et les esters biodégradables. Dans des conditions de champ très divergent avec la distance entre les électrodes de l'ordre d'une dizaine de centimètres, le claquage se produit à tension plus élevée dans l'huile minérale que dans les huiles biodégradables. Aucune différence notable n'a été observée entre les esters étudiés, d'origine synthétique ou naturelle.
- Cet effet est dû aux streamers rapides qui apparaissent à des tensions nettement plus faibles dans les esters que dans l'huile minérale. En polarité positive, le claquage dans les huiles végétales est dû à des streamers rapides ($v \approx 100\text{km/s}$) alors qu'il est dû à des streamers lents ($v \approx 2\text{ km/s}$) dans l'huile minérale.
- Pour les applications, la rapidité des streamers constitue également un handicap pour la tenue aux surtensions brèves du type onde de foudre, très généralement utilisées pour tester et valider les équipements haute tension. Cela doit également être pris en compte lors de la conception de dispositifs isolés par des esters.

Concernant les propriétés en champ quasi uniforme du CF_3I et ses mélanges

- Les mesures des tensions de claquage du CF_3I en champ quasi-uniforme (avec une distance de l'ordre du mm) ont montré que la tenue diélectrique du CF_3I est comparable à celle du SF_6 .

- Le claquage (= arc électrique) du CF_3I génère des particules d'iode. La présence de ces particules est visible après plusieurs claquages et elle s'accompagne d'un courant de conduction mesurable. Notons que, dans nos conditions d'essai, la présence des particules d'iode ne modifie pas de façon appréciable la tension de claquage V_c .
- Une différence ($V_c < V_c^{\text{th}}$) a été observée entre nos mesures de V_c et celles calculées V_c^{th} à partir des valeurs du coefficient d'ionisation effectif et cette différence augmente avec la pression du gaz. Rappelons que pour le SF_6 et quelles que soient les conditions, un très bon accord entre ces valeurs est toujours observé. Ceci pourrait provenir de la présence d'iode atomique dans le gaz, qui conduit à un abaissement du champ critique réduit et donc la tension de claquage. Le champ critique réduit $(E/N)_{\text{lim}}$ de l'iode atomique est en effet beaucoup plus faible que celui du CF_3I .
- Avec les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ et en champ quasi-uniforme, une évolution linéaire de la tension de claquage (V_c) en fonction du taux de CF_3I est observée expérimentalement. Pratiquement les mêmes résultats sont observés avec les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$. L'effet favorable de « synergie » obtenu dans les mélanges SF_6-N_2 à faible taux de SF_6 n'est pas observé dans les mélanges $\text{CF}_3\text{I}-\text{N}_2$ et $\text{CF}_3\text{I}-\text{CO}_2$.
- La température de liquéfaction élevée du CF_3I impose un faible taux de CF_3I dans le mélange afin d'éviter la liquéfaction à basse température. En revanche, comme l'effet de synergie n'existe pas pour les mélanges de CF_3I , le taux de CF_3I doit être suffisamment important afin d'obtenir une qualité d'isolation nettement améliorée par rapport à N_2 pur. Nos calculs aboutissent à un taux optimal de CF_3I d'environ 20-30%.

Concernant les propriétés en champ très divergent du CF_3I et ses mélanges

- Quand la distribution de champ est fortement non homogène, la tenue diélectrique du CF_3I devient remarquablement plus faible que celle du SF_6 avec les deux polarités de la tension. Cette différence peut s'expliquer par l'apparition plus facile des décharges leaders dans le CF_3I que dans le SF_6 en raison de la faible température de décomposition du CF_3I . En effet, à une température supérieure à 700K, le CF_3I se décompose pour former l'iode atomique. Comme le champ critique associé à l'iode doit être environ 100-200 fois plus faible que celui du CF_3I pur, les conditions d'ionisation dans le canal de décharge sont fortement abaissées. Rappelons que le même scénario peut être envisagé pour le SF_6 mais à une température beaucoup plus élevée ($\geq 2000\text{K}$).

- La tension d'apparition des décharges partielles dans les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ est bien corrélée au taux de CF_3I . L'augmentation du taux de CF_3I entraîne une amélioration de la tension d'apparition de ces décharges. Dans les applications, les décharges partielles seront réduites ou même supprimées en augmentant au maximum la teneur en CF_3I dans le mélange.
- Dans nos mesures en champ divergent, la tenue diélectrique des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ n'augmente avec le taux de CF_3I que pour des pressions inférieures à environ 0,5 bar. Lorsque la pression devient supérieure à 1 bar, il n'y a plus de corrélation entre la tenue diélectrique et le taux de CF_3I dans le mélange. Les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ présentent une tenue diélectrique plus élevée que celle du CF_3I pur, en particulier avec la polarité positive de la pointe. Cet effet très favorable n'a cependant pas été retrouvé dans les mesures sur le disjoncteur réel, probablement parce que les conditions diffèrent sensiblement d'une géométrie pointe-plan (champ moins divergent, présence d'un isolant solide).

Concernant l'application à l'isolation à l'extérieur d'une ampoule à vide

- Pour l'isolation extérieure d'une ampoule à vide seule, les performances requises sont facilement obtenues avec les esters. Nous avons également observé que dans ce cas, les contraintes de champ ne sont pas très élevées : l'air à pression atmosphérique permet déjà de respecter la norme CEI, mais reste insuffisant au regard des normes industrielles plus contraignantes. L'utilisation d'une isolation mixte air + « barrières » diélectriques solides constitue une autre alternative envisageable pour le remplacement du SF_6 dans ce type d'application.
- La tenue aux basses températures oriente le choix vers des esters d'origine synthétique comme le MIDEL, qui présentent un point d'écoulement très bas (-60°C).
- Dans le cas du disjoncteur industriel CBR, l'isolation par N_2 pur satisfait le niveau d'isolement sous tension alternative exigé par la norme CEI 62271-100, mais reste insuffisante sous impulsion positive. L'addition de 30% de CF_3I permet d'obtenir une amélioration importante de la tenue diélectrique, et de respecter les normes CEI et industrielles. Cependant, ce mélange qui se liquéfie à -38°C ne satisfait pas les conditions d'utilisation à l'extérieur. Ce mélange peut être utilisé pour des applications à l'intérieur.
- Dans le disjoncteur industriel considéré, la performance d'isolation augmente régulièrement avec le taux de CF_3I (au maximum 30% dans nos essais). Dans ce cas, bien que le champ soit assez divergent, les résultats ne sont pas corrélés aux mesures réalisées en géométrie pointe-plan comme mentionné plus haut.

Perspectives

Les résultats obtenus dans ce travail ouvrent de nombreuses perspectives de recherche, que ce soit dans le domaine de la compréhension des mécanismes physiques de décharge (ce qui n'était pas l'objectif premier de cette thèse), ou concernant le développement de nouvelles technologies d'isolation. Il serait par exemple très intéressant de développer des études dans les domaines suivants :

- Nos mesures en champ non uniforme ont montré qu'avec une distribution de champ fortement non homogène, la tenue diélectrique du CF_3I devient remarquablement plus faible que celle du SF_6 dans les deux polarités de la tension. Nous supposons que cette différence peut être attribuée au fait que la transition streamer / leader apparaît plus facilement dans le CF_3I que dans le SF_6 . Dans cette thèse, nous avons tenté d'étudier la propagation dans le CF_3I avec une caméra à balayage de fente, mais notre dispositif était mal adapté à l'étude de ces phénomènes ultra-rapides (temps de montée de la tension trop lent, distance inter-électrode trop courte, - voir exemple dans l'annexe). L'étude détaillée de la propagation dans le CF_3I et ses mélanges permettrait de mieux comprendre les différences importantes avec le SF_6 , en particulier en réalisant l'analyse spectroscopique de la lumière émise.
- En configuration pointe plan avec une pointe très fine, nous avons trouvé que les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ peuvent présenter une tension de claquage plus élevée que celle du CF_3I pur, même avec des concentrations très faibles. Cette « anomalie » pourrait être liée à la formation de l'iode atomique qui devrait faciliter la propagation dans le CF_3I pur. Une autre hypothèse peut être également liée au fait que dans nos expériences réalisées avec une pointe très fine et un temps de montée long (1 μs), l'amorçage de la décharge se produit bien avant que la tension n'atteigne sa valeur maximum. Pour mieux comprendre ce phénomène « anormal », des mesures dans d'autres conditions (pointes moins fines) ainsi que des mesures d'émission de lumière (spectroscopie d'émission) seraient très utiles.
- Dans le disjoncteur réel, bien que le champ soit fortement divergent, les résultats ne sont pas corrélés aux mesures réalisées en géométrie pointe-plan. Il serait intéressant de faire des mesures de tension de claquage avec une géométrie plus proche de la réalité (pointe plus grosse, « point triple », présence d'un solide isolant parallèle au champ).
- Dans la perspective d'une application du CF_3I , de nombreuses vérifications restent à réaliser, comme par exemple la stabilité du gaz à long terme dans des conditions de température élevées, l'influence de particules, la décomposition du gaz en présence de décharges partielles, etc.

Annexes

A-1. Longueur d'arrêt et vitesse moyenne des streamers dans les esters, distance 5cm

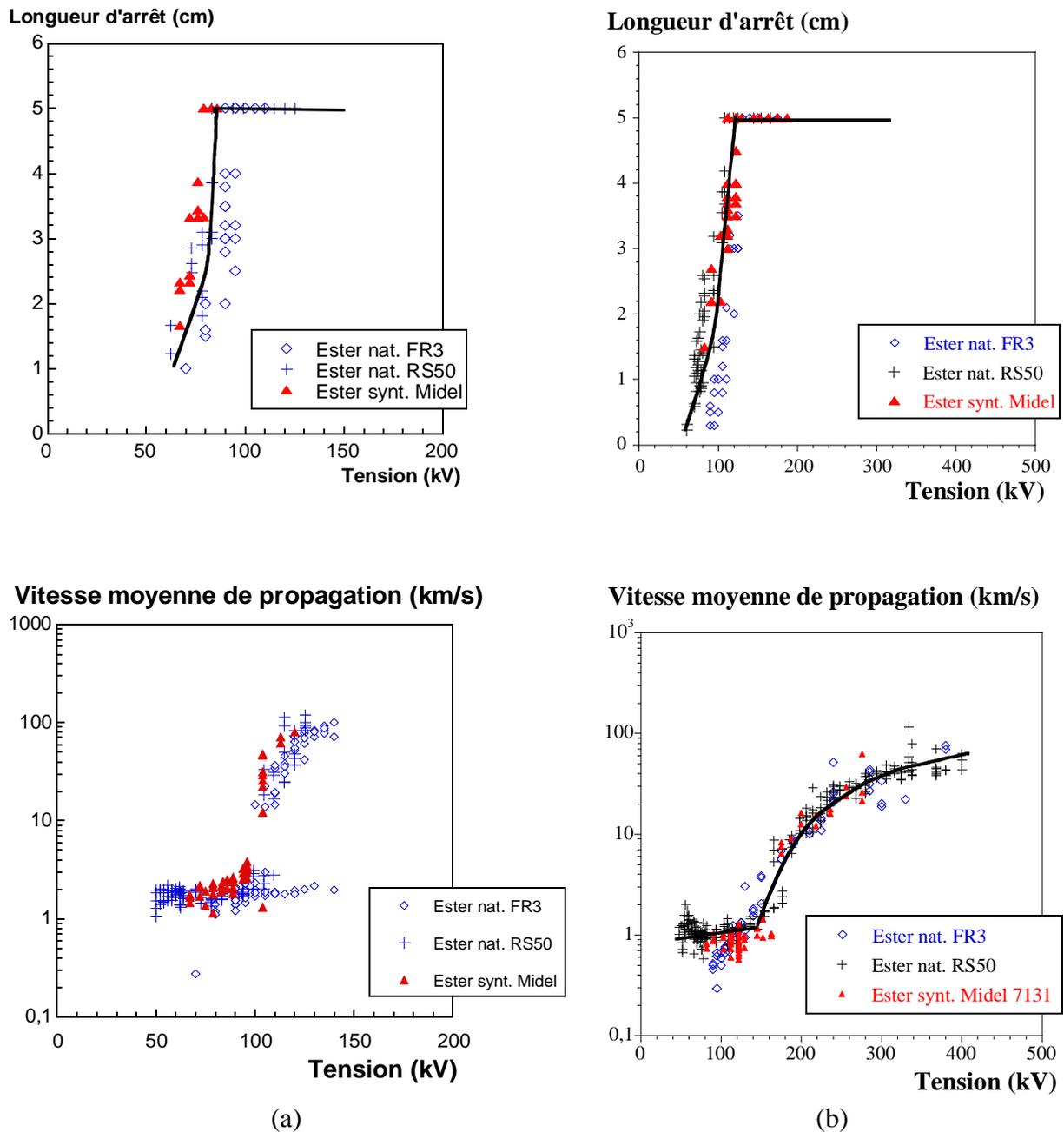
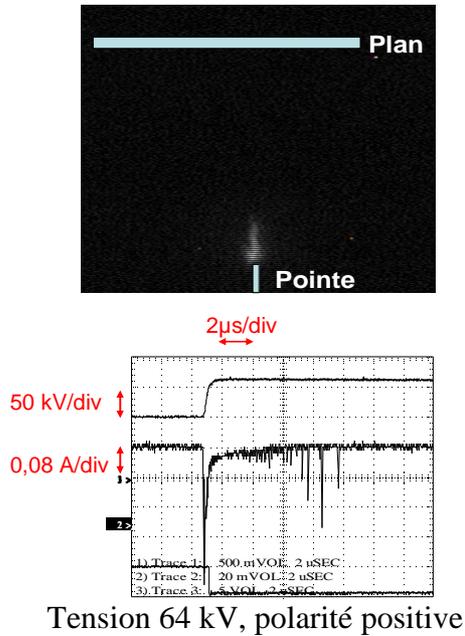


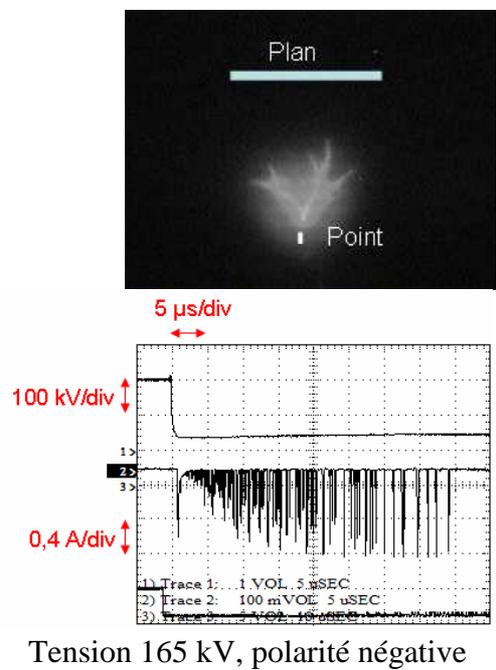
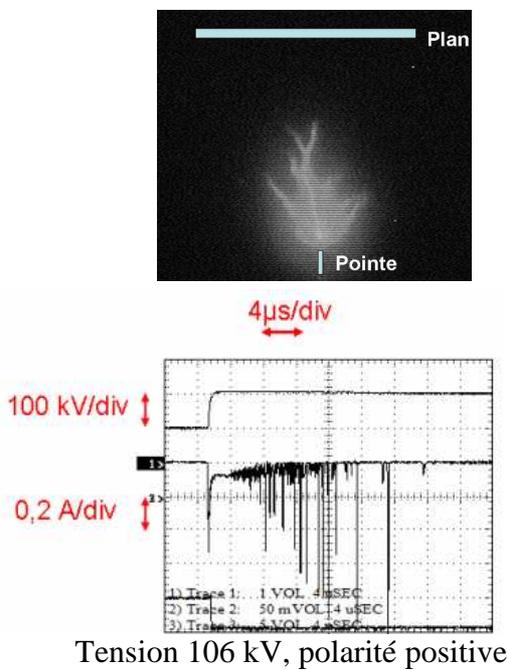
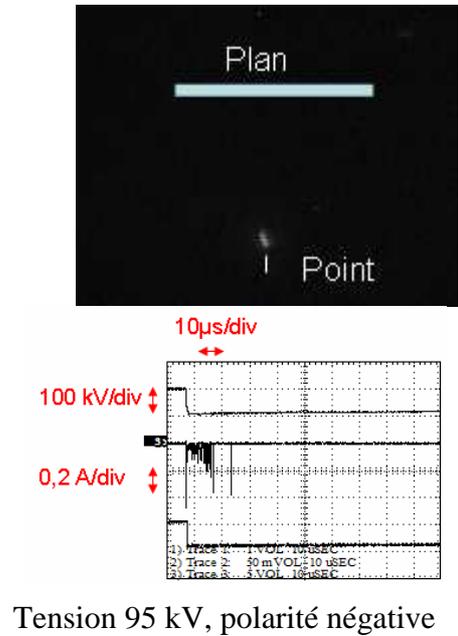
Fig.A-1 : Longueur d'arrêt et vitesse moyenne de propagation des streamers dans les esters en polarité positive (a) et en polarité négative (b), $D = 5$ cm

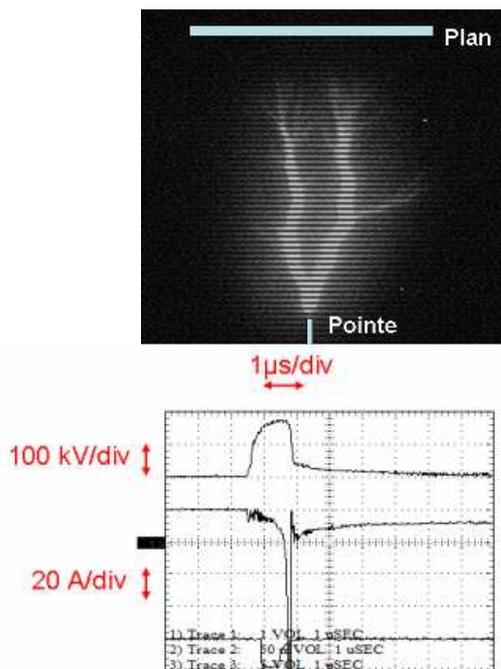
A-2. Exemples d'enregistrements des images et des courants dans l'ester synthétique Midel 7131 à différents niveaux de tension

Polarité positive, D = 10 cm, ester synthétique Midel 7131

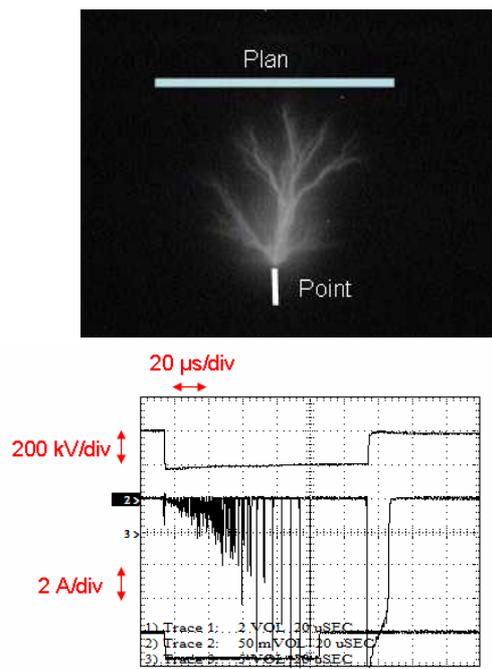


Polarité négative, D = 10 cm, ester synthétique Midel 7131





Tension 162 kV, polarité positive, intensificateur fermé avant claquage



Tension 228 kV, polarité négative, intensificateur fermé avant claquage

A-3 Tension de claquage des esters à basse température

Tension de claquage mesurée à basse température, tension AC, configuration sphère-sphère, distance 1mm. La cellule est placée dans l'enceinte climatique pendant 24h pour obtenir la température souhaitée. La tension de claquage est ensuite mesurée à température ambiante. Teneur en eau au départ des liquides ≈ 100 ppm.

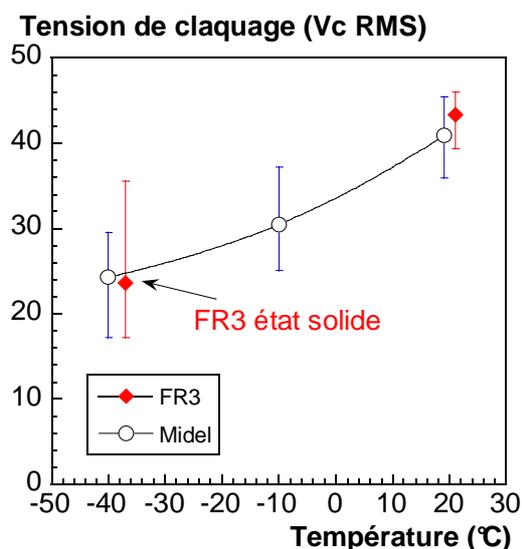


Fig.A-2 : Tension de claquage à basse température des esters (tension AC, configuration sphère - sphère, $D = 1$ mm, les esters sont conditionnés dans l'enceinte climatique, V_c est ensuite mesuré à température ambiante). Voir valeurs dans le tableau A-1

Tableau A-1 : Tension de claquage à basse température des esters

Ester naturel FR3		Ester synthétique Midel	
Température	V_c (kV RMS)	Température	V_c (kV RMS)
20°C	39,386	20°C	35,92
	44,901		45,39
	43,134		42,21
	45,962		40,02
-37°C (état solide)	35,497	-10°C	25,102
	18,102		33,658
	17,183		37,194
	29,84		
			26,658
-40°C (état visqueux)		-40°C (état visqueux)	26,006
			22,863
			25,88
			29,486
			17,253

A-4 Enregistrement par caméra à balayage des décharges dans le CF₃I

Enregistrement par camera de balayage de fente, gaz CF₃I pur à pression 0,5 bar, distance D = 3cm.

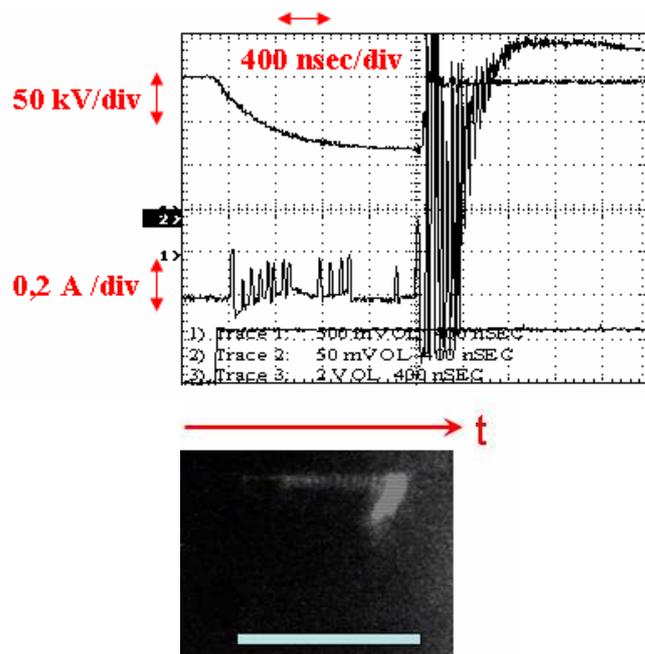


Fig.A-2 : Photographie à balayage de fente d'une décharge dans CF₃I, pression 0,5 bar, tension 75 kV négative

Références bibliographiques

- [1] L. Christophorou, J. Olthoff, and R. Van Brunt, "Sulfur hexafluoride and the electric power industry," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 13, no. 5, pp. 20-24, 1997.
- [2] S. Théoleyre, *Techniques de coupure en moyenne tension*. Techniques de l'ingénieur D4705, 1999.
- [3] N. Marshall, *Encyclopedie des gaz Gas encyclopaedia translated by Nissim Marshall*. Amsterdam: Elsevier Scientific Pub., 1976.
- [4] J. TAILLEBOIS, *Postes à haute et très haute tensions - Postes sous enveloppe métallique (PSEM)*. Techniques de l'ingénieur D4590-1, 2001.
- [5] I. Levin et al., "The global SF6 source inferred from long-term high precision atmospheric measurements and its comparison with emission inventories," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 10, no. 6, pp. 2655-2662, Mar. 2010.
- [6] P. O'connell et al., "SF6 in the electric industry, status 2000," *Electra*, vol. 200, pp. 16-25, 2002.
- [7] CEI61634, "High-voltage switchgear and controlgear - Use and handling of sulphur hexafluoride (SF6) in high-voltage switchgear and controlgear."
- [8] CIGRE WG 23.10., "SF6 Recycling Guide," *Electra*, vol. 173, pp. 43-69, 1997.
- [9] L. Niemeyer, "SF6 recycling in electric power equipment," in *Gaseous Dielectric VIII edited by L. Christophorou*, Springer, pp. 431-442, 1998.
- [10] T. Rokunohe, Y. Yagihashi, K. Aoyagi, T. Oomori, and F. Endo, "Development of SF6-Free 72.5 kV GIS," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3, pp. 1869 - 1876, 2007.
- [11] M. Homma, M. Sakaki, E. Kaneko, and S. Yanabu, "History of vacuum circuit breakers and recent developments in Japan," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 13, no. 1, pp. 85-92, 2006.
- [12] Y. Qiu and X. Weng, "Prediction of dielectric strength of SF6/He gas mixtures," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 23, no. 3, pp. 363-364, 1990.
- [13] W. Khechen and J. Laghari, "Breakdown studies of SF6/argon gas mixtures," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 6, pp. 1141-1146, Dec. 1989.
- [14] J. L. Moruzzi and J. D. Craggs, "Ionization and attachment and breakdown measurements in mixtures of SF6 with helium, argon and hydrogen," in *Proceedings of the Twelfth International Conference on Phenomena in Ionized Gases*, 1975.
- [15] N. Malik and A. Qureshi, "A Review of Electrical Breakdown in Mixtures of SF6 and Other Gases," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 1, pp. 1-13, 1979.
- [16] Y. Qiu and E. Kuffel, "Comparison of SF6/N2 and SF6/CO 2 gas mixtures as alternatives to SF6 gas," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 6, pp. 892-895, 1999.
- [17] N. Malik and A. Qureshi, "Breakdown Gradients in SF6-N2, SF6-Air and SF6-CO2

- Mixtures,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 5, pp. 413-418, 1980.
- [18] M. Siddagangappa, C. Lakshminarasimha, and M. Naidu, “Prediction of Breakdown Voltages of Binary Gas Mixtures in Uniform Electric Fields,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 4, pp. 359-361, 1984.
- [19] A. Buttka, J. Pfeiffer, and B. Sojka, “Siemens SF6/N2 Circuit-Breaker for Service at Low Temperatures,” *Siemens Power Engineering, Special Issue “HV Technology”*, vol. 6, pp. 28-37, 1984.
- [20] H. Koch and T. Hillers, “Second generation gas-insulated line,” *Power Engineering Journal*, vol. 16, no. 3, pp. 111-116, 2002.
- [21] F. Renaud, “220 kV gas-insulated transmission line-Palexpo Geneva Switzerland,” in *2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491)*, pp. 2476-2479, 2003.
- [22] J. Devins, “Replacement Gases for SF6,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 15, no. 2, pp. 81-86, 1980.
- [23] D. James et al., “Dielectric strength of new gases and gas mixtures,” *Gaseous Dielectrics I*, p. 224, 1978.
- [24] L. Niemeyer, “A systematic search for insulation gases and their environmental evaluation,” *Gaseous Dielectrics VIII*, pp. 459-464, 1998.
- [25] L. Christophorou et al., “Recent Advances in Gaseous Dielectrics at Oak Ridge National Laboratory,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 6, pp. 550-566, 1984.
- [26] M. Akbar and N. H. Malik, “Electrical Breakdown of N2O-SF6, N2O-CCL2F2 and N2O-CO2 Gas Mixtures,” *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 3, pp. 581-585, 1985.
- [27] O. Yamamoto, T. Takuma, S. Hamada, Y. Yamakawa, and M. Yashima, “Applying a gas mixture containing c-C4F8 as an insulation medium,” *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 1075-1081, 2001.
- [28] H. Okubo, T. Yamada, K. Hatta, N. Hayakawa, S. Yuasa, and S. Okabe, “Partial discharge and breakdown mechanisms in ultra-dilute SF6 and PFC gases mixed with N2 gas,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 35, no. 21, pp. 2760-2765, 2002.
- [29] W. Pfeiffer and D. Schoen, “Prebreakdown phenomena in 20/80% N2O/N2 gas mixtures for vft-voltage stress,” in *Proceeding of the XV International Conference on Gas Discharges and their Applications*, pp. 359-362, 2004.
- [30] C. Tran Duy, “Propriétés diélectriques de liquides isolants d'origine végétale pour applications en haute tension,” Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, 2009.
- [31] CIGRE WG A2.35, “Experiences in Service with New Insulating Liquids,” Cigré, Oct-2010.
- [32] R. Eberhardt, H. Muhr, W. Lick, F. Baumann, and G. Pukel, “Comparison of alternative insulating fluids,” in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on*, pp. 591-593, 2008.
- [33] Z. Wang et al., “New insulation fluids : Use of environmentally friendly fluides in power transformers,” in *Cigre, Brugge, 2007*, 2007.

- [34] M. Hemmer, R. Badent, and T. Leibfried, "Investigation of the suitability of commercially available bio-oils as insulating liquid," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2003. Annual Report. Conference on*, pp. 64-67, 2003.
- [35] H. Borsi et al., "New liquid insulating materials for power transformers," in *Cigre, Brugge, 2007*, 2007.
- [36] I. Fofana, H. Borsi, and E. Gockenbach, "Fundamental investigations on some transformer liquids under various outdoor conditions," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 8, no. 6, pp. 1040-1047, 2001.
- [37] Z. Wang, "Use of Ester based Insulating Fluids in Power Transformers," in *Cigré NGN UK Meeting*, 2009.
- [38] X. Wang and Z. Wang, "Particle Effect on Breakdown Voltage of Mineral and Ester Based Transformer Oils," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2008. CEIDP 2008. Annual Report Conference on*, pp. 598-602, 2008.
- [39] G. Massala and O. Lesaint, "A comparison of negative and positive streamers in mineral oil at large gaps," *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 34, pp. 1525-1532, 2001.
- [40] L. DUMITRESCU, "Etude des mécanismes de génération des streamers en polarité positive dans les liquides, , Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble," 2001.
- [41] S. Rzad, J. Devins, and R. Schwabe, "Transient Behavior in Transformer Oils: Prebreakdown and Breakdown Phenomena," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 14, no. 6, pp. 289-296, 1979.
- [42] P. Gournay and O. Lesaint, "A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 26, no. 11, pp. 1966-1974, Nov. 1993.
- [43] N. G. Trinh, C. Vincent, and J. Regis, "Statistical dielectric degradation of large-volume oil-insulation," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, pp. 3712-3721, 1982.
- [44] T. Tran Van, "Etude de la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et alternative," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.
- [45] W. Chadband, "The ubiquitous positive streamer," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 23, no. 4, pp. 697-706, Aug. 1988.
- [46] W. Chadband, "On variations in the propagation of positive discharges between transformer oil and silicone fluids," *J. Phys. D: Appl. Phys*, vol. 13, no. 7, pp. 1299-1307, 1980.
- [47] D. Linhjell, L. Lundgaard, and G. Berg, "Streamer propagation under impulse voltage in long point-plane oil gaps," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 1, no. 3, pp. 447-458, 1994.
- [48] O. Lesaint and G. Massala, "Positive streamer propagation in large oil gaps: experimental characterization of propagation modes," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 5, no. 3, pp. 360-370, 1998.
- [49] O. Lesaint, A. Saker, P. Gournay, R. Tobazeon, J. Aubin, and M. Mailhot, "Streamer propagation and breakdown under ac voltage in very large oil gaps," *Dielectrics and*

- Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 5, no. 3, pp. 351-359, 1998.
- [50] P. Rain, C. Boisdon, O. Lesaint, and R. Tobazeon, "Behavior of streamers under divergent AC fields in transformer oils at large gaps," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 26, no. 4, pp. 715-725, Aug. 1991.
- [51] G. Massala, "Propagation et propriétés électriques des streamers positifs à grande distance dans l'huile minérale sous très haute tension impulsionnelle," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.
- [52] C. Duy, O. Lesaint, A. Denat, and N. Bonifaci, "Streamer propagation and breakdown in natural ester at high voltage," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 6, pp. 1582-1594, 2009.
- [53] P. Rain and O. Lesaint, "Prebreakdown phenomena in mineral oil under step and ac voltage in large-gap divergent fields," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 1, no. 4, pp. 692-701, 1994.
- [54] CEI60156, "Isolants liquides - Détermination de la tension de claquage a fréquence industrielle," 1995.
- [55] R. Coelho and J. Debeau, "Properties of the tip-plane configuration," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 4, no. 9, pp. 1266-1280, 1971.
- [56] T. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, and H. Winkelkemper, "Breakdown of Gases in Uniform field – Paschen Curves for Nitrogen, Air and Sulphur Hexafluoride," *Electra*, vol. 32, pp. 61-82, 1974.
- [57] A. Quenin, "Etude des propriétés diélectriques des mélanges azote-SF₆ à faible taux de SF₆," Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [58] N. Wiegart et al., "Inhomogeneous field breakdown in GIS-the prediction of breakdown probabilities and voltages. I. Overview of a theory for inhomogeneous field breakdown in SF₆," *Power Delivery, IEEE Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 923-930, 1988.
- [59] M. Zwicky, "Breakdown Phenomena in SF₆ and Very Inhomogeneous Large Rod-Plane Gaps under 50 HZ-AC and Positive Impulse Voltages," *Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 22, no. 3, pp. 317 - 324, Jun. 1987.
- [60] F Pinnekamp and L. Niemeyer, "Qualitative model of breakdown in SF₆ in inhomogeneous gaps," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 16, no. 7, pp. 1293-1302, 1983.
- [61] J. Tortai, N. Bonifaci, and A. Denat, "Insulating properties of some liquids after an electrical arc," *I.E.E.E. Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 9, no. 1, pp. 3-9, 2002.
- [62] Y. Bertrand and L. Hoang, "Vegetables oils as substitute for mineral oils in medium voltage equipment," *CIGRE,DI-201*, 2004.
- [63] S. Asadauskas and S. Z. Erhan, "Depression of pour points of vegetable oils by blending with diluents used for biodegradable lubricants," *Journal of the American Oil Chemists' Society*, vol. 76, no. 3, pp. 313-316, 1999.
- [64] M. Taki, D. Maekawa, H. Odaka, H. Mizoguchi, and S. Yanabu, "Interruption capability of CF₃I gas as a substitution candidate for SF₆ gas," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 14, no. 2, pp. 341 - 346, Apr. 2007.

- [65] H. Katagiri, H. Kasuya, H. Mizoguchi, and S. Yanabu, "Investigation of the performance of CF₃I Gas as a Possible Substitute for SF₆," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, no. 5, pp. 1424-1429, 2008.
- [66] J. Townsend, *Electrons in gases*, Hutchinson. London: Hutchinson, 1947.
- [67] A. Pedersen, "On the electrical breakdown of gaseous dielectrics-an engineering approach," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 24, no. 5, pp. 721-739, Oct. 1989.
- [68] J. D. Urquijo, A. M. Juárez, E. Basurto, and J. L. Hernández-Ávila, "Electron impact ionization and attachment, drift velocities and longitudinal diffusion in CF₃I and CF₃I-N₂ mixtures," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 7, pp. 2205-2209, 2007.
- [69] H. Toyota, S. Matsuoka, and K. Hidaka, "Voltage-time characteristics of SF₆-N₂ and CF₃I-N₂ gas mixtures in nano second range," in *XV International Conference on Gas Discharges and their Applications*, pp. 395-398, 2004.
- [70] H. Toyota, S. Matsuoka, and K. Hidaka, "Measurement of sparkover voltage and time lag characteristics in CF₃I-N₂ and CF₃I- air gas mixtures by using steep-front square voltage," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 157, no. 2, pp. 1-7, 2006.
- [71] S. Solomon, J. B. Burkholder, A. R. Ravishankara, and R. R. Garcia, "Ozone depletion and global warming potentials of CF₃I," *Journal of Geophysical Research*, vol. 99, no. 10, pp. PP. 20,929-20,935, 1994.
- [72] Z. Li and J. S. Francisco, "An examination of pathways for the reaction of oxygen atoms with CF₃O radicals. Implications for the role of CF₃ radicals in stratospheric chemical processes," *Chemical Physics Letters*, vol. 209, no. 1, pp. 151-160, Jun. 1993.
- [73] Y. Li, K. O. Patten, D. J. Wuebbles, and D. Youn, "Potential impacts of CF₃I on ozone as a replacement for CF₃Br in aircraft applications," *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, vol. 6, no. 3, pp. 5163-5195, 2006.
- [74] Subcommittee on Iodotrifluoromethane, Committee on Toxicology, US National Research Council, *Iodotrifluoromethane: Toxicity Review*. Washington, D.C.: The National Academies Press, 2004.
- [75] A. D. Mitchell, *Genetic Toxicity Evaluation of Iodotrifluoromethane (CF₃I). Volume I: Results of Salmonella Typhimurium Histidine Reversion Assay (Ames Assay). Genesys Study Number 94035. Genesys Research, Inc. Research Triangle Park, NC, USA. 1995.*
- [76] A. D. Mitchell, *Genetic Toxicity Evaluation of Iodotrifluoromethane (CF₃I). Volume III. Results of the Forward Mutation Assay Using L5178Y Mouse Lymphoma Cells. Genesys Study Number 94036. Genesys Research, Inc., Research Triangle Park, North Carolina, USA. 1995.*
- [77] Y. Duan, M. Zhu, and L. Han, "Experimental vapor pressure data and a vapor pressure equation for trifluoroiodomethane (CF₃I)," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 121, no. 1, pp. 227-234, Jul. 1996.
- [78] J. D. Urquijo, "Is CF₃I a good gaseous dielectric? A comparative swarm study of CF₃I and SF₆," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 86, p. 012008, 2007.
- [79] M. Kimura, Y. Morokuma, and Y. Nakamura, "A Measurement of Ionization Coefficients in Pure Trifluoro- Iodo-Methane.," *Papers of Technical Meeting on*

- Electrical Discharges, IEE Japan*, vol. 02, no. 96, pp. 13-18, 2002.
- [80] M. Kimura and Y. Nakamura, "Electron swarm parameters in CF₃I and a set of electron collision cross sections for the CF₃I molecule," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 43, no. 14, p. 145202, 2010.
- [81] T. Takuma, O. Yamamoto, and S. Hamada, "Gases as a dielectric," *Gaseous Dielectric X edited by L. Christophorou, Springer*, pp. 195-204, 2004.
- [82] B. Hamon, "Mélange de gaz," *Techniques de l'ingénieur, traité Génie de Procédés*, pp. A5830.1-A5830.15, Feb. 1988.
- [83] CEI60694, "Spécifications communes aux normes de l'appareillage à haute tension."
- [84] Y. Luo, *Handbook of Bond Dissociation Energies in Organic Compounds*, 1st ed. CRC Press, 2002.
- [85] M. KAMAROL, "Partial Discharge Properties and Gas Decomposition Analysis of Environmental Friendly Gas Insulation Media as a Basis of Diagnostic Technique Development," Kyushu Institute of Technology, 2008.
- [86] M. YUMOTO, S. HAMANO, T. SUZUKI, and T. Hillers, "Influence of CF₃I on the number of supplied electrons under high pressure nitrogen," in *International Conference on Gas Discharges and Their Applications*, pp. 334-337, 2010.
- [87] J. Meek and J. Craggs, *Electrical Breakdown of Gases*. John Wiley & Sons Ltd, 1978.
- [88] E. Kuffel, W. S. Zaengl, and J. Kuffel, *High voltage engineering: fundamentals*. Newnes, 2000.
- [89] H. Raether, *Electron avalanches and breakdown in gases*. Butterworths, 1964.
- [90] L. Niemeyer and F. Pinnekamp, "Leader discharges in SF₆," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 16, no. 6, pp. 1031-1045, Jun. 1983.
- [91] I. Gallimberti and N. Wiegart, "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions. II. Streamer to leader transition," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 2363-2379, Dec. 1986.
- [92] I. Gallimberti and N. Wiegart, "Streamer and leader formation in SF₆ and SF₆ mixtures under positive impulse conditions. I. Corona development," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19, no. 12, pp. 2351-2361, 1986.
- [93] O. Farish, "Corona-Controlled Breakdown in SF₆ and SF₆ Mixtures," in *XVI International Conference on Phenomena in Ionized Gases*, pp. 187-195, 1983.
- [94] H. Saitoh, K. Morita, T. Kikkawa, N. Hayakawa, and H. Okubo, "Impulse partial discharge and breakdown characteristics of rod-plane gaps in air and N₂ gases," *Electrical Engineering in Japan*, vol. 148, no. 3, pp. 36-43, 2004.
- [95] N. Hayakawa, Y. Yoshitake, N. Koshino, T. Ueda, and H. Okubo, "Impulse partial discharge characteristics and their mechanisms under non-uniform electric field in N₂/SF₆ gas mixtures," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 12, no. 5, pp. 1035-1042, 2005.
- [96] X. Qiu, I. D. Chalmers, and P. Coventry, "A study of alternative insulating gases to SF₆," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 32, no. 22, pp. 2918-2922, 1999.
- [97] E. Kuffel and A. Yializis, "Impulse Breakdown of Positive and Negative Rod-Plane Gaps in SF₆-N₂ Mixtures," *Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on*, vol.

- 97, no. 6, pp. 2359 - 2366, Nov. 1978.
- [98] H. Toyota, S. Nakauchi, S. Matsuoka, and K. Hidaka, "Voltage-time Characteristics in SF₆ and CF₃I Gas within Non-uniform Electric Field," in *Proceedings of the XIVth International Symposium on High Voltage Engineering, Tsinghua University, Beijing, China*, 2005.
- [99] CEI60060-1, "Techniques des essais en haute tension Partie 1: Définitions et prescriptions générales relatives aux essais."
- [100] T. Yamamoto, A. Yasuhara, F. Shiraishi, K. Kaya, and T. Abe, "Thermal decomposition of halon alternatives," *Chemosphere*, vol. 35, no. 3, pp. 643-654, Aug. 1997.
- [101] J. Tortorici and O. Gascard, "Joint d'isolation diélectrique pour ampoule à vide," U.S. Patent WO/2007/045635.
- [102] CEI62271-100, "Appareillage à haute tension – Partie 100: Disjoncteurs à courant alternatif à haute tension," 2001.
- [103] T. Takeda, S. Matsuoka, A. Kumada, and K. Hidaka, "Flashover characteristics of CF₃I on the dielectric surface," in *International Conference on Gas Discharges and Their Applications*, pp. 268-271, 2010.

Communications à des Conférences Internationales avec comité de lecture et actes

M. Nguyen Ngoc, A. Denat, N. Bonifaci, O. Lesaint, W. Daoud and M. Hassanzadeh “*Feasibility of trifluoriodomethane CF₃I and CF₃I-N₂ mixtures as medium voltage insulation*” IEEE Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phen., CEIDP, IEEE, October 18-21, Virginia Beach (USA), 2009.

C. Tran Duy, O. Lesaint, M. Nguyen Ngoc, A. Denat “*Streamer initiation and breakdown in vegetable-based biodegradable oils*”, 16th Int. Symp. on High Volt. Eng. (ISH), Cape Town (South Africa), paper C-47, p. 148, 24-28 August 2009.

Nguyen Ngoc M., O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat, M. Hassanzadeh “*A comparison of breakdown properties at high voltage between natural and synthetic esters*” IEEE Conf. on Elec. Insul. and Diel. Phen., CEIDP, IEEE, october 17-20, West Lafayette (USA), 2010.

Nguyen Ngoc M., A. Denat, N. Bonifaci, O. Lesaint, M. Hassanzadeh “*Impulse partial discharges and breakdown of CF₃I in highly non-uniform field*”, XVIII International Conference on Gas Discharges and Their Applications (GD 2010), Greifswald, (Germany) 5th - 10th September, 2010.

Communications à des Colloques Nationaux avec actes et comité de lecture

Nguyen Ngoc M., O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat, M. Hassanzadeh « *Comparaison des propriétés de claquage à haute tension d’esters naturels et synthétiques*», colloque Matériaux du Génie Electrique MGE 2010 , Montpellier, 30-31 Aout 2010, pp. 32-36.

Communications à des Colloques Nationaux avec actes sans comité de lecture

Nguyen Ngoc M., O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat, M. Hassanzadeh « *Propriétés de claquage sous très haute tension d’esters naturels et synthétiques biodégradables* », Conférence francophone sur l’éco-conception en Génie électrique (CONFREGÉ), Toulouse, France, 6 & 7 décembre 2010.