

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

ÉTUDE D'UN NOUVEAU SYSTÈME D'ISOLATION GAZEUSE ÉCO-EFFICACE
DES DISJONCTEURS MOYENNE TENSION À COUPURE DANS LE VIDE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ
COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
MACTAR THIAM

MAI 2023

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire, de cette thèse ou de cet essai a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire, de sa thèse ou de son essai.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire, cette thèse ou cet essai. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire, de cette thèse et de son essai requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. Sc. A.)

Direction de recherche :

Adam W. SKOREK, Ph. D, M.Sc.Eng.(FEANI), FICI, IEEE Life Fellow

Prénom et nom

directeur de recherche

Rouzbeh REZVANI, M. Sc., P.Eng.

Prénom et nom

codirecteur de recherche

Jury d'évaluation

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Prénom et nom

Fonction du membre de jury

Remerciements

Ce travail est dédié à toute ma famille pour l'amour inconditionnel et le soutien à mon
encontre. Un grand MERCI.

En guise de reconnaissance, nous tenons à remercier notre directeur de recherche
Prof. Adam W. Skorek pour la disponibilité, l'orientation, la confiance, la patience qui ont
constitué un apport considérable dans l'accomplissement de ce modeste travail. Qu'il trouve
dans ce travail un hommage vivant à sa haute personnalité.

Nous remercions aussi notre directeur de recherche externe Rouzbeh Rezvani, vice-président
des opérations chez CO7 Technologies Inc. pour son accueil et ses explications qui ont éclairé
le chemin de la recherche.

Nos remerciements s'étendent aussi :

- au personnel de l'entreprise CO7 Technologies Inc. en passant par son président
Christian Cossette et Rouzbeh Rezvani pour leur soutien durant l'accomplissement
de ce travail ;
- à Guy Olivier et à Pierre LaRue d'Energie Conseil Olivier pour leur collaboration
et leur contribution remarquables à ce travail ;
- au Décanat de l'Université du Québec à Trois-Rivières (UQTR) pour l'octroi de la
bourse Universalis Causa ;
- à Mitacs pour son appui financier à travers le Programme Accélération en partenariat
avec CO7 Technologies Inc. et l'UQTR ;
- à l'ensemble des professeurs qui ont contribué à notre cheminement à l'UQTR.

Résumé

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la recherche de solutions alternatives sur l'utilisation de l'hexafluorure de soufre SF₆ dans les appareillages moyenne tension plus particulièrement dans les disjoncteurs à coupure dans le vide. Il s'agit d'une étude menée chez CO7 Technologies Inc., Montréal, Province du Québec, Canada, au cours de la recherche et du développement d'un nouveau gaz éco-efficace comme milieu d'isolation d'un disjoncteur extérieur moyenne tension à coupure dans le vide VOX 38 kV isolé actuellement au SF₆. Le disjoncteur VOX a été développé pendant plusieurs années par les firmes françaises Areva et poursuivi par Schneider. CO7 Technologies Inc. a acquis les propriétés intellectuelles de ce produit en 2020 et a entrepris des études afin de remplacer le SF₆ par un autre gaz éco-efficace. Le SF₆ est un gaz possédant d'excellentes propriétés diélectriques mais figure parmi les gaz à effet de serre les plus nocifs avec un pouvoir de réchauffement global estimé à 23900 fois celui du CO₂. Plusieurs gaz simples comme industriels, présentent des caractéristiques variantes et limitées pour substituer le SF₆. Les gaz industriels comme le CF₃I, HFO, C₅H₁₀O etc. possèdent quelques fois des tenues diélectriques supérieures à celle du SF₆ mais n'ont pas une température d'ébullition très faible pour être utilisés comme gaz d'isolation dans des conditions extérieures froides. Quant aux gaz naturels simples tels que l'azote pur, l'air sec ou le dioxyde de carbone, ils ont leurs points d'ébullition meilleurs que celui du SF₆ et possèdent une tenue diélectrique environ trois fois plus faible que celle du SF₆ mais qui peut être améliorée soit par un mélange avec un autre gaz soit par une augmentation de la pression. Les mélanges à base d'azote pur avec le protoxyde d'azote N₂O ou le dioxyde de carbone CO₂ ont aussi été étudiés et testés sur le disjoncteur VOX 38 kV

mais les essais diélectriques effectués ont montré que seul l'azote pur à 2,5 bars abs remplit les exigences minimales pour une isolation de ce disjoncteur. Ces essais ont montré que la polarité négative constitue le paramètre dimensionnant car étant le test diélectrique le plus contraignant, et que l'augmentation de la pression reste la seule option pour améliorer la tenue diélectrique de l'azote pur pour atteindre le niveau d'isolation du SF₆ dans le disjoncteur. De plus, l'aspect thermique a été aussi étudié à travers une simulation numérique sur Comsol Multiphysics pour déterminer l'échauffement de température des conducteurs avec l'azote pur et les résultats ont montré un meilleur refroidissement dans le cas de l'azote plutôt que dans le SF₆.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	iv
Table des matières	vi
Liste des tableaux	x
Liste des figures	xiii
Liste des symboles	xviii
Chapitre 1 - Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs et sous-objectifs	2
Chapitre 2 - Le SF ₆ et l'industrie électrique	4
2.1 Domaine de recherche	4
2.1.1 Mots-clés	5
2.1.2 Bases de données	5
2.2 Généralités sur l'hexafluorure de soufre SF ₆	6
2.2.1 Le SF ₆ et ses propriétés	6
2.2.2 Utilisation du SF ₆ dans l'industrie électrique	8
2.2.3 Présentation des disjoncteurs à coupure dans le vide isolés au SF ₆	10

2.2.4	Présentation du disjoncteur VOX de CO7 Technologies Inc.	12
2.3	Inconvénients du SF ₆	15
Chapitre 3 - État de l'art sur les alternatives au SF ₆ dans les disjoncteurs		18
3.1	Air sec (air technique)	20
3.2	Azote N ₂	24
3.3	Mélange N ₂ -CO ₂	26
3.4	Trifluoroiodométhane CF ₃ I	27
3.4.1	Mélange gazeux CF ₃ I / CO ₂	28
3.4.2	Mélange gazeux CF ₃ I/N ₂	31
3.5	Perfluorokétones (C ₅ F ₁₀ O et C ₆ F ₁₂ O).....	35
3.6	Fluoronitrile C ₄ F ₇ N	40
3.7	Hydrofluorooléfine HFO1234zeE	42
3.8	Protoxyde d'azote N ₂ O.....	47
Chapitre 4 - Tests et normes – Argumentation technique.....		53
4.1	Tests diélectriques	53
4.1.1	Tenue de tension en fréquence industrielle (Power frequency voltage test).....	54
4.1.2	Tenue aux chocs de foudre (Lightning impulse voltage test).....	56
4.1.3	Test de décharges partielles	59
4.2	Test d'élévation de température (Temperature rise test).....	62

4.3	Tests de tenue à basse température.....	62
4.4	Tests de courant de courte durée (Short-time current test).....	63
4.5	Tests de commutation des courants capacitifs (Capacitor current switching tests).....	65
4.6	Test de commutation des courants hors-phase (Out-of-phase switching current)	66
4.7	Test d'arc interne (Internal arc test)	68
Chapitre 5 - Aspects expérimentaux		75
5.1	Tests expérimentaux.....	75
5.1.1	Test de tenue aux chocs de foudre normalisés.....	75
5.1.2	Tenue de tension à fréquence industrielle.....	84
5.2	Détermination de la tension de claquage sous impulsion de foudre en fonction de la pression.....	89
5.2.1	Étude théorique	89
5.2.2	Étude expérimentale.....	95
Chapitre 6 - Modélisation électrothermique et simulation numérique.....		101
6.1	Tests expérimentaux.....	101
6.2	Modélisation géométrique du disjoncteur	103
6.3	Matériaux.....	105
6.4	Caractéristiques des gaz étudiés	113

6.4.1	Hexafluorure de soufre SF ₆	114
6.4.2	Azote N ₂	116
6.5	Modélisation mathématique	119
6.5.1	Courants électriques.....	119
6.5.2	Transfert de chaleur	120
6.5.3	Ecoulement laminaire	122
6.6	Maillage du modèle géométrique	123
6.7	Résultats et comparaison avec les tests expérimentaux	124
6.7.1	Simulation avec le SF ₆ à 1,5 bar abs.....	124
6.7.2	Simulation avec N ₂ à 2,5 bars abs.....	127
6.8	Simulation avec la solution hybride N ₂ et résine d'époxy	131
6.9	Simulation des tests diélectriques avec l'azote pur	135
6.9.1	Test de tenue en tension à fréquence industrielle	136
6.9.2	Simulation tests d'impulsions choc de foudre	139
	CONCLUSION.....	142
	Bibliographie (ou Références)	145
	Annexe A – Limites d'élévation de température selon CEI 62271-100 : 2007	150
	Annexe B – Résultats de simulation avec la résine d'époxy comme couche mince sur tous les conducteurs du disjoncteur.....	151

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Propriétés physico-chimiques du SF ₆ [6].....	8
Tableau 3.1 : Propriétés des gaz naturels [12]	21
Tableau 3.2 : Composition chimique de l'air sec [11].....	22
Tableau 3.3 : Propriétés de l'azote [11]	24
Tableau 3.4 : Propriétés du CF ₃ I [11] [14].....	28
Tableau 3.5 : Propriétés des perfluorokétones C ₅ F ₁₀ O et C ₆ F ₁₂ O [11].....	36
Tableau 3.6 : Mélanges gazeux binaires et tertiaire étudiés [19].....	39
Tableau 3.7 : Propriétés du gaz fluoronitrile [11].....	40
Tableau 3.8 : Propriétés de gaz hydrofluorooléfines [21].....	43
Tableau 3.9 : Quelques potentiels substitués du SF ₆ et leurs caractéristiques [11].....	50
Tableau 4.1 : Conditions de tests de tenue en fréquence industrielle – CEI 62271-100 [29]	55
Tableau 4.2 : Valeurs de la tension de fréquence industrielle selon les normes CEI et ANSI [28].....	56
Tableau 4.3 : Conditions de tests de choc de foudre – norme CEI 62271-1 [29].....	57
Tableau 4.4 : Valeurs de la tension de l'onde de choc de foudre selon les normes CEI et ANSI [28]	58
Tableau 4.5 : Tests de courant de courte durée [28]	64
Tableau 4.6 : Conditions de tests hors-phase – IEEE Std C37.09	66
Tableau 4.7 : Résumé des tests et normes selon CEI et IEEE	70
Tableau 5.1 : Composantes variables du générateur [34]	76
Tableau 5.2 : Résultats des tests aux chocs de foudre avec SF ₆ sous une pression de 1,5 bar abs.....	77
Tableau 5.3 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs à 170 kVp avec l'azote à 2,17 bars abs [34].....	78

Tableau 5.4 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs à 200 kV _p avec l'azote à 2,5 bars abs [47].....	79
Tableau 5.5 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec (80-20) N ₂ -CO ₂ à 2,7 bars abs	80
Tableau 5.6 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec (60-40) N ₂ -CO ₂ à 2,7 bars abs	80
Tableau 5.7 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec 70%N ₂ -30%N ₂ O à 2,5 bars abs.....	82
Tableau 5.8 : Tenue à fréquence industrielle 50 kV à 60 Hz pendant 60 s.....	85
Tableau 5.9 : Tenue à fréquence industrielle 60 kV à 60 Hz pendant 60 s.....	86
Tableau 5.10 : Tenue à fréquence industrielle 70 kV à 60Hz pendant 60s.....	86
Tableau 5.11 : Tenue à fréquence industrielle 80 kV à 60 Hz pendant 60 s.....	86
Tableau 5.12 : Tenue à fréquence industrielle avec l'azote à 2 bars abs	87
Tableau 5.13 : Tenue à fréquence industrielle de l'azote à 2,17 bars abs.....	88
Tableau 5.14 : Valeurs du coefficient G en configuration de champ uniforme et non-uniforme [45]	92
Tableau 5.15 : Valeurs estimées de la tension de claquage de l'azote en fonction de la pression	93
Tableau 5.16 : Valeurs estimées de la tension de claquage du SF ₆ en fonction de la pression.....	94
Tableau 5.17 : Essais de vérification des phases sous impulsions de foudre.....	97
Tableau 5.18 : Valeurs des tensions de claquage mesurées en fonction de la pression de gaz N ₂	97
Tableau 5.19 : Pressions minimales d'azote pour chaque type de disjoncteur VOX	100
Tableau 6.1 : Résultats des tests expérimentaux [35]	103
Tableau 6.2 : Propriétés du cuivre.....	106
Tableau 6.3 : Propriétés de l'aluminium.....	108
Tableau 6.4 : Propriétés du silicone	110

Tableau 6.5 : Propriétés de l'interrupteur à vide.....	111
Tableau 6.6 : Propriétés de la résine d'époxy	113
Tableau 6.7 : Propriétés du gaz SF ₆	114
Tableau 6.8 : Propriétés du gaz N ₂	116
Tableau 6.9 : Résultats de simulation des tests avec le SF ₆	125
Tableau 6.10 : Résultats de simulation des tests avec le N ₂	129
Tableau 6.11 : Résultats de simulation avec la solution hybride N ₂ +résine d'époxy	133
Tableau 6.12 : Conductivité électrique de l'azote à partir des tests expérimentaux	136
Tableau 6.13 : Résultats de simulation de tests de tenue à fréquence industrielle.....	136
Tableau 6.14 : Résultats de simulation avec l'azote à 2,17 bars abs	140

Liste des figures

Figure 2.1 : Domaine de recherche	4
Figure 2.2 : Conductivité thermique de l'azote et du SF ₆ en fonction de la température [1]	7
Figure 2.3 : Principe d'un interrupteur sous vide et exemple de son emplacement dans un disjoncteur [4]	12
Figure 2.4 : Emplacement et caractéristiques principales du VOX [CO7 Internal document]	13
Figure 2.5 : Interrupteurs à vide et traversée du VOX [CO7 Internal document]	15
Figure 2.6 : Concentration du SF ₆ dans l'atmosphère en fonction du temps [3]	16
Figure 3.1 : Diagramme de mesure des propriétés diélectriques d'un gaz [23].....	20
Figure 3.2 : Influence des barrières diélectriques entre deux électrodes sur la résistance diélectrique dans l'air sec [12].....	22
Figure 3.3 : Joint en élastomère pour isolation d'une ampoule à vide et son montage [13].....	23
Figure 3.4 : Tension maximale entre une sphère de diamètre 19 mm et une électrode haute tension négative dans SF ₆ (lignes brisées) et N ₂ +CO ₂ (lignes continues) [10]	27
Figure 3.5 : Courbe de pression de vapeur saturante du SF ₆ et CF ₃ I [15]	28
Figure 3.6 : Équipement de tests expérimentaux [16].....	29
Figure 3.7 : Tension de claquage du mélange CF ₃ I/CO ₂ dans une configuration d'électrodes sphère-sphère en polarité positive (a) et négative (b) [16]	30
Figure 3.8 : Circuit d'essai de l'équipement expérimental de chocs de foudre et les configurations d'électrodes a) tige-plan et b) plan-plan [14].....	30
Figure 3.9 : Tension U ₅₀ en fonction de la distance inter électrode dans une configuration tige-plan d'un mélange gazeux (30%-70%) CF ₃ I/CO ₂ à des pressions de 1 et 2 bars et pour les deux polarités d'impulsions de choc de foudre [14]	31

Figure 3.10 : Tension U_{50} en fonction de la distance inter électrode dans des configurations tige-plan et plan-plan d'un mélange gazeux (30%-70%) CF_3I/CO_2 à la pression 1 bar et pour les deux polarités d'impulsions de choc de foudre [14]	31
Figure 3.11 : Banc d'essai expérimental [17]	32
Figure 3.12 : Tension de claquage DC de mélange gazeux CF_3I/N_2 à 0,75 mm de gap [4]	33
Figure 3.13 : Influence du taux de CF_3I et SF_6 pour $Pd=2$ mm.bar et $Pd=4$ mm.bar [4]	34
Figure 3.14 : Pression de liquéfaction et champ réduit critique des mélanges CF_3I/N_2 en fonction du taux de CF_3I [4]	34
Figure 3.15 : Disjoncteur monophasé 24 kV isolé au gaz et vue d'ensemble du banc d'essai [4]	35
Figure 3.16 : Tenue diélectrique relative et température d'ébullition des composants de gaz [19]	37
Figure 3.17 : Cellule d'essai pour les mesures en tension AC et chocs de foudre [19]	38
Figure 3.18 : Tenue diélectrique alternative pour T_1 , SF_6 , air sec et CO_2 [19]	39
Figure 3.19 : Tenue diélectrique en impulsions (+) pour T_1 , B_1 , B_2 , B_3 , SF_6 , air sec et CO_2 [19]	40
Figure 3.20 : Schéma de l'équipement de test [20]	41
Figure 3.21 : Tension de claquage AC des mélanges Fluoronitrile/ CO_2 , SF_6 à 0,1MPa et 20°C, en configuration sphère-sphère rapportée à la configuration plan-plan [20]	42
Figure 3.22 : Comparaison des mesures de claquage obtenues en HFO, SF_6 et air sec en champ uniforme, versus produit (Pression x distance). Rampe DC 1kV/s, $d = 5$ mm [21]	44
Figure 3.23 : Tension de claquage en fonction de la pression en géométrie pointe-plan sous tension de choc, du HFO, SF_6 et air sec, $d = 5$ cm [21]	44
Figure 3.24 : Schéma de l'équipement expérimental de test pour les mesures de tension de claquage [22]	45
Figure 3.25 : Tension de claquage des mélanges HFO1234ze/ CO_2 et du CO_2 pur en fonction de la pression pour l'électrode plane supérieure	

soumise à une contrainte négative (électrodes à aiguilles mises à la terre) [22].....	46
Figure 3.26 : Tension de claquage des mélanges HFO1234ze/ CO ₂ et du CO ₂ pur en fonction de la pression pour l'électrode plane supérieure sollicitée positivement (électrodes à aiguilles mises à la terre) [22]	46
Figure 3.27 : a) Tension de claquage U_{bd} crête AC, b) intensité du champ critique réduit des gaz N ₂ O, CO ₂ et N ₂ O/CO ₂ pour différentes pressions et à une séparation de 5 mm [38].....	48
Figure 3.28 : Pouvoir oxydant des mélanges binaires N ₂ O/N ₂ et N ₂ O/CO ₂ [38]	49
Figure 3.29 : Résumé des solutions alternatives au SF ₆ en fonction de leur température d'ébullition et de leur tenue diélectrique par rapport au SF ₆	51
Figure 4.1 : Procédure d'essai de tenue en tension ca et cc a) Conventiennel ; b) avec DP surveillées [25].....	55
Figure 4.2 : Onde normalisée 1,2/50 μ s par CEI 60060-1 [28]	57
Figure 4.3 : Circuit de test pour commutation de courant capacitif – CEI 62271-100	66
Figure 4.4 : Interrupteurs à vide a) VG4A-1250 A et b) VG5-2000 A du VOX.....	67
Figure 4.5 : Circuit de test pour commutation hors-phase monophasé – CEI 62271-100.....	68
Figure 5.1 : Schéma électrique du générateur d'impulsions de foudre à deux étages [34]	76
Figure 5.2 : Résumé des résultats de tests d'impulsions de foudre normalisées selon CEI	84
Figure 5.3 : Schéma du circuit de test de tenue de tension à fréquence industrielle	85
Figure 5.4 : Résultats des tests de tenue à fréquence industrielle avec l'azote pur et le SF ₆	89
Figure 5.5 : Formation d'arc électrique lors des essais sous l'air atmosphérique.....	91
Figure 5.6 : Courbe de la tension de claquage de l'azote en fonction de la pression d'azote	93

Figure 5.7 : Courbes de la tension de claquage en fonction de la pression pour N_2 et SF_6	95
Figure 5.8 : Banc de test expérimental pour les tests aux chocs de foudre avec les équipements de Energie Conseil Olivier.....	96
Figure 5.9 : Variation de la tension de claquage aux chocs de foudre avec la pression de l'azote	98
Figure 5.10 : Courbe de tendance de la variation de la tension disruptive avec la pression – N_2 [Rapport ECO- 2023].....	99
Figure 6.1 : Setup expérimental [35]	102
Figure 6.2 : Emplacements des thermocouples [35]	102
Figure 6.3 : Vue de face du disjoncteur VOX.....	104
Figure 6.4 : Interrupteur à vide VG5 en position fermée.....	104
Figure 6.5 : Vue de profil du modèle 3D du disjoncteur VOX.....	104
Figure 6.6 : Conducteurs en cuivre	105
Figure 6.7 : Courbe de chaleur spécifique du cuivre en fonction de la température	107
Figure 6.8 : Courbe de conductivité thermique du cuivre en fonction de la température	107
Figure 6.9 : Sabots conducteurs en aluminium.....	108
Figure 6.10: Première modélisation de l'isolation en silicone des traversées du VOX	109
Figure 6.11 : Conducteurs des traversées recouverts de silicone comme isolation	110
Figure 6.12 : Surface externe des interrupteurs à vide en céramique	111
Figure 6.13 : Conductivité thermique de l'interrupteur à vide [31].....	112
Figure 6.14 : Conducteurs recouverts de couche de résine d'époxy.....	113
Figure 6.15 : Conductivité thermique du SF_6	115
Figure 6.16 : Viscosité dynamique du SF_6	115
Figure 6.17 : Capacité thermique à pression constante du SF_6	116

Figure 6.18 : Conductivité thermique du N ₂	117
Figure 6.19 : Viscosité dynamique du N ₂	118
Figure 6.20 : Capacité thermique à pression constante du N ₂	118
Figure 6.21 : Maillage du disjoncteur	124
Figure 6.22: Distribution de température dans les conducteurs à la fin des tests	125
Figure 6.23 : Différence de température entre les tests expérimentaux et la simulation numérique a) sur la phase 1, b) sur la phase 2	126
Figure 6.24 : Distribution de température sur les conducteurs avec N ₂ pur à 2,5 bars abs	127
Figure 6.25 : Température maximale des conducteurs et points d'arrêt des tests avec N ₂ et SF ₆ comme gaz d'isolation	128
Figure 6.26 : Comparaison entre les résultats de simulation avec N ₂ et SF ₆ à la fin des tests sur a) sur la phase 1, b) sur la phase 2	130
Figure 6.27 : Surfaces des conducteurs à isoler avec de la résine d'époxy	131
Figure 6.28 : Résultats de simulation avec la solution hybride.....	132
Figure 6.29 : Comparaison des résultats entre les solutions et les expériences sur quelques emplacements des thermocouples	135
Figure 6.30 : Courbes de champs électriques maximaux dans le gaz N ₂	137
Figure 6.31 : Tendence tension de claquage vs pression des gaz testés [40].....	138
Figure 6.32 : Champ électrique de claquage en fonction de la pression [41]	138
Figure 6.33 : Courbe de tension choc de foudre normalisée (1,2/50µs)	139
Figure 6.34 : Courbe de champ électrique maximum des tests d'impulsions de foudre.....	141

Liste des symboles

Les symboles doivent être présentés par ordre alphabétique, les lettres grecques se trouvant à la fin, suivies par les symboles qui ne sont pas alphanumériques.

ANSI: American National Standards Institute

BIL: Basic Insulation Level

C.B : Circuit-Breaker

CEI : Commission Électrotechnique Internationale

GWP: Global Warming Potential

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

ODP: Ozon Depletion Potential

TRV: Transient Recovery Voltage

Chapitre 1 - Introduction

Les disjoncteurs sont des appareillages électriques destinés à établir, supporter et couper des courants sous sa tension assignée, dans les conditions normales de service et dans des conditions anormales spécifiées (court-circuit, rupture ou discordance des phases, etc.). Dans le domaine de la moyenne tension, ils sont généralement isolés soit par un diélectrique gazeux ou par l'air pour éliminer d'une part l'arc électrique généré lors de la coupure ou du rétablissement du courant et d'autre part les décharges électriques pour protéger les utilisateurs et le milieu extérieur environnant [4]. Le gaz le plus utilisé pour assurer cette fonction est l'hexafluorure de soufre SF₆.

1.1 Problématique

L'hexafluorure de soufre, SF₆, se retrouve dans les plusieurs équipements de transmission et de distribution en haute et moyenne tension ainsi que dans les sous-stations depuis de nombreuses années. Ceci est dû à ses excellentes performances en termes d'isolation et d'extinction d'arc électriques comme sa stabilité à haute température, sa bonne capacité thermique, sa compatibilité avec les matériaux des appareils électriques et surtout sa haute résistance diélectrique. Il a supplanté principalement l'air et l'huile à cause des insuffisances observées de ces derniers. Cependant, le SF₆ possède de nombreuses caractéristiques indésirables telles que son effet radiatif et sa durée de vie atmosphérique qui est de l'ordre de plusieurs siècles en raison de sa résistance à la dégradation photochimique. Son potentiel de réchauffement global (PRG) est environ 23900 fois supérieur à celui du CO₂ sur une

période de 100 ans, le faisant ainsi un des plus puissants gaz à effet de serre. De ce fait, le protocole de Kyoto sur le changement climatique en 1997 a fortement encouragé le contrôle de l'utilisation du SF₆, la réduction des émissions dans l'atmosphère et la recherche active de gaz alternatifs éco-efficaces en vue de remplacer progressivement le SF₆ dans l'industrie électrique. La mise en place de plusieurs restrictions et sanctions par les organismes et gouvernements internationaux pourrait survenir dans les années à venir comme le Canada, qui par exemple, verra sa taxe carbone passer de 30 \$CAD en 2020 à 170 \$CAD par tonne en 2030 pour faciliter sa transition vers la carboneutralité fixée en 2050 [1 - 4].

C'est dans cette optique que plusieurs recherches ont été entamées par les experts et industriels du secteur de l'énergie électrique pour trouver un gaz ou mélange de gaz qui va remplacer le SF₆ dans les équipements électriques avec la possibilité de pouvoir fonctionner dans une plage de température allant jusqu'à -40°C en zones froides. Ces recherches ont abouti à des solutions plus ou moins satisfaisantes pouvant remplacer partiellement le SF₆ à cause de leur température d'ébullition très élevée non adéquate à un fonctionnement en zone froide. Par la suite, plusieurs mélanges de gaz ont été explorés et étudiés pour trouver un remplacement total ou partiel du SF₆ dans les disjoncteurs moyenne tension tout en assurant le fonctionnement en zone froide avoisinant -40°C.

1.2 Objectifs et sous-objectifs

L'objectif de ce travail est de trouver une alternative gazeuse au SF₆ comme isolation gazeuse pour remplacer le SF₆ dans les disjoncteurs moyenne tension à coupure dans le vide fabriqués chez CO7 Technologies Inc. tout en conservant la structure mécanique et les performances électriques. Dans ce mémoire, nous nous focaliserons que sur les alternatives au SF₆ n'incluant pas les mélanges à base de SF₆. Pour ce faire, ce travail est subdivisé en 4

parties : le premier chapitre présentera le SF₆ ainsi que son utilisation dans l'industrie électrique plus particulièrement dans les disjoncteurs ainsi que ses inconvénients majeurs limitant aujourd'hui son utilisation ; le second chapitre traitera les solutions alternatives au SF₆ jusqu'ici découvertes à travers les moyens et cellules de tests mis en place pour déterminer leurs caractéristiques diélectriques suivant les normes IEEE et CEI ; le troisième chapitre traitera les tests et normes ainsi que les arguments techniques nécessaires pour les tests requis, le chapitre 4 présentera le banc d'essai expérimental pour chaque test ainsi que les résultats des tests effectués en conformité avec les normes pertinentes et le dernier chapitre montrera la simulation numérique sous COMSOL Multiphysics et les résultats obtenus avec les solutions proposées.

Chapitre 2 - Le SF₆ et l'industrie électrique

2.1 Domaine de recherche

Le projet de recherche est à la croisée de plusieurs domaines de recherche, comme le montre la figure ci-dessous, faisant ainsi sa spécificité et sa particularité tant du côté scientifique que du côté industriel. L'aboutissement de ce mémoire passe d'abord par une évaluation du ou des gaz éco-efficaces avec des tests diélectriques selon les normes pertinentes, mais aussi à une simulation numérique couplant la dynamique des fluides et l'électromagnétisme sous COMSOL du modèle de disjoncteur pour justifier la capacité thermique du nouveau système d'isolation sous les conditions d'opérations spécifiées.

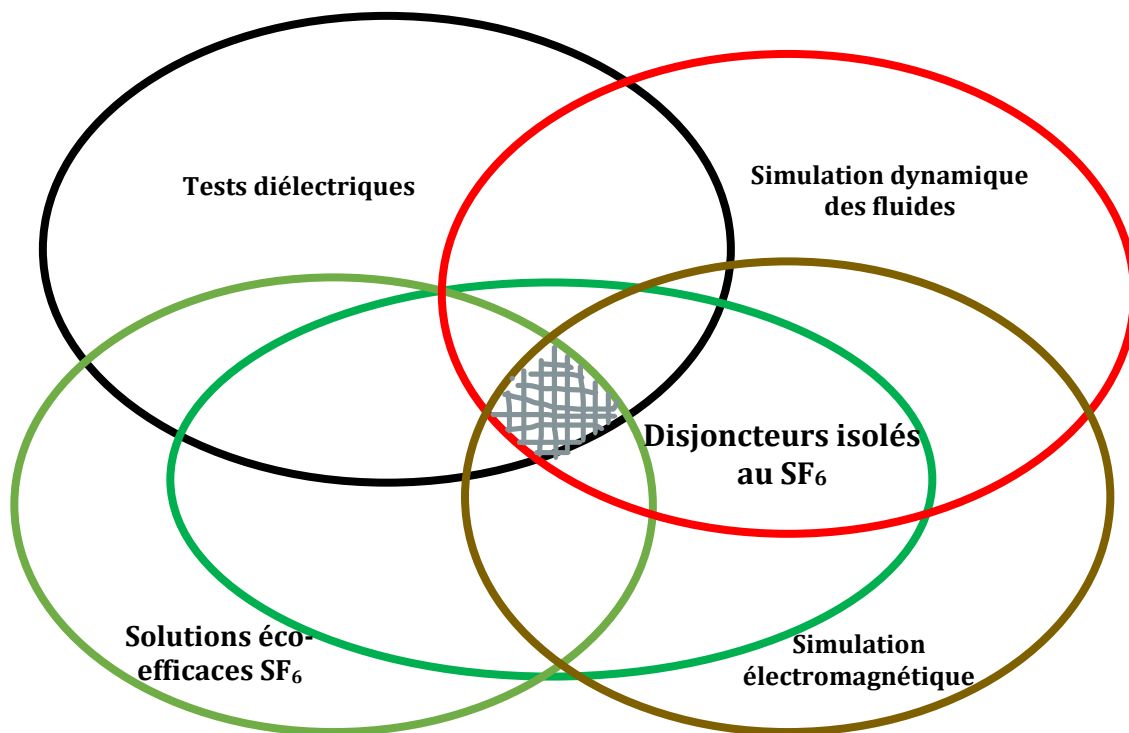


Figure 2.1 : Domaine de recherche

2.1.1 Mots-clés

Les mots-clés résumant les travaux effectués sont les suivants :

Disjoncteur moyenne tension, gaz d'isolation, hexafluorure de soufre, alternatives au SF₆, gaz d'isolation éco-efficace, Bancs d'essai expérimentaux, tension de claquage, élévation de température, méthode de résolution numérique de dynamique des fluides, méthode de résolution numérique électromagnétique, analyse numérique.

2.1.2 Bases de données

Les bases de données explorées tout au long de cette recherche sont les suivantes :

- Sofia de la bibliothèque de l'UQTR qui regroupe plusieurs articles et publications scientifiques disponibles dans le réseau de l'Université du Québec ;
- IEEE Xplore (version mobile) rassemblant les articles, conférences et publications scientifiques de IEEE ;
- Researchgate, réseau social et plateforme scientifique où l'on peut disposer directement des travaux scientifiques d'un auteur ou d'en faire la demande ;
- Molecular Diversity Preservation International (MDPI), plateforme multidisciplinaire regroupant plus de 500 000 articles scientifiques ;
- Google Scholar, outil permettant d'explorer un large éventail d'articles universitaires.

2.2 Généralités sur l'hexafluorure de soufre SF₆

2.2.1 Le SF₆ et ses propriétés

L'hexafluorure de soufre (SF₆) est un gaz artificiel faisant partie de la famille des gaz fluorés et en son état normal, c'est un gaz incolore, inodore, non inflammable, non explosif et thermiquement stable. Il fut élaboré en 1900 par Moissan et Lebeau à partir du soufre et du fluor par électrolyse selon la réaction exothermique suivante :



C'est un gaz chimiquement inerte car il ne se décompose pas à l'état gazeux à des températures moins de 500°C et possède d'excellentes propriétés thermodynamiques notamment une énergie de dissociation et une enthalpie élevée. Le SF₆ possède aussi de bonnes propriétés diélectriques dues à son caractère électronégatif de sa molécule qui a une tendance marquée à capturer les électrons libres pour former des ions lourds (processus d'attachement) et peu mobiles réduisant ainsi considérablement le risque d'avalanche électronique pouvant mener au claquage : c'est ce qui confère au SF₆ sa haute rigidité électrique [1-4]. De plus, sa résistance diélectrique à la pression atmosphérique et à température ambiante est 3 fois supérieure à celle de l'air et elle augmente avec l'accroissement de la pression. Grâce à sa bonne capacité de transfert thermique, le SF₆ se reconstitue rapidement lorsqu'il est dissocié sous conditions de gaz à haute pression lors d'une décharge ou arc électrique et les sous-produits issus de sa décomposition (S₂F₁₀, SOF₂, SF₄, etc.) n'impactent pas significativement sa résistance diélectrique. L'un des excellents avantages qui différencie le SF₆ des autres gaz isolants est sa température d'ébullition relativement basse, -64°C. C'est pourquoi ce gaz s'est avéré comme le gaz isolant le plus idéal en termes de point d'ébullition et de propriétés d'isolation d'autant plus qu'il peut conserver

ses propriétés d'isolation même à basse pression. La figure 2.2 montre que la conductivité thermique du SF₆ est inférieure à celle de l'air, mais indique que le SF₆ a des capacités d'extinctions d'arc électriques à haute température, raison pour laquelle il est utilisé dans plusieurs applications comme milieu de coupure d'arc électrique [1-5]. Le tableau 1 présente les propriétés générales du SF₆ [6].

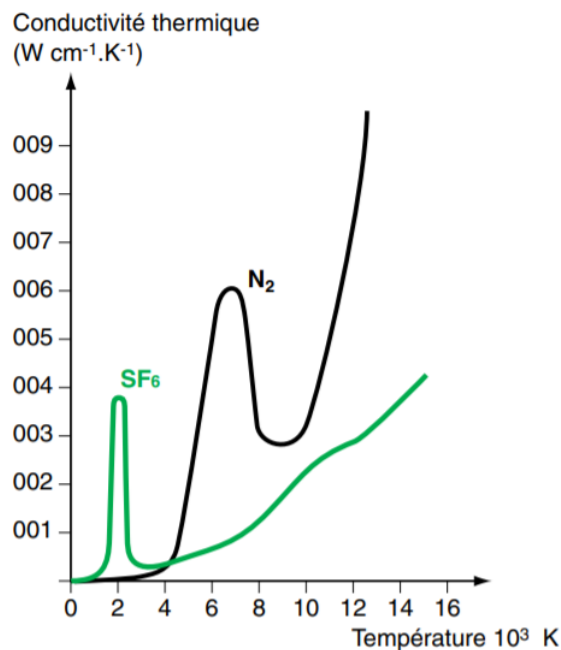


Figure 2.2 : Conductivité thermique de l'azote et du SF₆ en fonction de la température [1]

Tableau 2.1 : Propriétés physico-chimiques du SF₆ [6]

Formule chimique	SF₆
Masse moléculaire (g/mol)	146,06
Nombre d'électrons	77
Pression de liquéfaction à -30°C (MPa)	0,52
Point d'ébullition à 0.1 MPa (°C)	-63,8
Conductivité thermique (mW/mK)	12,058
Potentiel de déplétion d'ozone	0
Potentiel de réchauffement global (PRG)	23500
Durée de vie atmosphérique (ans)	3200
Toxicité (LC50 (rat))	> 500 000
Flammabilité	Non
Corrosion	Non

2.2.2 Utilisation du SF₆ dans l'industrie électrique

Comme précisé tout en amont, le SF₆ est le gaz le plus utilisé comme moyen d'isolation électrique, d'interruption de courant ou d'extinction d'arc dans les équipements de transmission et de distribution d'énergie électrique. C'est un gaz qui est compatible chimiquement avec la plupart des conducteurs et isolants utilisés dans les équipements électriques à des températures jusqu'à 200°C. Environ plus de 80% de la production mondiale de SF₆ est utilisée par l'industrie électrique [3]. Ce gaz est retrouvé principalement dans 4 types équipements :

- Dans les lignes de transmission isolées au gaz dont le comportement du milieu diélectrique gazeux sous conditions industrielles (contamination des particules métalliques, interrupteurs et coup de foudre, fatigues transitoires) et la capacité de transfert de chaleur sont d'une grande importance. L'utilisation du SF₆ comme milieu isolant permet d'avoir une disponibilité pour tout type de tension, une capacité de transport élevé, une rentabilité avec moins de pertes et enfin constitue une solution compacte aux lignes de transmission aériennes à haute tension dans les zones encombrées ;
- Dans les transformateurs isolés au gaz où la capacité de refroidissement, la compatibilité avec les matériaux solides et les caractéristiques de décharges partielles ont permis au SF₆ d'être le premier choix comme isolant au détriment de l'huile. Le SF₆ offre une haute fiabilité, une réduction de la maintenance, une durée de vie assez longue de l'équipement, une réduction du bruit et moins de problèmes environnementaux relatifs comparativement à l'huile ;
- Dans les disjoncteurs isolés au gaz, cas qui nous intéressent où l'utilisation du SF₆ est due à sa bonne conductivité thermique et sa haute résistance diélectrique. En effet, lors de la coupure dans le SF₆, ce dernier 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 baisse, la température diminue et les ions et électrons se recombinaient pour reconstruire la molécule SF₆. De même, sa température d'ébullition très basse -64°C permet aux disjoncteurs d'être opérationnels dans les zones froides sans possibilité de liquéfaction du gaz.
- Dans les sous-stations isolées au gaz qui sont principalement composées de disjoncteurs, transformateurs, jeux de barres, lignes de transmission etc. tous isolés

par un diélectrique gazeux, l'utilisation du SF₆ est pertinente comme nous l'avons précisée ci-haut [4][5].

Avec toutes ses excellentes qualités chimiques, thermiques et diélectriques, le SF₆ joue un rôle capital et est rapidement devenu un gaz indispensable dans de très nombreux appareillages électriques. Son utilisation comme milieu isolant au détriment de l'air a permis de réduire aussi fortement l'encombrement des appareillages à haute tension et contribué à la facilité de maintenance.

2.2.3 Présentation des disjoncteurs à coupure dans le vide isolés au SF₆

2.2.3.1 Généralités

Les disjoncteurs, tous comme les autres appareillages (sectionneurs, interrupteurs-sectionneurs, ré-enclencheurs), sont des éléments essentiels dans la transmission et la distribution de l'énergie électrique contribuant ainsi à sa fiabilité et à sa sécurité. Pour les disjoncteurs, ils permettent de contrôler le flux d'énergie en coupant ou en établissant le courant dans un réseau électrique en toute sécurité. En position ouvert, ils doivent assurer l'isolement sur la distance de commutation entre les phases et avec la terre; en position fermée, ils doivent permettre la circulation de l'énergie en minimisant les pertes. Ils peuvent interrompre les courants de court-circuit en toute fiabilité sans subir de dommages ni détériorer les équipements voisins même après de longues périodes d'inactivité.

En moyenne tension, les disjoncteurs sont généralement installés sur des lignes allant jusqu'à 35 kV selon la norme CEI 60038 ou jusqu'à 100 kV suivant la norme ANSI C84.1-2016 dans le but de commander, protéger et isoler les équipements de réseaux de distribution électrique.

Concernant les disjoncteurs, il y en a une variété et on peut les classer par type d'isolement, par type d'interrupteur ou par construction :

- Classification par isolation : généralement l'isolation est assurée par un gaz (air, SF₆, azote, CO₂ ou un mélange gazeux), ou par un liquide (esters, huile, etc.) ou par du matériau diélectrique solide ;
- Classification par technologie de coupure : disjoncteurs à isolation dans l'air, disjoncteurs à isolation gazeuse, interrupteurs sous vide, disjoncteur à huile ;
- Construction : application extérieure (montage sur poteau, support de voûte) qui doit avoir une large plage de température et une résistance à l'arc, application intérieure, réservoir avec ouverture / réservoir scellé à vie, métal plaqué / métal fermé.

Pour la grande majorité des disjoncteurs en moyenne tension isolé au gaz pour une application extérieure, la coupure du courant se fait dans le vide (10^{-6} ou 10^{-8} torr) car cette technique est très simple, efficace et permet d'optimiser la taille des disjoncteurs tout en réduisant les coûts de maintenance. En général, la coupure est réalisée à l'intérieur d'une ampoule étanche où le vide est maintenu. Cette ampoule est composée principalement de deux contacts dont l'un fixe et l'autre mobile permettant de rétablir ou interrompre le courant, d'une enveloppe généralement en céramique, d'un soufflet métallique assurant l'étanchéité de l'enveloppe tout en permettant le déplacement du contact mobile, et d'un écran métallique pour protéger la face interne contre la condensation de vapeurs métalliques générées par l'arc électrique. L'isolation externe de l'interrupteur à vide est assurée généralement par un gaz permettant de limiter les décharges partielles, empêcher le claquage à l'extérieur de l'interrupteur et l'échauffement causés par l'arc électrique formé lors de l'ouverture ou de la fermeture des électrodes du disjoncteur [4].

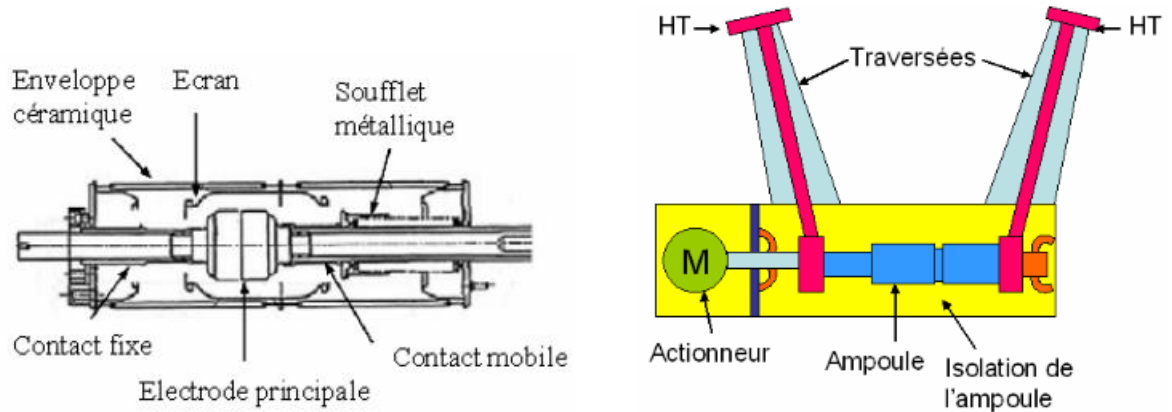
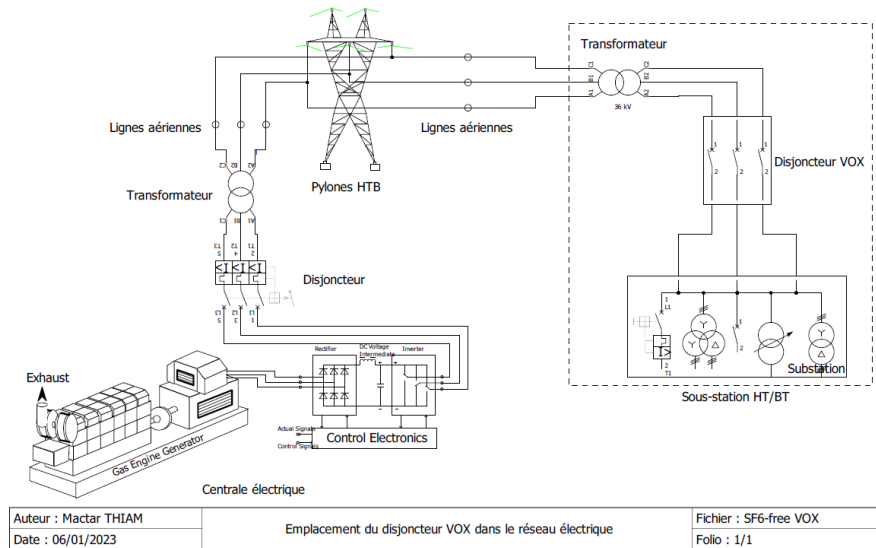


Figure 2.3 : Principe d'un interrupteur sous vide et exemple de son emplacement dans un disjoncteur [4]

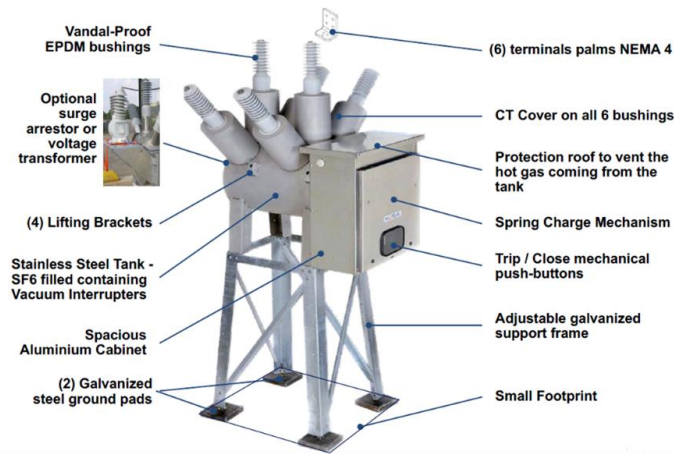
2.2.4 Présentation du disjoncteur VOX de CO7 Technologies Inc.

Cette partie concerne la présentation du disjoncteur VOX, ancienne propriété de Areva puis de Schneider Electric et maintenant acquis par l'entreprise CO7 Technologies, nous servira d'application tout au long de cette étude. Le VOX est un disjoncteur moyenne tension à coupure dans le vide et isolé au gaz SF₆ avec une tension nominale qui peut aller jusqu'à 38 kV (15; 27,5 ou 38 kV). Il est fabriqué actuellement à Montréal, Province du Québec, Canada dans les locaux de CO7 Technologies Inc. et commercialisé dans plusieurs pays du monde entier. C'est un disjoncteur disponible en 6 types dépendamment du courant nominal (1200 ou 2000 A) et du courant de court-circuit (25; 31,5 et 40 kA) avec une plage de température de fonctionnement pour une utilisation extérieure allant de -40 à +40 °C avec une option qui peut aller jusqu'à -60 °C. Il offre une performance diélectrique et mécanique élevée car il a été conçu et testé pour répondre aux normes IEEE, CEI, British standard (BS), American Standard (AS), à la certification russe GOST et aux normes chinoises Guobiao Standards (GB). Ce type de disjoncteur est différent des disjoncteurs isolés à l'air (Air-insulated switchgears) qui sont classés comme des gainés de métal ou sous enveloppe

métallique ayant de vastes barrières, des bus primaires recouverts d'isolation et utilisant des interrupteurs à vide pour interrompre les défauts. Les caractéristiques du VOX et un exemple d'emplacement dans le réseau sont montrés aux figures suivantes.



a)



b)

Figure 2.4 : Emplacement et caractéristiques principales du VOX [CO7 Internal document]

Quant à sa conception interne, ce disjoncteur est composé de 3 ensembles d'interrupteurs à vide hautement fiables montés à l'intérieur du réservoir rempli de SF₆ et scellé à vie. Le réservoir est rempli de gaz à travers une valve DILO à une pression de 1,5 bar abs et la pression minimale de fonctionnement est de 1,3 bar. Le VOX, en acier inoxydable 3 mm, a été construit sans joint d'étanchéité et présente un risque de fuite négligeable inférieur à 0,1% par an. Son réservoir cylindrique avec une indice de protection IP67 offre une meilleure conception pour les problèmes diélectriques et de pression et une insensibilité totale aux composants intérieurs à la pollution, à l'eau et à l'humidité : ce disjoncteur ne présente aucune porosité au gaz et est inerte en zone polluée ou salée. Ses traversées en polymère sont de type Ethylene Propylene Diene Monomer (EDPM). Elles répondent aux conditions climatiques sévères (ligne de fuite de 31,5 mm/kV), présentent une haute résistance mécanique, une excellente résistance aux intempéries, à l'ozone, à l'usure et aux environnements agressifs et sont testées de manière approfondie selon toutes les normes pertinentes (IEEE, CEI, ANSI). Son interrupteur à vide, de type VG4A ou VG5 dépendamment du courant nominal, a une construction scellée à vie, une conception sans maintenance, une durée de vie de 30 000 opérations fermeture-ouverture sans charge et peut effectuer 100 interruptions en court-circuit.



Figure 2.5 : Interrupteurs à vide et traversée du VOX [CO7 Internal document]

2.3 Inconvénients du SF₆

Malgré son utilité incontournable dans le domaine de l'énergie électrique, le SF₆ présente des effets indésirables sur l'environnement. En effet, le rejet de ce gaz dans l'atmosphère crée un effet de serre important avec un coefficient de réchauffement global GWP, sur une période de 100 ans, égal à 23 900 fois celui du CO₂ considéré comme référence : cela montre à quel point le rejet de ce gaz est agressif vis-à-vis de l'atmosphère. Les gaz à effet de serre peuvent être définis comme des gaz atmosphériques qui absorbent le rayonnement infrarouge émis par la Terre et le renvoient ensuite vers la Terre plutôt que de lui permettre de s'échapper dans l'espace. Ce phénomène contribue à une augmentation de la température moyenne de la Terre entraînant une perturbation de l'écosystème actuel ainsi qu'un réchauffement climatique avec de nombreux effets tels que la montée du niveau de la mer, l'acidification des océans dans le monde ou le retrait glaciaire [4][6][7]. Depuis les années 1970, la production mondiale de SF₆ ne cesse d'augmenter entraînant ainsi une forte concentration de SF₆ dans l'atmosphère. Avec le développement des réseaux électriques et l'augmentation progressive du niveau de tension des équipements, l'utilisation de SF₆ augmente progressivement et sa quantité dans l'atmosphère croît à un taux assez élevé car dans plusieurs applications, le SF₆ n'est pas récupérable et les émissions proviennent des fuites normales des équipements, de la maintenance, de la manipulation, des tests. Il faut donc nécessairement mettre en place des réglementations et dispositions adéquates de récupération du gaz sinon toute la production de SF₆ sera rejetée dans l'atmosphère.

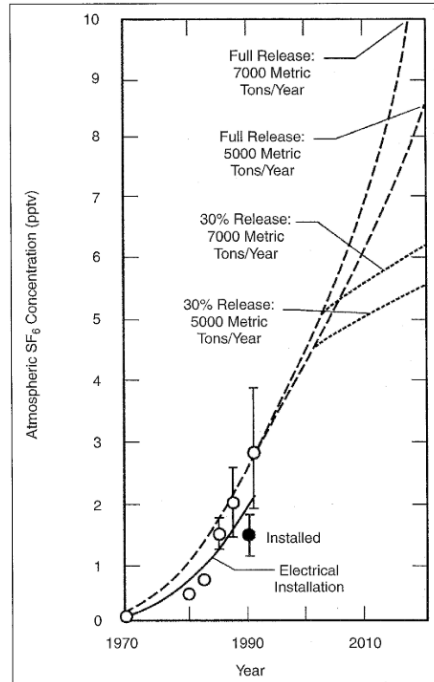


Figure 2.6 : Concentration du SF₆ dans l'atmosphère en fonction du temps [3]

Enfin, le SF₆ a été classé comme l'un des gaz à effet de serre les plus puissants par le protocole de Kyoto en 1997 en raison de son potentiel de réchauffement global élevé et sa durée de vie atmosphérique très longue. Ce protocole recommande la réglementation sur la surveillance et le confinement du SF₆, la réduction progressive des émissions de SF₆, la recherche active d'alternatives sur les technologies utilisant le SF₆ et l'engagement à rendre disponible toute solution industriellement viable [8].

En résumé, l'hexafluorure de soufre est un des meilleurs gaz diélectriques pour presque toutes les applications à moyenne et haute tension. Il est facile à utiliser, présente des propriétés d'isolation exceptionnelles et a prouvé ses performances par de nombreuses années d'utilisation et d'investigation. Cependant, ses inconvénients, impactant négativement l'environnement et contribuant ainsi au réchauffement climatique, précipitent son abolition dans l'industrie électrique et obligent les constructeurs et utilisateurs à

rechercher activement des moyens et solutions pour réduire les rejets dans l'environnement et mettre en place un nouveau type de gaz éco-efficace au SF₆.

Chapitre 3 - État de l'art sur les alternatives au SF₆ dans les disjoncteurs

Pour remplacer le SF₆, plusieurs solutions ont été explorées, étudiées et quelques-unes ont été implantées par des industriels marquant ainsi le début d'une nouvelle ère sans SF₆. Il faut savoir que pour être utilisées dans les disjoncteurs, ces alternatives au SF₆ doivent respecter une longue liste d'exigences à savoir :

- Haute résistance diélectrique ;
- Stabilité chimique ;
- Bonne capacité d'extinction d'arc si la coupure se fait dans le milieu gazeux ;
- Compatibilité avec les autres matériaux car la nouvelle solution gazeuse ne doit pas créer une corrosion des éléments du disjoncteur réduisant la durée de vie de l'appareillage ;
- Température d'ébullition basse et pression de vaporisation élevée à basse température pour éviter la condensation dans les plages de température de fonctionnement ;
- Potentiel de réchauffement global (PRG) et potentiel de dégradation d'ozone (PDO) très faibles voire nuls par rapport au SF₆ car la nouvelle solution doit être éco-efficace avec un impact environnemental aussi faible que possible ;
- Non explosif, non inflammable ;
- Faible toxicité ;

- Facilité de manipulation lors des travaux de maintenance avec une méthode sûre de transport et d'entretien de l'appareillage une fois rempli pour assurer la protection des opérateurs [5].

En plus de cela, la performance d'isolation des gaz est déterminée par :

- les paramètres macroscopiques tels que la tension de claquage et la tension d'apparition des décharges partielles qui peuvent être obtenus par mesures expérimentales ;
- les paramètres microscopiques incluant le coefficient d'ionisation α , le coefficient d'attachement η , le coefficient d'ionisation efficace $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$, obtenus par mesure expérimentale basée sur la méthode de régime permanent (steady-state Townsend (SST)), le coefficient de diffusion et la vitesse de dérive des électrons. Ces coefficients susmentionnés sont approximatifs et ont été obtenus pour la plupart des recherches dans des conditions de champ uniforme pour des pressions comprises entre 0 et 1 bar, plage plus faible que celle utilisée dans la pratique industrielle où les conditions d'application réelles sont généralement des pressions comprises entre 1 et 5 bars avec un champ intense généralement non uniforme. Le champ critique réduit $\left(\frac{E}{N}\right)_{cr}$, de même que la vitesse de dérive des électrons (electron drift velocity), caractéristiques de référence pour la mesure de claquage des gaz, peuvent être obtenus lorsque le coefficient d'ionisation efficace $\bar{\alpha} = 0$, c'est-à-dire lorsque α et η sont égaux. La résolution de l'équation de Boltzmann ou la simulation de Monte Carlo permettent aussi de déterminer ces paramètres [5].

Au regard de cette liste d'exigences, le remplacement intégral du SF₆ semble être difficile voire impossible si on veut assurer les fonctions isolation et coupure d'arc simultanément. Dans le domaine de la moyenne tension, la technique de coupure à vide devient intéressante

d'autant plus qu'elle permet au gaz SF₆ d'assurer seulement la fonction isolation de l'interrupteur et des jeux de barres. Dans cette section, le contenu ainsi que les méthodes en théorie et en expérience des recherches des candidats au remplacement du SF₆ sont examinés du point de vue des performances d'isolation.

La méthode traditionnelle d'étude des propriétés diélectriques d'un gaz est caractérisée par des expériences de claquage du milieu gazeux avec des configurations d'électrodes représentant la distribution du champ électrique à l'intérieur du disjoncteur et de tensions continue, alternative ou des impulsions de foudre (voir figure 3.1) [5][23].

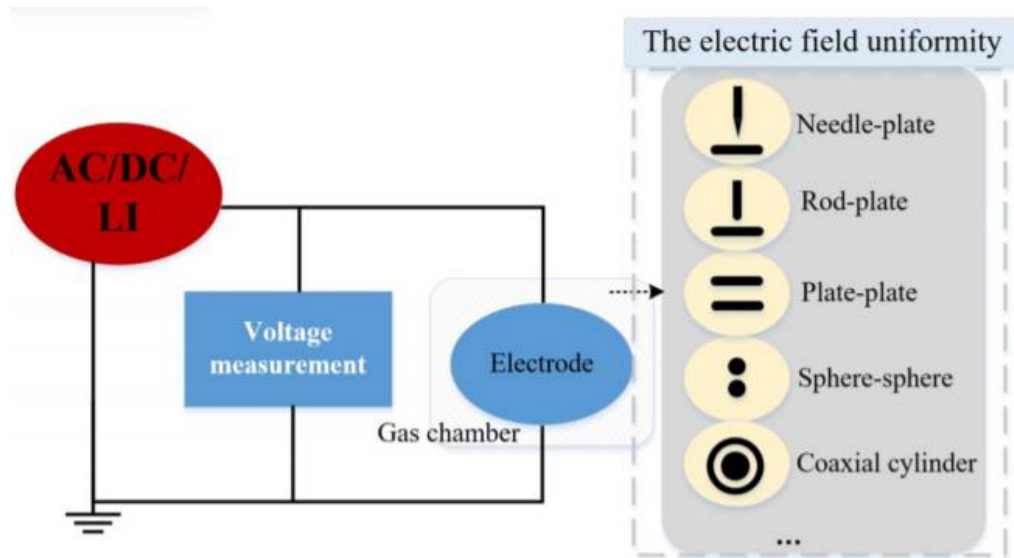


Figure 3.1 : Diagramme de mesure des propriétés diélectriques d'un gaz [23]

3.1 Air sec (air technique)

Il est préférable d'utiliser des gaz naturels comme l'air, l'azote ou le dioxyde de carbone comme isolant dans les appareillages isolés au gaz avec une tension nominale relativement basse. Ayant un PRG très faible, leurs performances d'isolation sont inférieures à celles du SF₆, raison pour laquelle il faut prendre certaines mesures pour améliorer leurs performances

d'isolation comme une augmentation de la pression du gaz dans le réservoir, augmenter la taille de l'équipement ou adopter la méthode d'isolation gaz-solide en ajoutant un revêtement isolation sur les conducteurs. L'augmentation de la pression du gaz peut entraîner dans certains cas un nouveau dimensionnement des structures mécaniques de l'appareillage pour résister à des pressions élevées et des coûts supplémentaires. Il faut préciser aussi que l'utilisation de l'air sous pression comme isolation gazeuse dans certains disjoncteurs n'est pas recommandée car la présence d'oxygène dans les produits de décomposition de l'air sous décharges partielles ou impulsions chocs de foudre peut causer des dommages tels que l'oxydation des composants internes pouvant entraîner un dysfonctionnement du disjoncteur.

Tableau 3.1 : Propriétés des gaz naturels [12]

Gaz naturels	Résistance diélectrique relative par rapport au SF ₆	GWP	Température d'ébullition (°C)
Air	0,37 – 0,40	-	-194,3
CO ₂	0,32 – 0,37	1	-79
N ₂	0,34 – 0,43	0	-196

Dans [12], l'air sec est associé avec une barrière solide (joint, revêtement, etc.) autour du dispositif de coupure à vide pour former une isolation solide-gaz améliorant la résistance diélectrique sans pour autant augmenter la taille de l'équipement. Le positionnement de la barrière qui dépend de l'isolant gazeux est d'une grande importance pour optimiser la solution et empêcher la propagation des décharges générées qui peuvent mener au claquage du milieu gazeux. La figure 3.2 montre les tests de tenue diélectrique avec une distance inter

électrode variable où l'on remarque une augmentation de la résistance diélectrique en présence de la barrière.

Tableau 3.2 : Composition chimique de l'air sec [11]

Composants	Fraction molaire (% en volume)
Azote (N ₂)	78,09
Oxygène (O ₂)	20,95
Argon (Ar)	0,93
Autres gaz	0,03

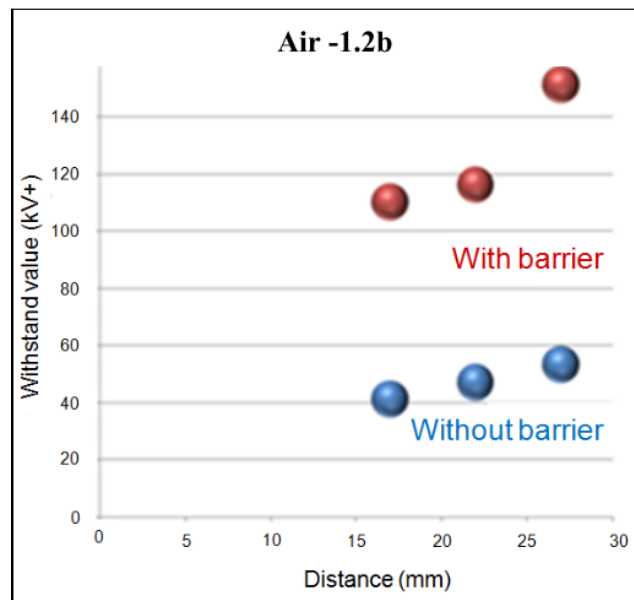


Figure 3.2 : Influence des barrières diélectriques entre deux électrodes sur la résistance diélectrique dans l'air sec [12]

L'air atmosphérique a aussi été étudié dans [13] comme isolation externe d'une ampoule à vide avec l'association d'un ou de plusieurs joints montés autour de l'ampoule à vide pour assurer une double fonction : étanchéité au gaz et fonction diélectrique. Cette composition

appelée isolation mixte a été utilisé par Areva T&D dans certaines gammes de disjoncteurs. Lors de son montage, le joint en élastomère se déforme pour permettre d'obtenir des pressions de contact suffisantes au niveau des surfaces de contact interne. Le système avec ce type de joint est peu sensible à la température car le joint est libre de se dilater lors des élévations en température et de contracter lors des diminutions de température : ce qui permet de limiter considérablement les contraintes thermomécaniques au sein du joint (voir figure 3.3).

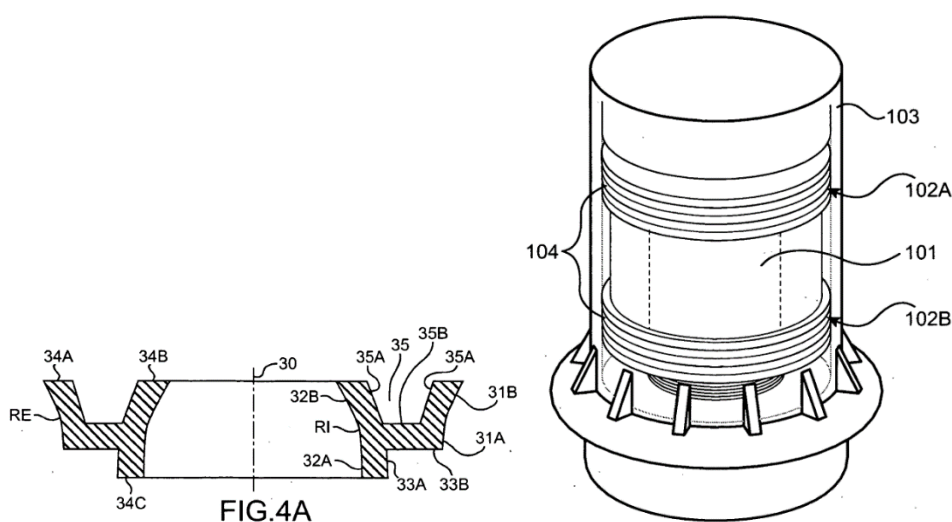


Figure 3.3 : Joint en élastomère pour isolation d'une ampoule à vide et son montage [13]

Cette solution avec le joint monté sur une ampoule à vide a été testée sur une application de disjoncteur de tension nominale de 38 kV. Les tests ont été effectués avec succès en conformité avec les tensions normalisées CEI et ANSI :

- Tenue de tension à la fréquence 50 Hz pendant 60 s sous une tension alternative de 95 kVeff ;
- Tenue aux impulsions de choc de foudre normalisées 200 kVp avec décharges partielles inférieures ou égales à 5 pC ;

- Résistance à des températures de -40 °C à $+115\text{ °C}$.

3.2 Azote N_2

L'azote N_2 est un gaz diatomique qui, dans les conditions normales de température et de pression, est incolore, inodore et généralement inerte. C'est un gaz naturel avec une température de liquéfaction (-196°C) plus faible que celle du SF_6 . Avec sa structure moléculaire simple, l'azote est considéré comme un gaz d'isolation en moyenne et basse tension et plusieurs recherches ont été réalisées dans ce sens. Le tableau suivant présente les propriétés générales de l'azote gazeux.

Tableau 3.3 : Propriétés de l'azote [11]

Caractéristiques	N_2
Masse moléculaire (g/mol)	28
Température d'ébullition (°C)	-196
Conductivité thermique à 1.013 bar et 0°C (mW/mK)	25,98
Résistance diélectrique relative par rapport au SF_6	0,34 – 0,43
PRG	0
Durée de vie (ans)	0

L'azote peut aussi être mélangé avec d'autres gaz électronégatifs en vue d'améliorer la température d'ébullition du mélange (ex : $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$, SF_6/N_2 , N_2/O_2 , PFC/N_2 , etc.) lorsque des contraintes de fonctionnement en basse température s'imposent. Étant donné que sa performance d'isolation est environ 3 fois plus faible que celle du SF_6 , utiliser l'azote comme isolation gazeuse à des niveaux de tension relativement élevés (plus de 30 kV) contraint à augmenter sa pression dans le réservoir, ce qui peut dans certains cas augmenter la taille de l'appareillage. Il faut préciser que contrairement au SF_6 , l'azote n'est pas un gaz

électronégatif car il n'y a pas de processus d'attachement lorsqu'il est ionisé et le claquage du gaz est plus rapide. Le champ critique réduit $(E/p)_{cr}$, dans le SF₆ obtenue pour une configuration parfaite dans un champ uniforme est de 89 kV/(cm.bar) alors que celui de l'azote est de 27 kV/(cm.bar). Plusieurs facteurs influent aussi la tenue diélectrique de l'azote notamment les particules métalliques fixes ou mobiles, l'influence de la tension (alternative, continue ou impulsionnelle) etc.

Pour utiliser l'azote comme substitut du SF₆ notamment en distribution de champ uniforme, son champ critique réduit normalisé doit correspondre au minimum à celui du SF₆. Par exemple, pour une application comme la nôtre, utilisant le SF₆ à 0,5 bar relatif, on doit avoir :

- La densité du champ critique réduit du SF₆ est :

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{lim,SF6} = 357 Td = 8,8 kV/(mm.bar) \quad \text{Équation 3.1}$$

- A 0.5 bar relatif de SF₆, on obtient :

$$E_{lim,SF6} = 4,4 kV/mm \quad \text{Équation 3.2}$$

- La densité du champ critique réduit du N₂ est :

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{lim,N2} = 120 Td = 3 kV/(mm.bar) \quad \text{Équation 3.3}$$

- Le calcul permet de déterminer la pression requise pour l'azote pour avoir le même champ critique réduit que le SF₆ à 0,5 bar :

$$P_{min} = \frac{E_{lim,SF6}}{\left(\frac{E}{P}\right)_{lim,N2}} = \mathbf{1,5 bar} \quad \text{Équation 3.4}$$

Il faut au minimum tripler la pression relative du SF₆ pour le remplacer avec l'azote dans le cas d'une distribution de champ uniforme pour avoir les mêmes capacités diélectriques.

L'azote pur à 1,7 bar a été testé sur un disjoncteur monophasé de 24 kV avec coupure dans le vide dans [4]. Les résultats, conformément aux exigences de la norme CEI 62271-100, ont

été satisfaisants excepté le test d'impulsions de coup de foudre polarité positive : ce qui présage que, pour cette application, ce gaz pourrait être utilisé comme milieu isolation en moyenne tension.

3.3 Mélange N₂-CO₂

Ces deux gaz (N₂ et CO₂) sont des gaz naturels utilisés pour obtenir des mélanges avec un bon compromis entre performance diélectrique et température minimale de fonctionnement de l'appareillage tout en réduisant considérablement l'impact environnemental (PRG inférieur à 1). Les recherches concernant le mélange entre l'azote et le dioxyde carbone, ne sont pas nombreuses car les deux gaz ont des performances diélectriques faibles par rapport à celle SF₆, mais celui du mélange des deux gaz faisant partie des objectifs de cette thèse peut être amélioré soit en augmentant la pression pour obtenir le niveau d'isolation requis, soit en variant les proportions de chaque gaz dans le mélange.

Philip et al. dans [10] ont mesuré expérimentalement la tension de rupture du mélange N₂+CO₂ dans des électrodes à grille à billes. Le mélange gazeux est constitué de parts égales de N₂ et CO₂ choisi pour comparaison avec le SF₆ car ayant les mêmes propriétés d'isolation que l'air comprimé. Les résultats obtenus (fig. 3.4) montrent que la tension maximale atteignable dans le SF₆ est le triple que celui dans le mélange à parts égales N₂-CO₂ à la même pression et la supériorité relative du SF₆ sur ce mélange diminue à autres pressions et pour des électrodes plus larges.

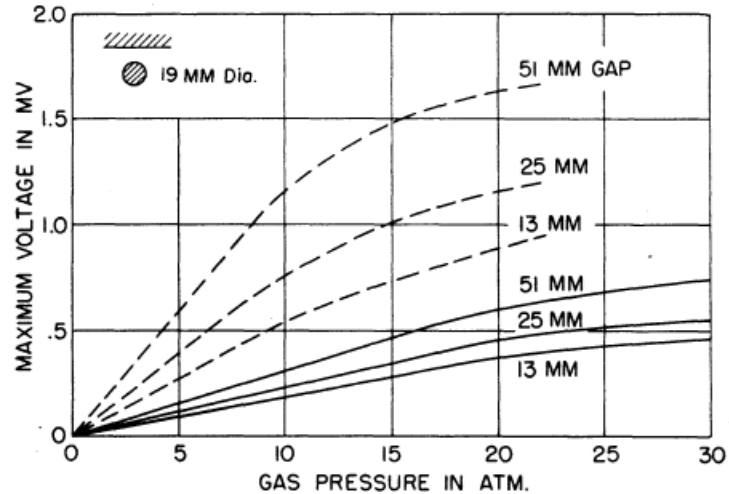


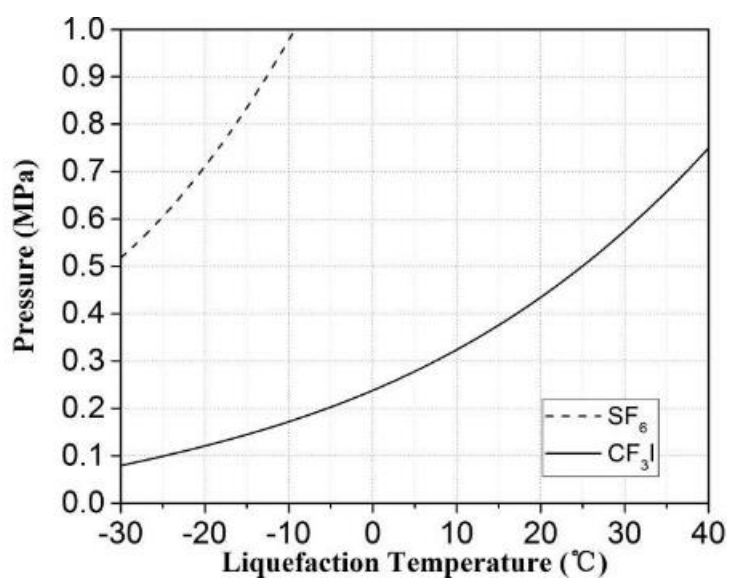
Figure 3.4 : Tension maximale entre une sphère de diamètre 19 mm et une électrode haute tension négative dans SF₆ (lignes brisées) et N₂+CO₂ (lignes continues) [10]

3.4 Trifluoroiodométhane CF₃I

Le trifluoroiodométhane (CF₃I) est l'un des gaz électronégatifs dont les caractéristiques se rapprochent plus à celles du SF₆. Ce gaz possède une tenue diélectrique 1,2 fois supérieure au SF₆, une durée de vie atmosphérique très courte et un GWP proche de celui du CO₂. Il a été étudié dans plusieurs travaux scientifiques comme potentiel substitut du SF₆ dans les appareillages isolés au gaz en moyenne tension, mais sa température d'ébullition, -22,5°C, fait qu'il ne peut être utilisé dans les zones à basse température car comme le montre la figure 3.5 ci-dessous sa pression de vapeur saturante est très faible à basse température. C'est pourquoi ce gaz est mélangé à des proportions diverses dépendamment de la tension nominale à isoler avec un gaz tampon (en général CO₂ ou N₂) pour faire abaisser la température d'ébullition global du mélange gazeux et se rapprocher ou même dépasser celle du SF₆ [11][14].

Tableau 3.4 : Propriétés du CF₃I [11] [14]

Caractéristiques	CF ₃ I
Masse moléculaire (g/mol)	195,91
Température d'ébullition (°C)	-22,5
Pression de liquéfaction -20°C (MPa)	0,11
Conductivité thermique à 1,013 bar et 0°C (mW/mK)	6,594
Durée de vie (années)	0,005
GWP	< 1
ODP	0,008

Figure 3.5 : Courbe de pression de vapeur saturante du SF₆ et CF₃I [15]

3.4.1 Mélange gazeux CF₃I / CO₂

Le mélange gazeux entre CF₃I et CO₂ est un remplaçant potentiel au SF₆ en termes d'isolation des disjoncteurs moyenne tension en raison des performances diélectriques très bonnes et de l'amélioration de la température d'ébullition du mélange.

H. Katigiri et al. ont étudié la tenue diélectrique sous tension chocs de foudre normalisées du gaz CF_3I seul et du mélange gazeux $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$ introduit à 0,1 MPa absolue dans un banc d'essai expérimental permettant d'obtenir une distribution de champ quasi-uniforme avant de les comparer à celle du SF_6 [16].

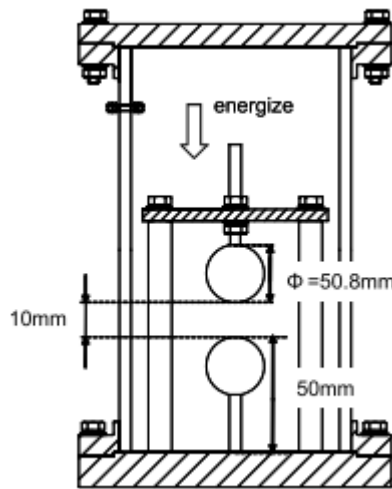


Figure 3.6 : Équipement de tests expérimentaux [16]

L'utilisation du CF_3I est limitée par les particules d'iodines (I^-) générées par les décharges dans le gaz qui peut induire un courant d'induction pouvant mener un claquage précoce du gaz lorsqu'il est utilisé dans le cas d'une isolation haute tension ou une interruption d'arc [16][23]. Les résultats de l'étude ont montré que le seuil à ne pas dépasser en tenant compte de la température d'ébullition du mélange et de la résistance diélectrique est de 30%. Par exemple pour un mélange 30% - 70% $\text{CF}_3\text{I}/\text{CO}_2$, la température d'ébullition du mélange est de -12°C à 0,5 MPa avec une performance d'isolation comprise 0,75 – 0,80 fois à celle du SF_6 : ce qui permet d'utiliser ce mélange dans des applications de disjoncteurs moyenne tension avec isolation gazeuse.

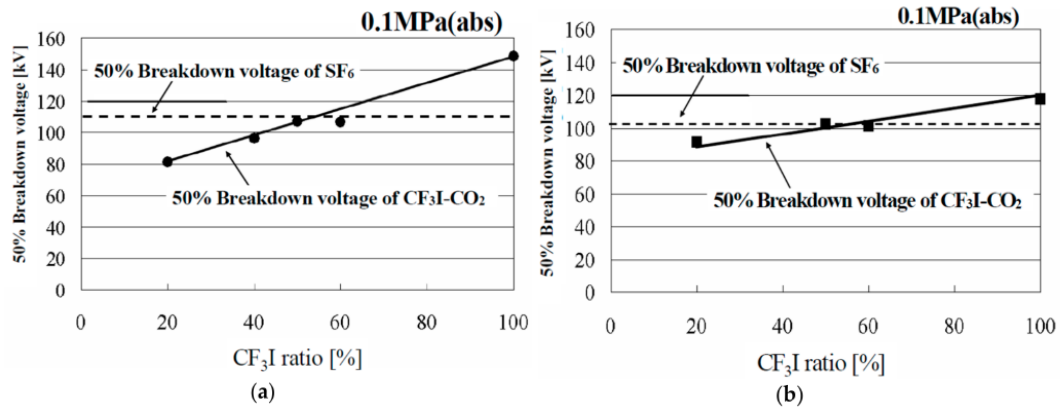


Figure 3.7 : Tension de claquage du mélange CF₃I/CO₂ dans une configuration d'électrodes sphère-sphère en polarité positive (a) et négative (b) [16]

Ce même mélange gazeux (30%-70%) CF₃I/CO₂ a été étudié dans [14] dans des expériences d'impulsions de foudre des deux polarités dans des configurations d'électrodes plan-tige et plan-plan. Aussi, l'influence de la pression du gaz, de l'écartement inter électrode et des polarités d'impulsions sur la tenue diélectrique ont été déterminé à travers un équipement de test composé d'électrodes en alliage de laiton, d'un générateur d'impulsions 400 kV, d'une unité de contrôle du gaz et d'un diviseur de tension.

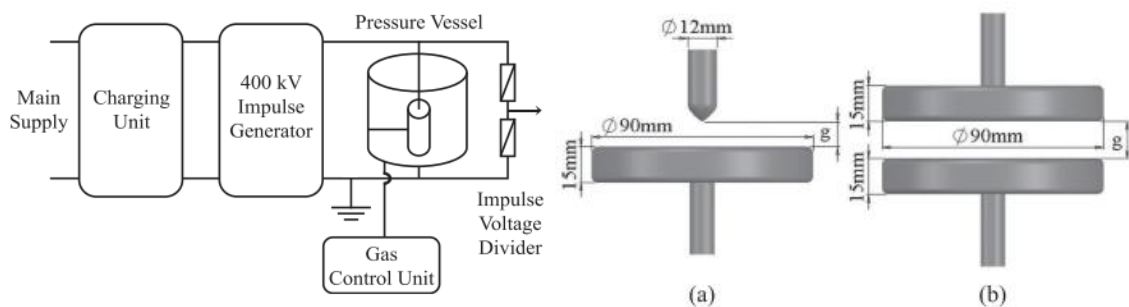


Figure 3.8 : Circuit d'essai de l'équipement expérimental de chocs de foudre et les configurations d'électrodes a) tige-plan et b) plan-plan [14]

Les résultats ont montré que lorsque la pression passe de 1 à 2 bars, la tension de claquage croît à un rythme assez faible comme l'indique la figure 3.7. Quant à la variation de la

distance inter électrode sur les différentes configurations, la tension de claquage mesurée dans ce cas pour les distances plus élevées augmente avec un taux décroissant (fig. 3.9).

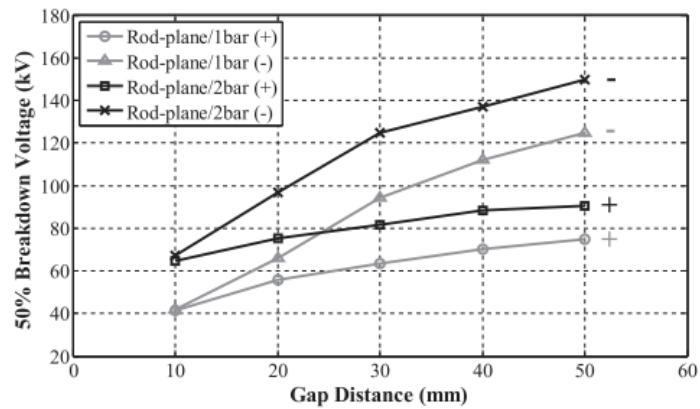


Figure 3.9 : Tension U_{50} en fonction de la distance inter électrode dans une configuration tige-plan d'un mélange gazeux (30%-70%) CF_3I/CO_2 à des pressions de 1 et 2 bars et pour les deux polarités d'impulsions de choc de foudre [14]

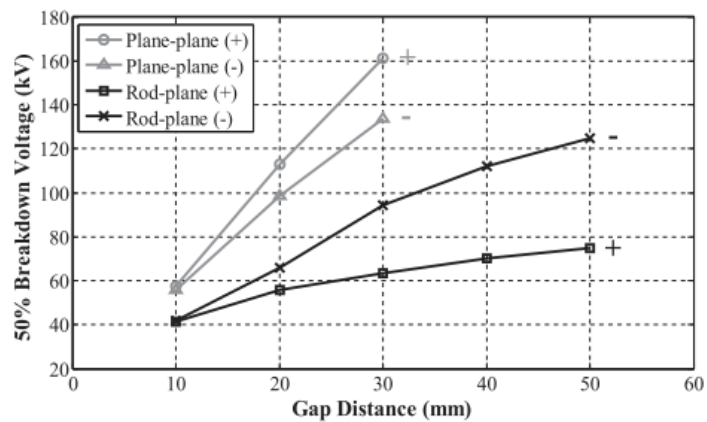


Figure 3.10 : Tension U_{50} en fonction de la distance inter électrode dans des configurations tige-plan et plan-plan d'un mélange gazeux (30%-70%) CF_3I/CO_2 à la pression 1 bar et pour les deux polarités d'impulsions de choc de foudre [14]

3.4.2 Mélange gazeux CF_3I/N_2

Ce mélange gazeux a été expérimenté dans [4][17] afin de mesurer sa tension de claquage en fonction du produit pression-distance inter électrode (Pd). Les essais effectués sur les

mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ à taux de CF_3I varié (10%, 25% et 50%) et du N_2 pur à travers un banc d'essai expérimental présenté à la figure 3.11 ont montré une variation linéaire de la tension de claquage en fonction du produit pression*distance lorsque celui-ci varie de 1 à 5 mm.bar.

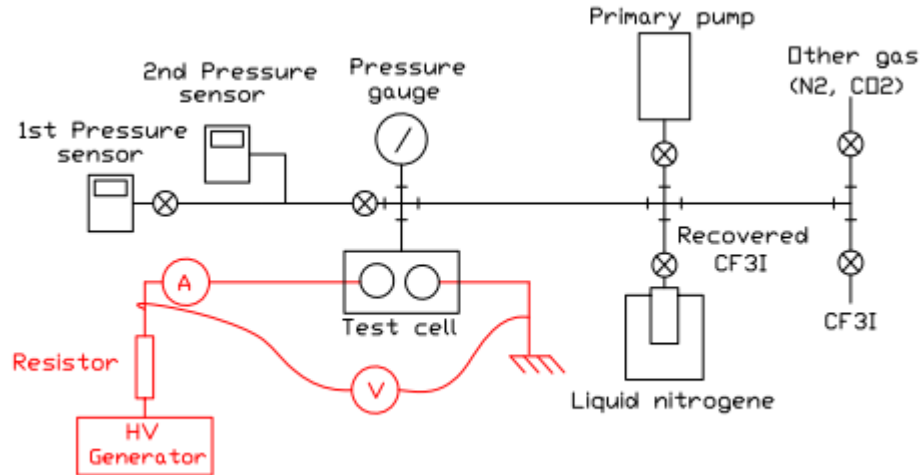


Figure 3.11 : Banc d'essai expérimental [17]

Les résultats obtenus corroborent l'estimation théorique d'un modèle de gaz électronégatif sous champ quasi-uniforme et à des valeurs $P*d$ faibles calculée à partir de l'équation suivante [4] :

$$V_c = \left(\frac{E}{P}\right)_{lim} * [Pd + M] \quad \text{Équation 3.5}$$

E/P : le champ critique réduit, Pd : pression*distance, M : symbole de mérite

L'analyse de ces courbes a montré que plus le taux de CF_3I et le produit Pd augmentent, meilleure est la tenue diélectrique du mélange gazeux. Dans le cas d'application industrielle tels que les disjoncteurs, la distance d est fixe et ne peut être modifiée, donc le seul moyen d'améliorer la tenue diélectrique est d'augmenter la pression.

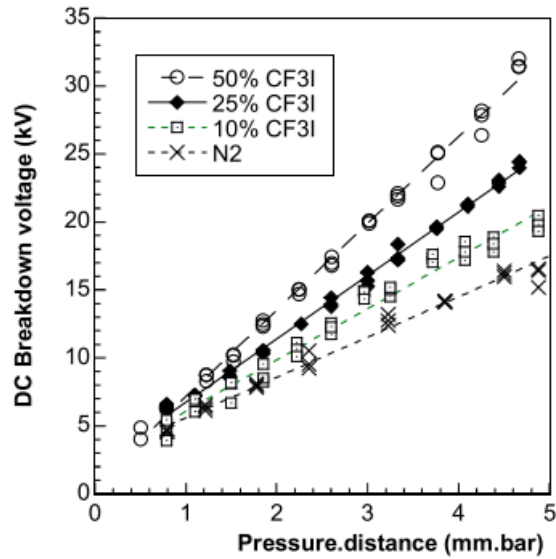


Figure 3.12 : Tension de claquage DC de mélange gazeux $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ à 0,75 mm de gap [4]

L'influence du pourcentage de CF_3I et SF_6 a été faite en guise de comparaison pour des valeurs de Pd de 2 et 4 mm.bar (voir figure 3.13). La tension de claquage des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ varie quasi-linéairement avec le taux de CF_3I tandis que pour les mélanges SF_6/N_2 elle monte rapidement avec le taux de SF_6 jusqu'à 10% puis tend à saturer. Cette augmentation linéaire pour les mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ implique que le taux de CF_3I doit être élevé pour pouvoir avoir une tension de claquage comparable à celle du SF_6 , mais associé avec les contraintes de liquéfaction montrées à la figure 3.14 le taux optimal de CF_3I tourne autour de 20% [4].

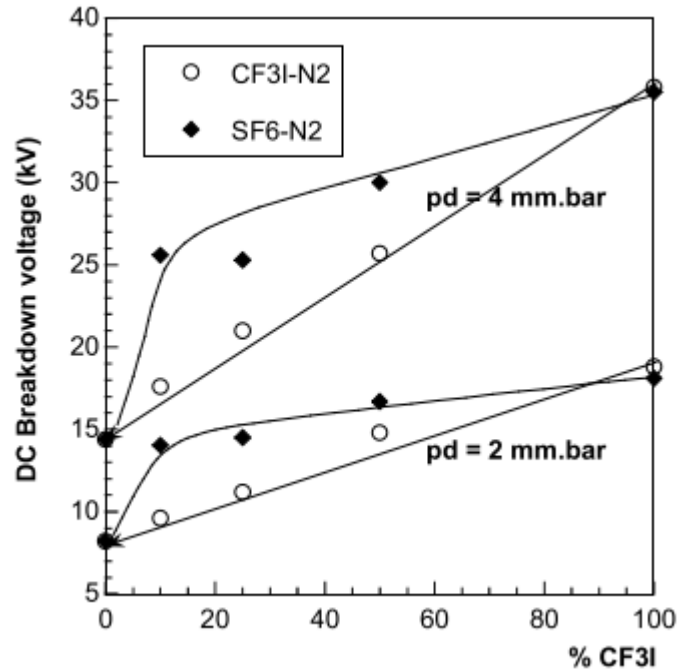


Figure 3.13 : Influence du taux de CF_3I et SF_6 pour $\text{Pd}=2 \text{ mm.bar}$ et $\text{Pd}=4 \text{ mm.bar}$ [4]

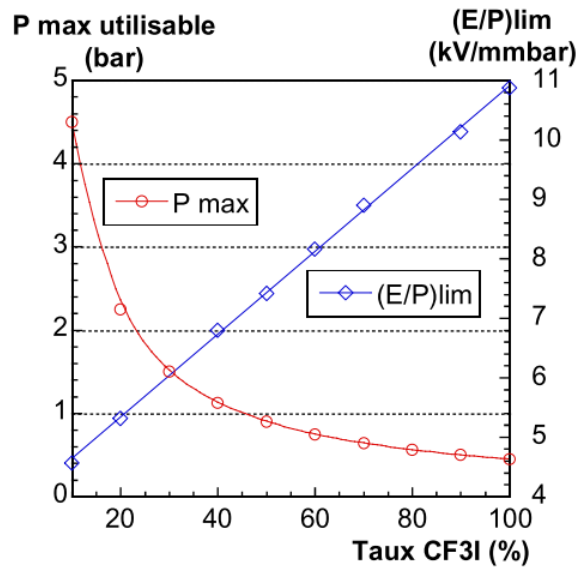


Figure 3.14 : Pression de liquéfaction et champ réduit critique des mélanges $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ en fonction du taux de CF_3I [4]

Enfin, ce mélange gazeux $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ a été testé comme isolant d'un disjoncteur monophasé de 24 kV dont la coupure est effectuée dans une ampoule à vide. La norme CEI 62271-100 exige

une tenue à une surtension AC de 60 kV pendant 60s et une tenue aux ondes chocs de foudre normalisés de 145 kV tandis que Areva T&D, le constructeur, souhaite que le système d'isolation puisse tenir à une surtension AC de 95 kV pendant 60s et 200 kV en chocs de foudre normalisés. Les mélanges de $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ composés de 5%, 10%, 20% et 30% de CF_3I sont testés à deux pressions 1,7 et 1,5 bar pour atteindre les performances fixées par Areva tout en suivant la procédure d'essai établi par la norme CEI 60060-1.

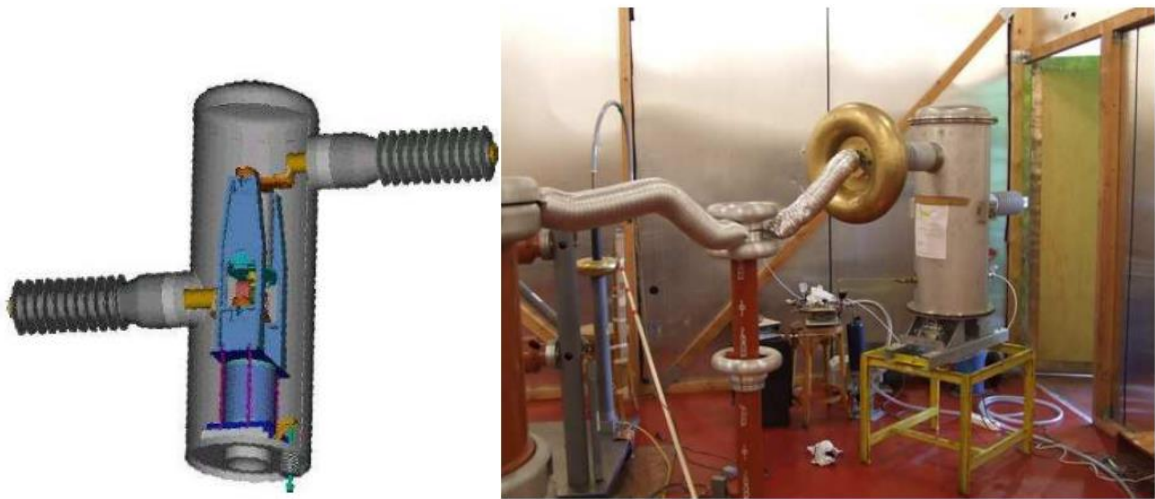


Figure 3.15 : Disjoncteur monophasé 24 kV isolé au gaz et vue d'ensemble du banc d'essai [4]

Les résultats ont montré que le paramètre dimensionnant de l'isolation gazeuse est la tenue diélectrique face aux chocs de foudre en polarité positive que seuls le SF_6 à 1,7 bar et le mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ à 1,7 bar avec 30% de CF_3I ont satisfaite. Ce mélange $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2$ avec 30% de CF_3I a une température d'ébullition de -38°C [4].

3.5 Perfluorokétones ($\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ et $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$)

Les perfluorokétones (PFK) sont des gaz ayant comme formule chimique générique $\text{C}_n\text{F}_{2n}\text{O}$ où n est un entier variant de 3 à 8. Dans cette famille, deux gaz à savoir le $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ et

le $C_6F_{12}O$ sont des candidats potentiels au remplacement du SF_6 comme isolation gazeuse dans les appareillages électriques à cause de leur haute résistance diélectrique et de leur faible impact sur l'environnement. Les caractéristiques pertinentes de ces deux gaz sont résumées au tableau 3.2. A cause de leur point d'ébullition très élevé, ces gaz ne peuvent être utilisés comme isolant dans les appareillages comme les disjoncteurs. C'est pourquoi ils sont utilisés comme gaz additif à une pression inférieure à leur pression de vapeur saturante dans un mélange composé d'autres gaz ayant un point d'ébullition plus bas.

Tableau 3.5 : Propriétés des perfluorokétones $C_5F_{10}O$ et $C_6F_{12}O$ [11]

Molécules	$C_5F_{10}O$	$C_6F_{12}O$
Masse moléculaire (g/mol)	266,04	316,04
Point d'ébullition (°C)	24	49,2
Pression de vapeur saturante à 0°C (mbar)	350	100
Pression de vapeur saturante à 20°C (mbar)	800	326
Tenue diélectrique / SF_6	2	2.8
PRG	1	1
ODP	0	0
Durée de vie atmosphérique (ans)	-	0,014

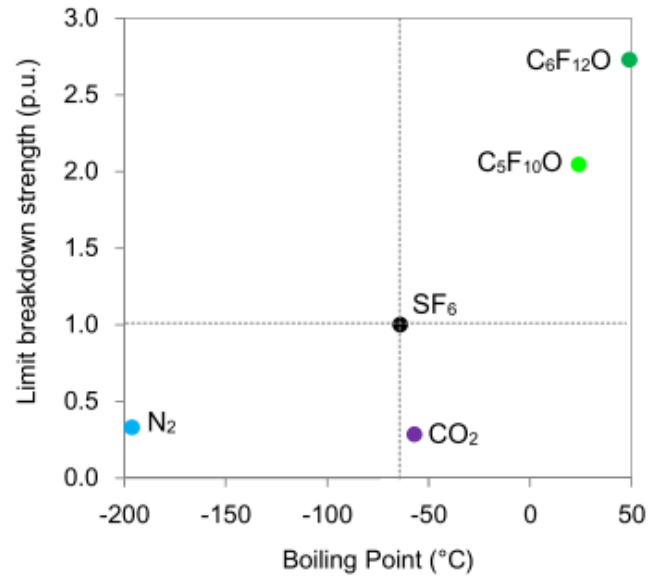


Figure 3.16 : Tenue diélectrique relative et température d'ébullition des composants de gaz [19]

Dans [19], l'association de gaz PFK (C₅F₁₀O et C₆F₁₂O) avec l'air sec ou le CO₂ ont été étudié comme possible substitut du SF₆. La résistance diélectrique a été testée sous tension alternative 50 Hz et impulsions de foudre normalisées (1,2/50µs) sur un banc d'essai offrant une distribution de champ quasi-homogène montré à la figure 3.16. La tension limite de claquage sous tension alternative 50 Hz est déterminée comme étant la moyenne de 10 tensions de claquage causées par une augmentation croissante de la tension alternative. Pour les impulsions de foudre, c'est la probabilité de claquage U_{50%} qui est mesurée en utilisant la méthode up-and-down.

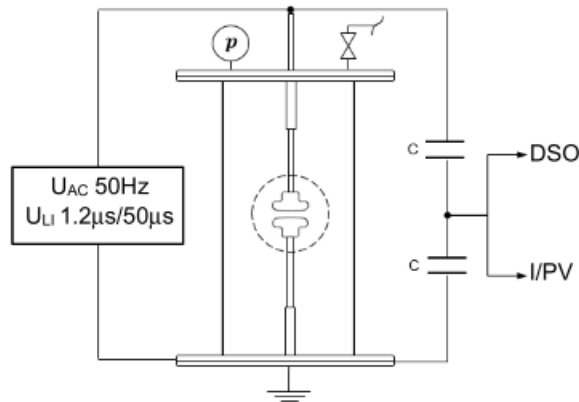


Figure 3.17 : Cellule d'essai pour les mesures en tension AC et chocs de foudre [19]

Les mélanges gazeux étudiés sont présentés dans le tableau suivant. Les résultats obtenus ont montré que le SF₆ surclasse tous les mélanges en tenue diélectrique aussi bien en tension alternative qu'en impulsions de foudre. Hormis le SF₆, le mélange T₁ offre la meilleure tenue diélectrique. Par exemple, il suffit d'ajouter 0,5 bar d'air sec au mélange T₁ pour avoir la même tension de claquage en alternative que le SF₆ à 2 bars. Quant aux impulsions en polarité positive, la tension de claquage du SF₆ à 4 bars équivaut à ajouter 1,6 bar d'air sec au mélange T₁ ou 3 bars au mélange B₁. La température d'ébullition du gaz a été améliorée jusqu'à environ 0°C mais celle-ci n'est pas adaptée à une utilisation de ce gaz en tant qu'isolant d'un appareillage dans des conditions de fonctionnement à basse température.

Tableau 3.6 : Mélanges gazeux binaires et tertiaire étudiés [19]

Mélange gazeux	Pression partielle $C_5F_{10}O$ (mbar)	Pression partielle $C_6F_{12}O$ (mbar)	Gaz tampon
B ₁	350	0	Air sec
B ₂	0	100	Air sec
B ₃	350	0	CO ₂
T ₁	350	100	Air sec

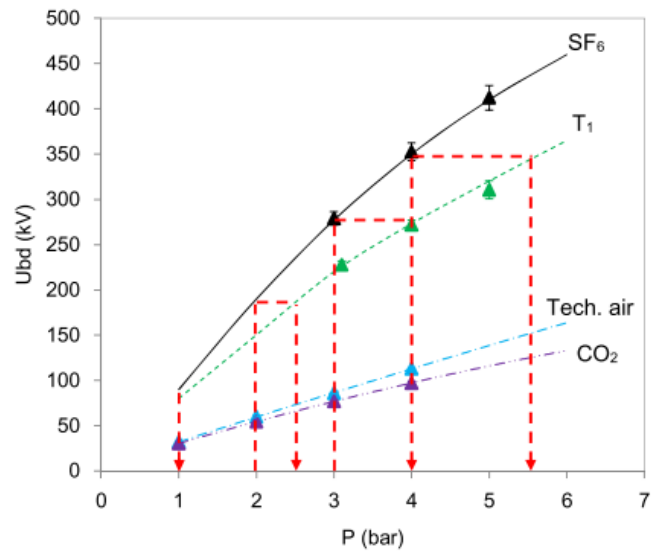


Figure 3.18 : Tenue diélectrique alternative pour T₁, SF₆, air sec et CO₂ [19]

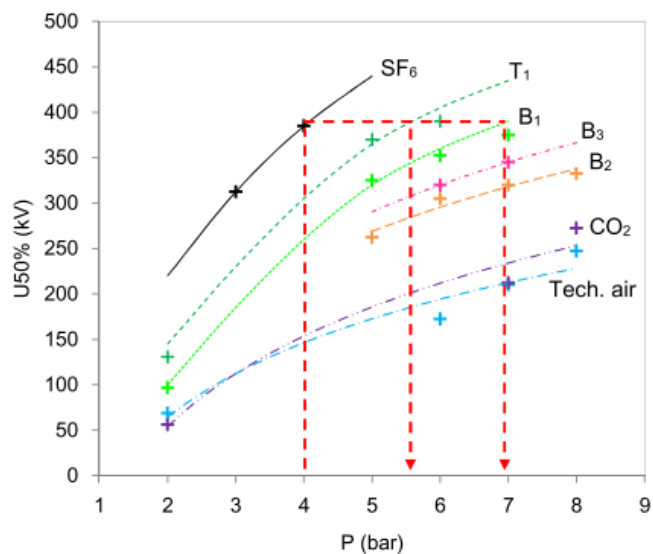


Figure 3.19 : Tenue diélectrique en impulsions (+) pour T₁, B₁, B₂, B₃, SF₆, air sec et CO₂ [19]

3.6 Fluoronitrile C₄F₇N

Le fluoronitrile (CF₃)₂CFCN ou C₄F₇N, sous son nom commercial NOVEC™4710 est un gaz synthétique breveté et fabriqué par la société 3M™. C'est un gaz électronégatif, incolore, stable chimiquement jusqu'à 700°C. Son GWP tourne autour de 2400 et son ODP est égale à zéro. Sa température d'ébullition très élevée comparée à celle du SF₆ est égale à -4°C, incompatible avec une utilisation extérieure. C'est la raison pour laquelle ce gaz est associé avec un gaz tampon comme le CO₂ pour diminuer sa température d'ébullition [11].

Tableau 3.7 : Propriétés du gaz fluoronitrile [11]

Masse molaire (g/mol)	195,04
Température d'ébullition (°C)	-4,7
Pression de liquéfaction à -30°C (MPa)	0,0311

La comparaison des caractéristiques d'isolation du SF₆ et du mélange gazeux Fluoronitrile/CO₂ sous tension alternative et impulsions de foudre avec différentes configurations du champ électrique a été étudié dans [20]. La figure suivante montre l'équipement de test utilisé.

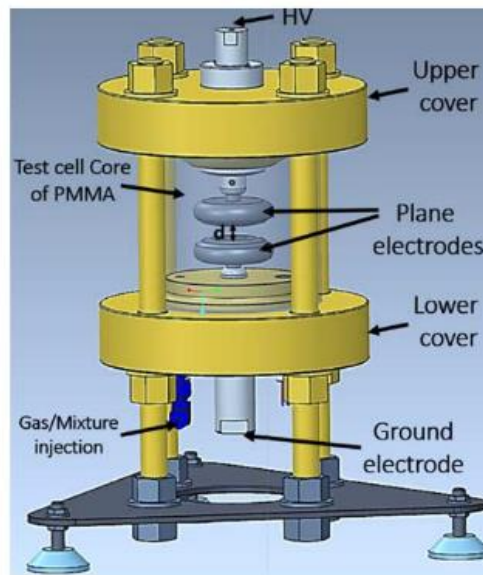


Figure 3.20 : Schéma de l'équipement de test [20]

Les premiers tests réalisés sur une configuration d'électrodes sphère-sphère avec un écartement inter électrodes variant de 5 à 20 mm (distribution de champ non-uniforme) ont permis de comparer la tension de claquage du SF₆ et différents mélanges gazeux Fluoronitrile/CO₂ à la pression 0,1 MPa abs dans le but de choisir le mélange gazeux le plus approprié pour une utilisation industrielle. Le mélange composé de 3,7% Fluoronitrile/96,3% CO₂ reste le plus approprié avec une température de liquéfaction de -30°C pour remplacer le SF₆ à 0,55 MPa abs tandis que le mélange composé de 20% Fluoronitrile/80% CO₂ ne peut dépasser -4°C. Ce mélange prend aussi en compte différents critères dont la pression et l'impact environnemental soit environ 99,6% de réduction du GWP par rapport au SF₆. Il

atteint en champ uniforme 72% de la tenue diélectrique du SF₆ à 5,5 bars abs. En champ quasi-homogène et homogène (configuration plan-plan et sphère-sphère), des équivalences à 0,55 et 0,65 MPa abs de SF₆ sont obtenues avec des mélanges 3,7 % Fluoronitrile / 96,3 % CO₂ à respectivement 0,88 et 1,04 MPa abs de pression totale pour des températures minimales de fonctionnement de -30 et -25 °C. En champ très divergent (configuration sphère-plan), le mélange 3,7% Fluoronitrile / 96,3% CO₂ montre un point de croisement où la polarité la plus critique (négative) passe au positif.

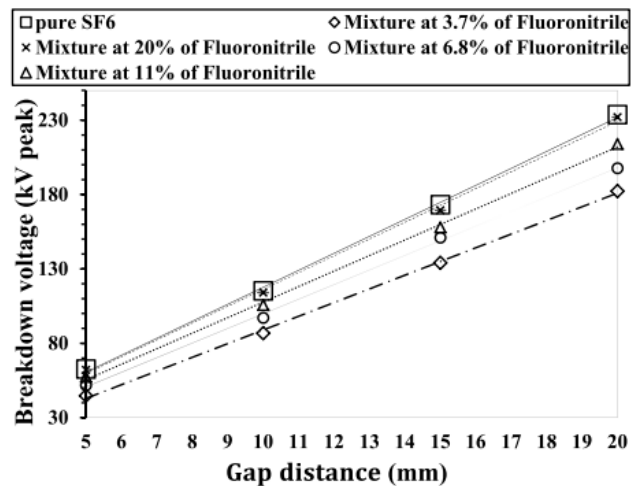


Figure 3.21 : Tension de claquage AC des mélanges Fluoronitrile/CO₂, SF₆ à 0,1MPa et 20°C, en configuration sphère-sphère rapportée à la configuration plan-plan [20]

3.7 Hydrofluorooléfine HFO1234zeE

Les hydrofluorooléfines nommés gaz HFO ont une formule générale C_n(H,F)_{2n}. Trois gaz dans cette famille présentent des propriétés intéressantes assez proches du SF₆ comme isolant gazeux comme l'indique le tableau 3.8.

Tableau 3.8 : Propriétés de gaz hydrofluorooléfines [21]

Molécules	HFO1234zeE	HFO1234zeZ	HFO1234yf
Masse moléculaire (g/mol)	114,04	114,04	164
Point d'ébullition (°C)	-19	9	-29,5
GWP	6	6	4
Résistance diélectrique (% SF ₆)	85	-	220

HFO1234zeZ et HFO1234zeE sont deux stéréo-isomères du même gaz HFO1234ze et ne diffèrent que de leur point d'ébullition. Le gaz HFO1234yf étant très inflammable sous conditions proches de la normale et le gaz HFO1234zeZ ayant un point d'ébullition élevé ont permis aux chercheurs de se concentrer dans leur recherche d'alternatives au SF₆ sur le gaz HFO1234zeE qui possède de meilleures caractéristiques. Dans [21], les caractéristiques basiques de claquage du HFO1234zeZ ont été étudié d'abord en champ uniforme (configuration plan-plan) avec une rampe continue puis en champ divergent (configuration pointe-plan) sous impulsions de foudre non normalisées (0,4/1400 µs). L'équipement de test en champ uniforme est composé d'un système d'électrodes plan-plan en acier inoxydable, de diamètre 5 cm, avec des bords arrondis et placées dans une enceinte de 1,8 L avec une pression allant de 0,05 à 0,3 MPa abs. En champ divergent, le système est en géométrie pointe-plan avec un rayon de pointe de 0,5 mm et un espacement de 5 cm. Les résultats obtenus après les tests de claquage sous champ uniforme ont montré un bon accord avec les résultats de Paschen dans l'air et le SF₆ : ce qui permet de valider le système d'électrodes ainsi que la rampe de tension 1kV/s utilisés pour les tests. Dans ces conditions, les tensions de claquage du HFO1234zeZ représentent 83% en moyenne de celles mesurées avec le SF₆ et 250% de celles mesurées avec l'air.

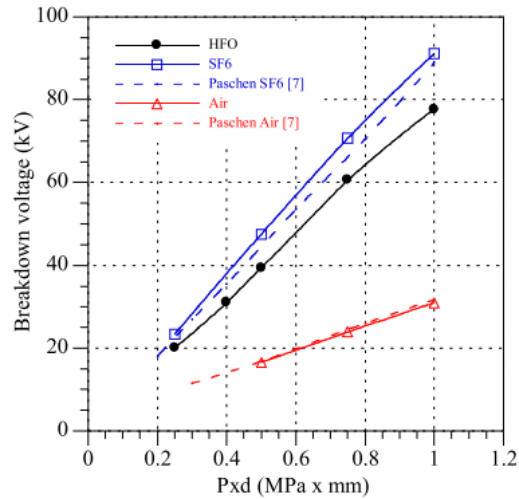


Figure 3.22 : Comparaison des mesures de claquage obtenues en HFO, SF₆ et air sec en champ uniforme, versus produit (Pression x distance). Rampe DC 1kV/s, d = 5 mm [21]

En champ divergent, une augmentation modérée de la tension de claquage en fonction de la pression est observée et la différence entre le SF₆ et HFO1234zeZ diminue lorsque la pression augmente. Par exemple, à pression atmosphérique, la tension de claquage du HFO1234zeZ est 74% de celle du SF₆ alors qu'à 3 bars abs, elle est de 94%.

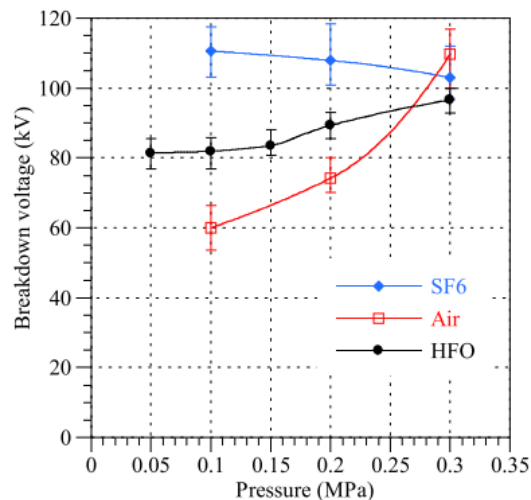


Figure 3.23 : Tension de claquage en fonction de la pression en géométrie pointe-plan sous tension de choc, du HFO, SF₆ et air sec, d = 5 cm [21]

Y. Yao et al. ont utilisé dans [22] un équipement de test pour étudier les performances de tenue diélectrique des mélanges HFO/CO₂. Cet équipement est un cylindre en acrylique transparent de diamètre intérieur 35 mm avec une hauteur de 70 mm. Il est aussi composé d'un système de distribution et de contrôle de gaz et un interrupteur de fermeture plasma pouvant opérer jusqu'à 10 bars abs, des sondes de courant et de tension et une alimentation continue haute tension avec tension positive et négative. La distance entre les deux électrodes est de 5 mm. L'électrode supérieure, reliée à la haute tension, est d'une forme cylindrique en acier inoxydable avec une surface plate de 20 mm de diamètre. Quant à l'électrode inférieure reliée à la masse, est d'une forme annulaire en aluminium avec une ouverture interne de 20mm de diamètre) et est composée de 4 aiguilles de gramophone montées symétriquement en son ouverture interne fournissant ainsi une distribution de champ hautement non uniforme. Une résistance de 10 kΩ permet de mesurer le courant de décharge avant claquage afin d'obtenir la tension d'apparition de décharges corona.

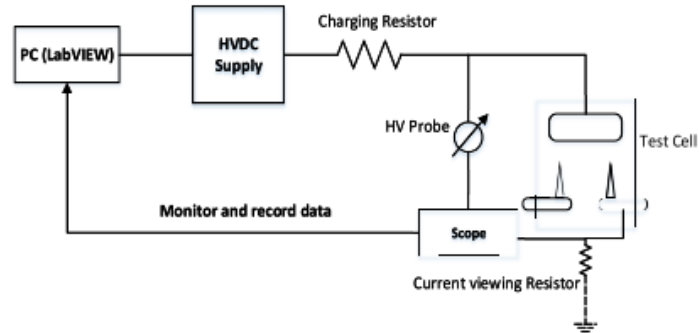


Figure 3.24 : Schéma de l'équipement expérimental de test pour les mesures de tension de claquage [22]

Les résultats obtenus ont montré que les tensions de claquage du mélange HFO/CO₂ sont plus élevées que celles du CO₂ pour les deux types de tension d'alimentation (positive et négative) pour la même pression de gaz. Cette différence de tension de claquage est plus

remarquée en tension positive (fig. 3.25). Par exemple, l'ajout de 2% de gaz HFO au CO₂ entraîne une augmentation de 1,6 fois la tension de claquage de ce mélange gazeux à 8 bars abs.

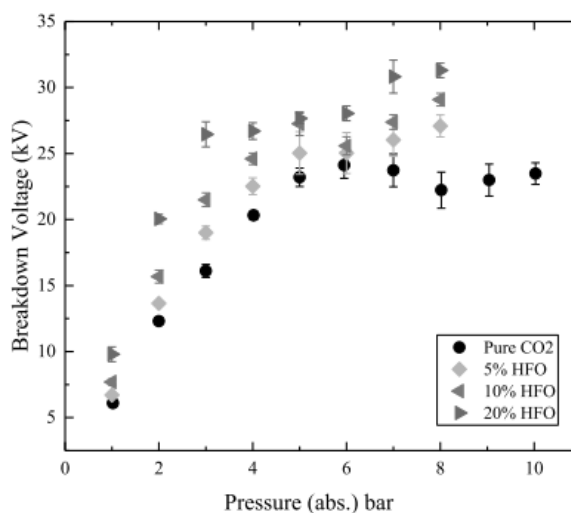


Figure 3.25 : Tension de claquage des mélanges HFO1234ze/CO₂ et du CO₂ pur en fonction de la pression pour l'électrode plane supérieure soumise à une contrainte négative (électrodes à aiguilles mises à la terre) [22]

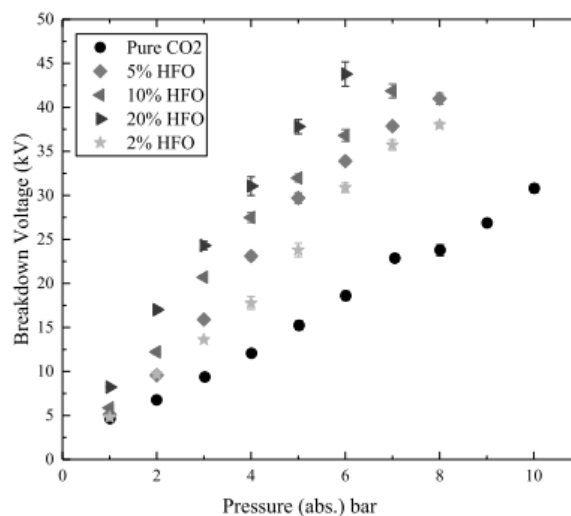


Figure 3.26 : Tension de claquage des mélanges HFO1234ze/ CO₂ et du CO₂ pur en fonction de la pression pour l'électrode plane supérieure sollicitée positivement (électrodes à aiguilles mises à la terre) [22]

3.8 Protoxyde d'azote N₂O

Le protoxyde d'azote N₂O fait aussi partie des gaz ayant des caractéristiques assez proches de celles du SF₆. C'est un gaz électronégatif, non toxique et inflammable. Sa température d'ébullition est meilleure que celle du SF₆ (-88,5°C) et son potentiel de réchauffement global est aux environs de 265-268, équivalent à 1,2% à celui du SF₆ [38]. Quant à sa tenue diélectrique, elle est égale à 50% à celle du SF₆, montrant ainsi que ce gaz peut être utilisé dans un mélange contenant d'autres gaz tampons pour augmenter sa résistance diélectrique afin de constituer un remplaçant au SF₆. L'inconvénient d'utiliser seul le protoxyde d'azote réside du fait de son pouvoir oxydant qui est 0,6 fois égale à celui de l'oxygène pouvant conduire à son incompatibilité avec les autres matériaux des appareillages électriques. Pour réduire son pouvoir oxydant, le N₂O peut être associé à des gaz inertes comme le N₂ ou le CO₂. Dans [39], les mélanges 20/80 et 40/60 de N₂O/N₂ à 700 kPa abs dans le cas d'une très rapide contrainte de surtension ont atteint plus de 90% de la résistance diélectrique du SF₆. Les résultats obtenus dans une configuration d'électrodes plans sous champ électrique uniforme pour les mélanges gazeux 38/62 N₂O/CO₂ ont montré que ce dernier possède une résistance de claquage et un champ critique réduits moins élevés que le N₂O pur dus à la concentration minoritaire de N₂O dans ce mélange.

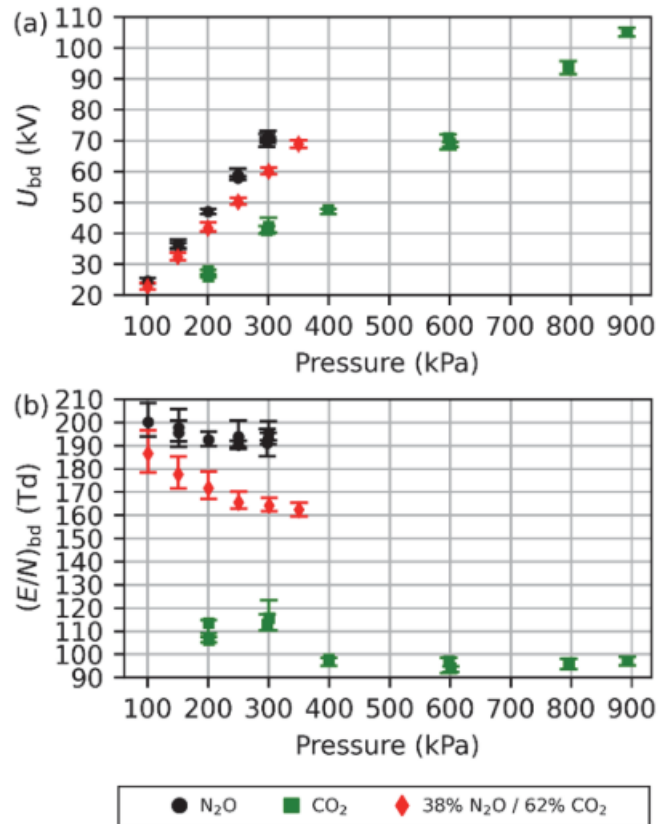


Figure 3.27 : a) Tension de claquage U_{bd} crête AC, b) intensité du champ critique réduit des gaz N_2O , CO_2 et N_2O/CO_2 pour différentes pressions et à une séparation de 5 mm [38]

Le pouvoir oxydant limite aussi le taux de N_2O dans le mélange gazeux car au-delà du taux de 23,5%, le mélange devient oxydant. Les résultats obtenus dans [38] montrent que le taux de N_2O ne doit pas dépasser respectivement 40% et 49% dans les mélanges N_2O/N_2 et N_2O/CO_2 .

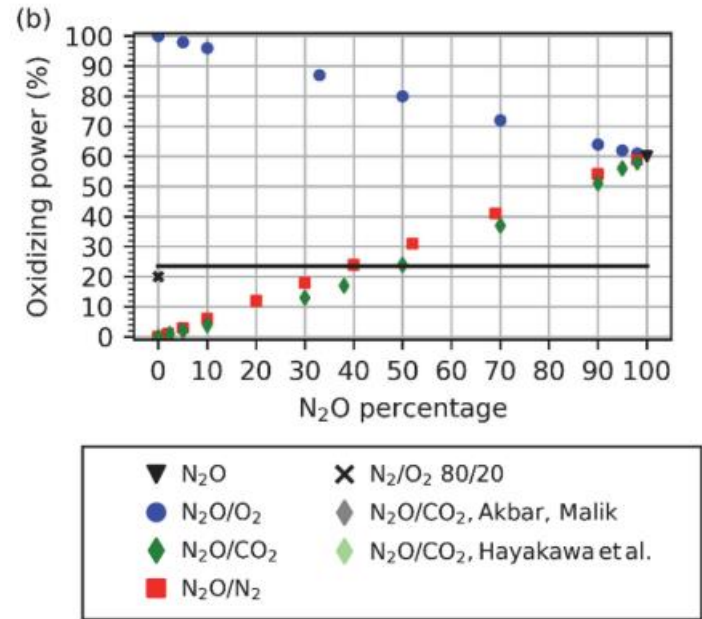


Figure 3.28 : Pouvoir oxydant des mélanges binaires N₂O/N₂ et N₂O/CO₂ [38]

Le tableau ci-dessous résume quelques gaz avec leurs caractéristiques comme remplaçants potentiels du SF₆ dans les applications moyenne et haute tension de l'industrie électrique.

Tableau 3.9 : Quelques potentiels substitués du SF₆ et leurs caractéristiques [11]

Gaz	Point d'ébullition (°C)	Tenue limite diélectrique/SF₆ (p.u)	PRG	Toxicité
SF ₆	-64	1	23900	Non
N ₂	-196	0,37	0	Non
CO ₂	-79	0,34	1	Non
Air	-194,3	0,4	0	Non
C ₂ ClF ₅	-39	1,16	9300	Relativement non
C ₃ F ₇ N	-2	2,33	0	Toxique
c-ClF ₃	-81	0,58	11700	Faible
SeF ₆	-64	1,1	0	Toxique
N ₂ O	-89	0,5	268	Non
CF ₃ I	-22,5	1,2	0,4	Relativement non
C ₃ F ₁₀ O	24	2	1	Non
C ₆ F ₁₂ O	49	2,9	1	Non
HFO	-19	0,85	6	Très faible

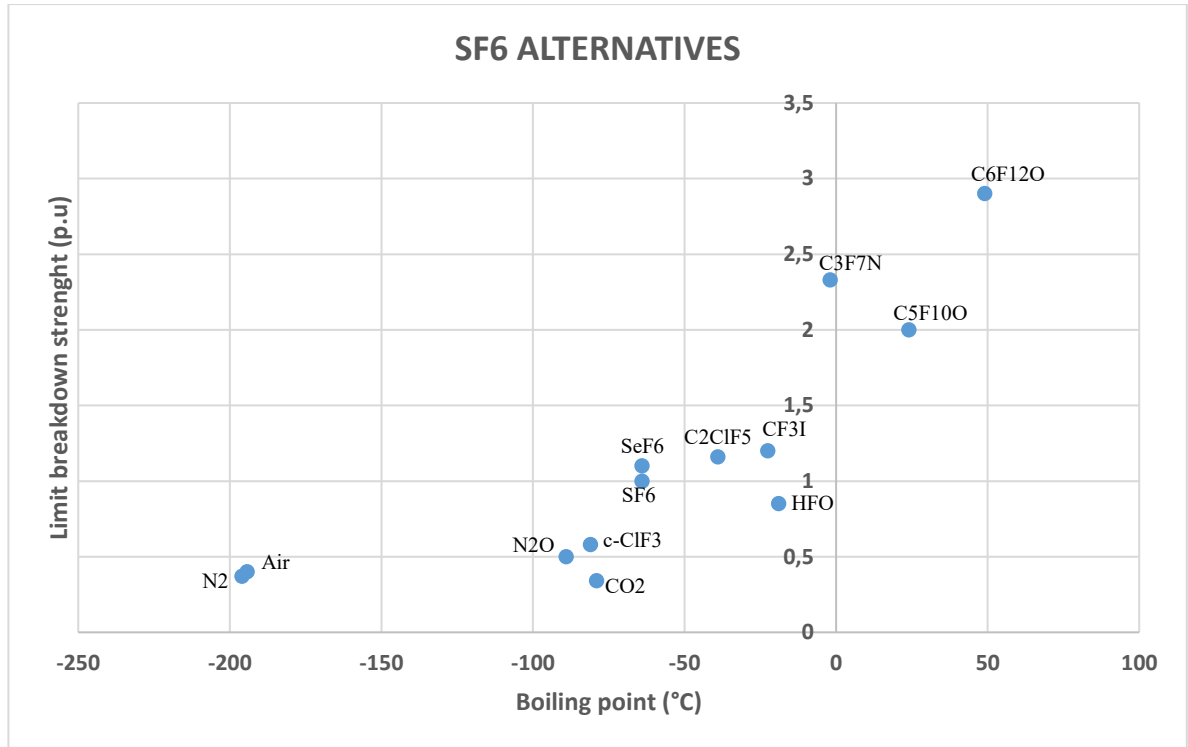


Figure 3.29 : Résumé des solutions alternatives au SF₆ en fonction de leur température d'ébullition et de leur tenue diélectrique par rapport au SF₆

Sur ces gaz montrés sur la figure, on ne constate qu'aucun présente à la fois une température d'ébullition et une résistance diélectrique meilleures que celle du SF₆. Néanmoins pour certains types d'applications, on peut toujours remplacer le SF₆ par un de ces gaz ou une combinaison de ces gaz en vue de satisfaire les contraintes de fonctionnement (tension et température minimale de fonctionnement, compatibilité avec les matériaux du disjoncteur, etc.). Le choix du gaz et son application industrielle passent par plusieurs tests recommandés par les normes CEI et IEEE qui seront l'objet du chapitre suivant.

L'air sec, l'azote, le dioxyde de carbone et le protoxyde de carbone sont les gaz ayant les points d'ébullition les plus bas et leurs capacités diélectriques relativement moyennes qui peuvent être améliorées en augmentant soit la pression, soit en le mélangeant avec un autre

gaz tampon. Pour le cas de l'air sec, son utilisation comme gaz d'isolation n'est pas recommandée avec le disjoncteur VOX en raison de la présence d'oxygène, environ 20%, qui cause l'oxydation des conducteurs (jeux de barre et brides mobiles en cuivre) sous l'effet des décharges électriques au fur et à mesure de la durée de vie de l'appareillage pouvant réduire la tenue diélectrique de l'isolation globale. Même constat pour le protoxyde d'azote N_2O qui ne peut être utilisé seul comme isolation gazeuse et que sa teneur dans un mélange est limitée à 40% avec le N_2 et 50% avec le CO_2 en raison du pouvoir oxydant qui équivaut à 23,5% à celui de l'oxygène [38].

Les gaz retenus pour poursuivre les investigations dans cette étude sont l'azote pur N_2 et ses mélanges avec le dioxyde de carbone CO_2 et le protoxyde d'azote N_2O .

Chapitre 4 - Tests et normes – Argumentation technique

Dans ce chapitre, les tests recommandés par les normes CEI et IEEE pour garantir et assurer un bon fonctionnement d'une isolation gazeuse d'un disjoncteur sont décrits ainsi que leurs procédures. Nous nous limiterons aux tests qui correspondent à notre application industrielle, c'est-à-dire dans le domaine moyenne tension. Une argumentation technique sera détaillée pour les tests obligatoires plus particulièrement ceux qui n'ont pas été étudiés dans ce chapitre car parmi certains tels que les tests qui ne concernent pas la partie d'isolation gazeuse (tests d'endurance mécanique, vérification de la protection, tests d'étanchéité). Les tests d'arc interne qui doivent être effectués en remplaçant le SF₆ par l'air ou l'azote pour des raisons environnementales et de sécurité, ne seront pas étudiés dans cette section car ayant été faits avec le disjoncteur existant avec SF₆ et réussis conformément aux recommandations exigées.

4.1 Tests diélectriques

Les équipements des systèmes d'alimentation doivent résister non seulement à la tension nominale mais aussi à différents types de surtensions imposées à leur fonctionnement afin de valider leur performance diélectrique. Par conséquent, il est nécessaire de tester ces équipements au cours de leur phase de développement et avant leur mise en service. Les tensions des tests sont définies dans les normes, par exemple celles des disjoncteurs à courant alternatif sont stipulées dans la norme CEI 62271-100 et sont basées sur les contraintes de

tensions dans les réseaux de transport qui sont définies par la norme CEI 60060-1. Les tests diélectriques majeurs dont les méthodes sont décrites en détail dans la norme CEI 60060-1 sont les tests de tenue en tension à fréquence industrielle, les tests de tenue aux chocs de foudre et les tests de tenue aux chocs de commutation. Les tests d'isolement dans les appareillages électriques actuels pour des tensions allant jusqu'à 245 kV sont limités aux impulsions de foudre et à l'essai d'une minute à fréquence industrielle.

4.1.1 Tenue de tension en fréquence industrielle (Power frequency voltage test)

La capacité de tenue de l'isolation de l'appareillage sous les conditions du système de tension à fréquence industrielle est évaluée à l'essai d'une minute sous 50 ou 60 Hz avec une tension d'essai réglée à un niveau supérieur à la tension de fonctionnement attendue afin de pouvoir simuler les contraintes susceptibles d'être rencontrées au cours du fonctionnement. La valeur de la tension de test est définie par les normes CEI 62271 et IEEE Std C37.09 pour chaque niveau de tension assignée et type d'utilisation. Pour une application intérieure, les essais sont effectués uniquement dans des conditions sèches tandis que pour une utilisation extérieure, les tests peuvent être requis dans des conditions de pluie standards pour lesquelles la norme CEI prescrit un taux de précipitation de 1 à 1,5 mm/mn.

Pour la procédure de test définie par les normes CEI 62271 et CEI 60060, la tension alternative est augmentée manuellement jusqu'à l'amplitude requise par la norme et maintenue pendant 60 s. Le test est réussi si aucun claquage ne se produit. Selon la norme CEI 60060-1 :2010, la tension alternative est augmentée graduellement de façon rapide à 75% de la valeur de la tension de test. Ensuite, elle sera élevée avec 2% de la tension de test par seconde jusqu'à la valeur nominale avant d'être maintenue pendant 1 min avec une marge de $\pm 1\%$. Enfin, la tension est réduite à 50% avant d'être coupée. Dans le cas où les tests de

décharges partielles devraient être faites, les marches vers le haut et vers le bas doivent être à des tensions identiques avec une durée minimale d'essai d'une minute pour avoir une comparaison avant et après l'essai de tenue [24-27]. Les conditions de tests sont présentées dans les tableaux 4.1 et 4.2.

Tableau 4.1 : Conditions de tests de tenue en fréquence industrielle – CEI 62271-100 [29]

Conditions de test	Tension appliquée à	Terre reliée à
1	A et a	BbCcF
2	B et b	AaCcF
3	C et c	AaBbF

Note1 : La condition de test 3 peut être omis si l'arrangement des pôles extérieurs est symétrique par rapport au pôle central et au cadre

Note 2 : Les conditions de test 2 et 3 peuvent être omis si l'arrangement des pôles est entièrement symétrique les uns par rapport aux autres et au cadre

Noms des pôles à définir avec le constructeur

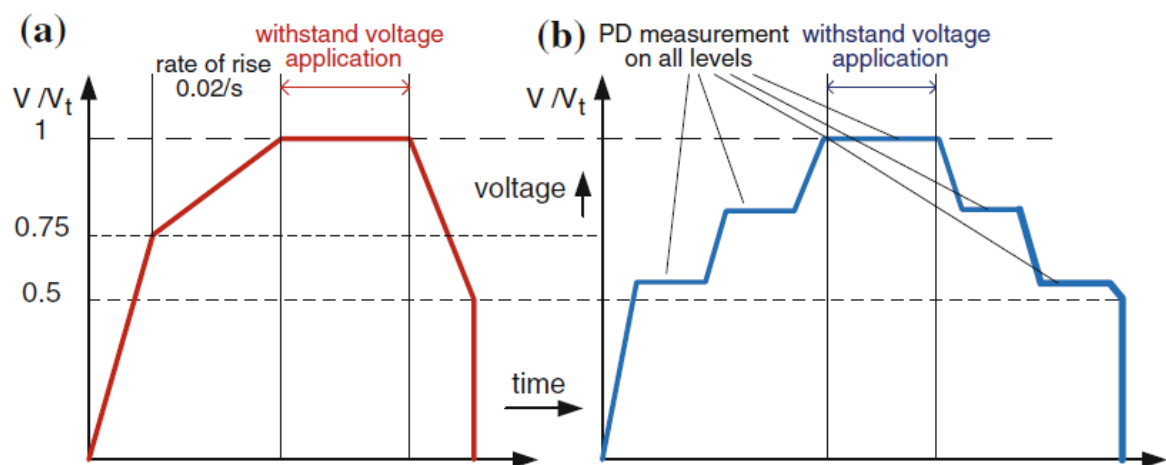


Figure 4.1 : Procédure d'essai de tenue en tension ca et cc a) Conventiennel ; b) avec DP surveillées [25]

Tableau 4.2 : Valeurs de la tension de fréquence industrielle selon les normes CEI et ANSI [28]

Tension assignée (kV)	Fréquence industrielle (kV) norme CEI
7,2	20
12	28
17,5	38
24	50
36	70
Tension assignée (kV)	Fréquence industrielle (kV) norme ANSI
Matériel d'intérieur	
4,16	19
7,2	36
13,8	36
38	80
Matériel d'extérieur	
15,5	50
25,8	60
38	80

4.1.2 Tenue aux chocs de foudre (*Lightning impulse voltage test*)

Les tests de tension de chocs de foudre sont effectués pour évaluer la contrainte diélectrique des surtensions transitoires causées par la foudre. Les coups de foudre frappant sur les lignes de transmission provoquent une forte montée de tension dans la ligne et créent des ondes qui se propagent le long de la ligne et peuvent éventuellement endommager l'isolation du système. L'onde de choc de foudre est définie par la norme CEI 60060-1

comme une impulsion apériodique qui atteint 90% de sa valeur maximale en 1,2 μs puis diminue lentement jusqu'à la moitié de sa valeur de pointe à 50 μs , comme montrée à la figure 4.2. Les conditions de tests sont résumées aux tableaux 4.3 et 4.4.

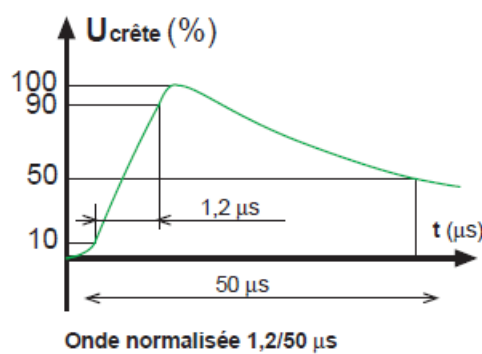


Figure 4.2 : Onde normalisée 1,2/50 μs par CEI 60060-1 [28]

Tableau 4.3 : Conditions de tests de choc de foudre – norme CEI 62271-1 [29]

Conditions de tests	Partie principale	Partie complémentaire	Terre reliée à
	Tension appliquée à		
1	A	a	BbCcF
2	B	b	AaCcF
3	C	c	AaBbF
4	a	A	BbCcF
5	b	B	AaCcF
6	c	C	AaBbF

Note 1 : Les conditions de test 3 et 6 peuvent être omises si l'arrangement des pôles extérieurs est symétrique par rapport au pôle central et au cadre

Note 2 : Les conditions de test 2, 3, 5 et 6 peuvent être omises si l'arrangement des pôles est entièrement symétrique les uns par rapport aux autres et au cadre

Note 3 : Les conditions de test 3 et 6 peuvent être omises si l'arrangement des terminaux des pôles est symétrique par rapport au cadre

Noms des pôles à définir avec le constructeur

Tableau 4.4 : Valeurs de la tension de l'onde de choc de foudre selon les normes CEI et ANSI [28]

Tension assignée (kV)	Tenue à l'onde de choc (kV) norme CEI
7,2	60
12	75
17,5	95
24	125
36	170
Tension assignée (kV)	Tenue à l'onde de choc (kV) norme ANSI
Matériel d'intérieur	
4,16	60
7,2	95
13,8	95
38	150
Matériel d'extérieur	
15,5	110
25,8	125 150
38	150 200

Ce test est réalisé dans des conditions sèches. Les méthodes d'essais de tenue aux impulsions choc de foudre sont recommandées par la norme CEI 60060-1:2010 :

- Pour les isolations en intérieur, 3 essais d'impulsions de tension sont appliqués et aucun claquage n'est permis ;

- Pour les tests de choc de foudre, des impulsions normalisées (1,2/50 μ s) sont appliquées en séquence de 2 applications d'impulsions à 80% de la valeur pic et 15 applications d'impulsions à 100% de la valeur pic pour chaque polarité. Le test est réussi si moins de 3 claquages apparaissent dans la série des 15.

La procédure de test selon la norme IEEE Std C37.09-1999 est la suivante :

- Avec les contacts du disjoncteur ouverts, appliquer 3 chocs de foudre pour chaque polarité sur chaque terminal du disjoncteur individuellement avec tous les autres terminaux mis à la terre
- Avec les contacts du disjoncteur fermés, appliquer 3 ondes d'impulsions de coups de foudre pour chaque polarité sur chaque terminal du disjoncteur individuellement avec tous les autres terminaux mis à la terre
- Si au cours du premier groupe de 3 essais consécutifs décrits dans les deux cas ci-dessus un claquage apparaît sur un essai du groupe, une deuxième série de 9 essais devrait être effectuée. Si le disjoncteur résiste à ces 9 essais, les claquages du premier groupe devraient être considérés comme aléatoires et le disjoncteur doit être considéré comme ayant réussi le test.

4.1.3 Test de décharges partielles

Selon la commission électrotechnique internationale CEI, les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques localisées qui court-circuitent partiellement l'isolation séparant deux conducteurs et qui peuvent ou non se produire à côté d'un conducteur. Elles sont en général la conséquence de concentrations locales de contraintes électriques causées par des fissures, cavités, contaminants, etc. dans l'isolant (matériau solide, liquide, gazeux

ou mixte) ou à la surface de l'isolation. Le terme « décharge partielle » rassemble un large groupe de phénomènes de décharges telles que :

- Décharges internes se produisant dans le vide ou dans des cavités dans les diélectriques liquides ou solides ;
- Décharges de surface apparaissant dans les limites de différents matériaux d'isolation ;
- Décharges en forme de couronne (décharges corona) se produisant dans les diélectriques gazeux en présence d'un champ électrique non homogène ;
- Impact continu des décharges dans les diélectriques solides formant ainsi des chaînes de décharges.

Un obstacle important qui affecte la pérennité des équipements de haute tension est la détérioration progressive et systématique du système d'isolation par l'action des décharges partielles. Chaque apparition de décharge provoque une détérioration du matériau d'isolation par l'impact énergétique des électrons de haute énergie et des ions accélérés entraînant différentes transformations chimiques. C'est pourquoi il est important de mesurer les décharges partielles lors des tests de tenue diélectrique pour détecter les imperfections dans les performances d'isolation en toute partie de l'équipement et évaluer la durée de vie de l'isolation. Le système de mesure des décharges partielles est une partie importante des tests de tenue de tension à fréquence industrielle particulièrement dans la phase de développement, au contrôle final avant expédition ou durant les dépannages [25][27].

En ce qui concerne la procédure d'essai, les mesure des décharges partielles doivent être en conformité avec la norme IEEE Std C37.301 ou CEI 60270. Les essais avec l'objet de test doivent être effectués aussi bien en position ouverte qu'en position fermée. Toutes les surfaces normalement mises à la terre, doivent être mises à la terre et toutes les surfaces normalement isolées, doivent être isolées. La procédure générale d'essai est la suivante :

- Tension de pré-stress : $U_{pré-stress} = 1,3 * 1,5 * \frac{U_r}{\sqrt{3}}$, équivaut à 1,95 fois la tension nominale phase-neutre ;
- Tension de mesure U_{pd} équivaut à 1.1 fois la tension nominale phase-neutre.

La tension d'apparition de DP U_i : tension appliquée la plus basse à laquelle l'amplitude d'une quantité d'impulsions de DP devient égale ou supérieure à 10 pC sauf définition contraire du constructeur à son équipement.

La tension d'extinction de DP U_e : tension appliquée la plus élevée à laquelle l'amplitude d'une quantité de DP choisie devient égale ou inférieure à 10 pC sauf définition contraire du constructeur à son équipement.

- a) Commencant à 60% de la tension de pré-stress $U_{pré-stress}$, élever la tension jusqu'à $U_{pré-stress}$, noter et enregistrer la tension de démarrage de PD U_i ;
- b) Maintenir la tension à la valeur de tension $U_{pré-stress}$ pendant 60s ;
- c) Diminuer la tension jusqu'à la valeur de la tension de mesure U_{pd} . Maintenir cette tension pendant 60s et noter le niveau de DP à la fin de cette période.

Noter et enregistrer la tension d'extinction de PD U_e qui peut apparaitre à un niveau de tension inférieur ou supérieur à la tension de mesure. Dans tous les cas, la tension d'extinction de PD doit être notée et enregistrée.

Argument : les tests diélectriques sont des tests d'isolation entre les phases et la terre et permettent de vérifier la capacité d'isolation du disjoncteur aux différents types de contraintes de surtensions imposés lors du fonctionnement pour valider les performances diélectriques du gaz. Il est important de refaire les tests diélectriques si le gaz d'isolation est modifié.

4.2 Test d'élévation de température (Temperature rise test)

L'élévation de température, selon la norme CEI 62271-1:2007, est définie comme la différence entre la température de l'élément considéré et la température ambiante. Le test est réalisé à courant nominal I_r et l'élévation de température est déterminée par la méthode de mesure par résistance. La durée de test est déterminée lorsque l'élévation de température n'excède pas 1K/h. Le test est réussi lorsque l'élévation de température de tous les parts de l'équipement ne dépassent pas les limites précisées dans le tableau 3 de la norme CEI 62271-1:2007 (Annexe-A). Dans le cas d'appareillages de commutation et de commande de type ouvert sans pièces ferreuses adjacentes au trajet du courant, un essai effectué à 50 Hz est également valable à 60 Hz à condition que les valeurs d'échauffement enregistrées pendant l'essai à 50 Hz ne dépassent pas 95% des valeurs maximales admissibles.

Argument : les tests effectués sur le VOX avec SF₆ ont été avec succès. Cependant, si le gaz d'isolation est modifié, alors les tests doivent être refaits car ils permettent de déterminer la capacité de conduction du gaz d'isolation à travers les conducteurs quand le disjoncteur est en fonctionnement normal. Le comportement thermique interne du disjoncteur varie en fonction du gaz car les propriétés thermiques du gaz modifient la dissipation de chaleur.

4.3 Tests de tenue à basse température

La procédure d'essai selon la norme IEEE C37.09-1999 pour montrer la capacité d'un disjoncteur à être opérationnel à une température ambiante de -30°C est la suivante :

- La température ambiante est abaissée à -30°C pendant une durée de 24h avec le disjoncteur en position fermée. Pendant cette période, les éléments chauffants normalement installés doivent être mis sous tension. A la fin des 24h, 10 cycles

doivent être effectués à la tension de commande et pression de fonctionnement assignées, enregistrer les vitesses de fonctionnement du disjoncteur.

- 10 cycles doivent être effectués à tension nominale après que l'équipement a été maintenu à la température ambiante de -30°C avec tous les équipements chauffants normalement installés hors tension et la tension de commande déconnectée pendant une période d'au moins deux heures.
- Si les installations d'essai ne permettent pas cette démonstration, alors la performance des composants importants du disjoncteur peut être démontrée individuellement.

Argument : Les résultats de tests effectués sur le VOX avec SF_6 ont montré que le mécanisme du disjoncteur fonctionne correctement sous une température de -25°C . De même, des tests sous -40°C ont prouvé aussi que le disjoncteur est opérationnel, mais les propriétés de la graisse utilisée sur le mécanisme, notamment la viscosité et la capacité thermique, changent avec l'effet de la basse température et affectent par conséquent le temps d'ouverture et de fermeture de l'interrupteur.

4.4 Tests de courant de courte durée (Short-time current test)

Le courant de courte durée d'un disjoncteur est la valeur efficace du courant du courant (exprimée en kA pour 1s) que le disjoncteur peut transporter en position complètement fermée pendant un temps déterminé dans des conditions d'utilisation et de comportement prescrites. La durée nominale de court-circuit est généralement de 1 seconde et le disjoncteur doit pouvoir supporter un courant de court-circuit égal à son courant de coupure nominal pendant une seconde. Pendant le test de courant de courte durée, les parties conductrices et l'isolation ne doivent pas être détériorées, les contacts ne doivent pas être endommagés ou soudés.

Selon la norme IEEE C37.09-2018, la capacité requise en transport du courant de courte durée (required short-time current carrying capability) du disjoncteur est démontrée par test STC dans le tableau suivant :

Tableau 4.5 : Tests de courant de courte durée [28]

Test duty	Operating duty	Test voltage (kV)	Making I [kA(pk)]	Short-circuit current (kA)
T10	O – tr – CO – tr' - CO	E		0,1 I
T30	O – tr – CO – tr' - CO	E		0,3 I
T60	O – tr – CO – tr' - CO	E		0,6 I
T100s	O – tr – CO – tr' – CO	E	F * I	I
T100a	Three Os	E		
STC	Closed position		F * I	I for T seconds

F=2.5 pour 50Hz ou 2.6 pour 60Hz et T = 1s selon IEEE C37.06

Dans certains cas, la durée du test démontrant la *short-time current carrying capability* peut ne pas être exactement celle spécifiée. Cependant, le test est valide si la durée du courant de court-circuit se situe dans les 25% du temps spécifié, et le courant actuel moyen au carré multiplié par la durée de test dépasse le courant nominal au carré multiplié par la durée nominale. Après ces tests, le disjoncteur devra être refroidi pendant au moins 5 minutes et ouvert à vide pour démontrer que les contacts ne se sont pas soudés. Le test est réussi si le disjoncteur s'ouvre avec succès.

Argument : les tests effectués sur le disjoncteur VOX avec SF₆ ont été satisfaisants. Le disjoncteur, à travers son interrupteur à vide VG4A ou VG5, a rempli les critères d'interruption d'arc dans les temps spécifiés par les standards durant chaque séquence d'opérations des tests. Le courant mesuré n'a pas dépassé la capacité pic de courant de l'interrupteur (104 kA) et la tension de recouvrement (recovery voltage) est environ égale à la tension appliquée lors des tests. Ces tests ne doivent pas être refaits si le gaz d'isolation change car dans les tests effectués, le SF₆ n'est pas utilisé comme milieu d'interruption mais plutôt qu'un gaz d'isolation et le VOX utilise la technologie d'interruption à vide. Lorsque le gaz d'isolation change, cela n'affectera pas le circuit de test et les résultats car les performances d'ouverture et de fermeture dépendent seulement de l'interrupteur à vide et de son mécanisme d'ouverture et fermeture.

4.5 Tests de commutation des courants capacitifs (Capacitor current switching tests)

Ces tests démontrent la capacité de conception du disjoncteur à respecter son facteur de surtension transitoire nominal en passant par une série requise d'essais de commutation de courant capacitif sur un circuit essentiellement sans perte. Ces tests sont décrits dans CEI 62271-100 clause 6.111 et IEEE Std C37.09-1999 clause 4.10.

Les tests effectués avec le VOX isolé au SF₆ ont démontré séparément les performances du dispositif d'interruption du disjoncteur (VG4A/VG5) de pouvoir commuter des courants associés à sa capacité de commutation de courant de charge de ligne de transmission, de batteries de condensateur unique et à son câble-courant de charge nominal (single-capacitor bank, cable-charging and line-charging current switching tests). La surtension maximale ouverture/fermeture obtenue n'a pas dépassé la valeur limite pic de TRV spécifiée 71 kV et

n'a pas causé de décharge disruptive durable, ce qui prouve que les interrupteurs à vide et leur mécanisme d'ouverture/fermeture peuvent commuter correctement les courants requis pour ces tests. Comme montré sur la figure 4.3, l'alimentation est connectée aux contacts mobiles de l'interrupteur à vide et il en résulte que le changement de gaz d'isolation n'entraîne pas une modification des résultats de test.

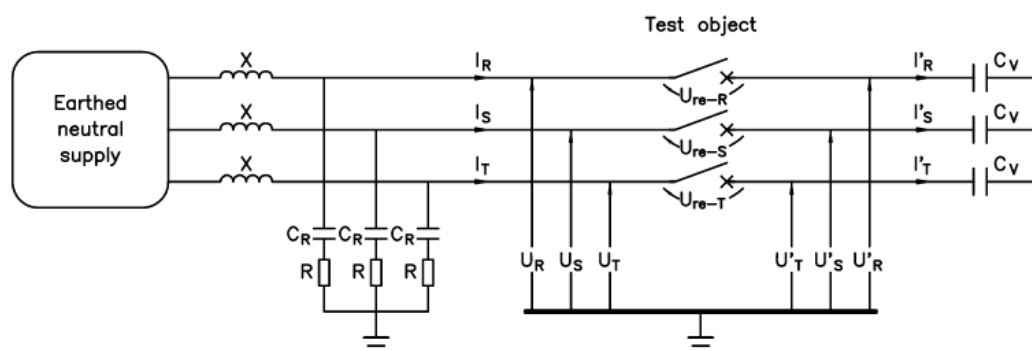


Figure 4.3 : Circuit de test pour commutation de courant capacitif – CEI 62271-100

4.6 Test de commutation des courants hors-phase (Out-of-phase switching current)

Ces tests permettent de déterminer la capacité du disjoncteur à établir ou interrompre le courant durant des conditions hors-phase. Ils sont décrits dans le tableau 4.6 selon IEEE Std C37.09.

Tableau 4.6 : Conditions de tests hors-phase – IEEE Std C37.09

Test duty	Operating duty	Current I
1	Two Os	0,05 I to 0,10 I
2	O-CO	0,25 I
2a	CO	0,25 I

Ces tests ont été effectués dans le disjoncteur VOX isolé au SF₆ et les résultats ont été satisfaisants conformément aux normes IEEE Std C37.09, table 4 et CEI 62271-100 clauses 6.102 à 6.105 et 6.110. Avec une tension de 45 kV appliquée durant les tests, le courant de coupure est inférieur au courant de court-circuit de fermeture (short circuit closing current) (104 kA) que le disjoncteur peut supporter et la tension de rétablissement maximale obtenue sur les 3 phases est de 44,8 kV. Ce qui montre que le dispositif d'interruption du disjoncteur en l'occurrence le mécanisme d'ouverture et de fermeture M5S ainsi que les interrupteurs à vide VG4A ou VG5, peuvent établir et couper les courants durant des conditions hors-phase. Lorsque le gaz d'isolation est changé, il n'y a pas d'incidence sur les résultats de test car les performances d'ouverture et de fermeture des séquences d'opérations de courant hors-phase dépendent juste que du mécanisme d'ouverture et fermeture et des interrupteurs à vide VG4A ou VG5 qui demeurent inchangés.



a)



b)

Figure 4.4 : Interrupteurs à vide a) VG4A-1250 A et b) VG5-2000 A du VOX

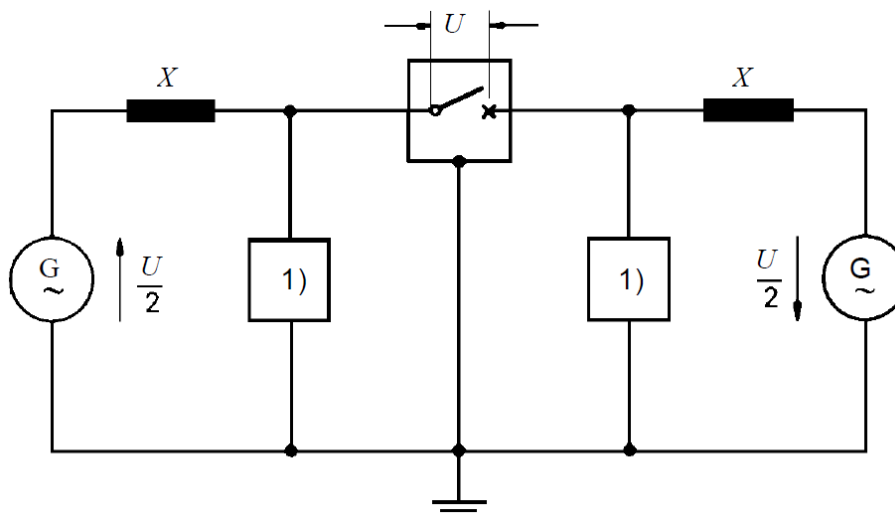


Figure 4.5 : Circuit de test pour commutation hors-phase monophasé – CEI 62271-100

4.7 Test d'arc interne (Internal arc test)

C'est un test optionnel, décrit dans CEI 60298 pour les disjoncteurs reliés à la terre. Ce test permet de démontrer l'efficacité de la conception du disjoncteur à protéger les personnes en cas d'explosion électrique interne, de contenir toute élévation de pression, d'évacuer les flammes et gaz d'échappement dans les zones désignées. Le test est effectué avec un arc initié dans chaque compartiment MT et un courant de défaut nominal de 25 kA pour les systèmes de 11 kV et de 31,5 kV pour les systèmes de 33 kV. Le SF₆ est généralement remplacé durant le test par l'air ou l'azote pour des raisons environnementales et de sécurité. La surpression causée par l'arc électrique s'élève plus rapidement dans l'air que dans le SF₆ en raison des capacités thermiques ($C_{\text{air}} > C_{\text{SF}_6}$) et dans les mêmes conditions le stress mécanique sur l'enveloppe externe du disjoncteur est plus élevé dans l'air que dans le SF₆ et garantit une protection maximale par rapport à la rupture et à la déformation de l'équipement. Lorsque le SF₆ est remplacé par un gaz ayant une capacité thermique supérieur comme l'air

alors le test d'arc interne n'a pas besoin d'être refait. Un résumé de l'ensemble des tests est présenté au tableau 4.7.

Tableau 4.7 : Résumé des tests et normes selon CEI et IEEE

TESTS	CLAUSE - STANDARDS	DESCRIPTION	BEST STANDARD
Dielectric tests			
Power frequency voltage	4.4.3 - IEEE Std C37.09-1999	No flashovers and no damage permitted after tests	EQUIVALENT
	6.2.5 - CEI 62271-100-2007	No flashovers and no damage permitted after tests	
Lightning Insulation	4.4.4 - IEEE Std C37.09-1999	3 consecutives lightning impulses of each polarity, if flashover occurs, apply a second group of 9 impulses and then no flashover is permitted to pass the test	CEI 62271-100
	6.2.5 - CEI 62271-100-2007	15 tests applied of each serie and at most 2 disruptive discharges permitted to pass the test	
Chopped wave lightning impulse	4.4.6 - IEEE Std C37.09-1999	3 consecutives lightning impulses of each polarity, if flashover occurs, apply a second group of 9 impulses and then no flashover is permitted to pass the test	IEEE Std C37.09-1999
Short circuit tests			
Test duties 1, 2, 3	4.8.3 - IEEE Std C37.09-1999	TD1, TD2, TD3	IEEE Std C37.09-1999
	6.106.1 à 6.106.3 - CEI 62271-100	T10, T30, T60	

TEST	CLAUSE - STANDARDS	DESCRIPTION	BEST STANDARD
Test duty 4	4.8.3.2 - IEEE Std C37.09-1999	TD4 (ou TD4a, TD4b)	
	6.106.4 - CEI 62271-100	T100s (ou T100s(a) ou T100s(b))	
Test duty 5	4.8.3.3 - IEEE Std C37.09-1999	3 asymmetrical operations made not more than 15mn apart	IEEE Std C37.09-1999
Tests duties 6 and 7	4.8.3.4 - IEEE Std C37.09-1999	not required if tests duties 4 and 5 are made on a single-phase basis, capability for interrupting a single phase-to-ground fault under most severe conditions	
	6.108 - CEI 62271-100	Capability of clearing single pole the short circuit current	
Tests duties 8 and 9	4.8.3.5 - IEEE Std C37.09-1999	to demonstrate short line fault capability, single-phase tests made at 58% of maximum rated voltage	
	6.109 - CEI 62271-100	Only applicable for 3 poles CB designed for direct connections to overhead lines having a rated voltage of 52kV and above and a rated short-circuit breaking current exceeding 12,5kA	
Test duty 10	4.8.1.6 - IEEE Std C37.09-1997	Short time test	
Short time current and peak withstand current	6.6-CEI 62271-100/ 6.6-CEI 60694	Ability to carry the rated peak withstand current and the rated short time withstand current	CEI 62271-100

TEST	CLAUSE - STANDARDS	DESCRIPTION	BEST STANDARD
Out-of-phase switching	4.12 - IEEE Std C37.09-1999	This test is made only if out-of-phase switching current rating has been assigned by the manufacturer, OP1 (5 to 10% Icc), OP2a (25% Icc), OP2b (25% Icc)	CEI 62271-100
	6.110 - CEI 62271-100	OP1 (30% Icc) OP2 (100% Icc)	
Capacitor switching			
Isolated cap. bank & cable switching TD1A et TD1B	4.10 - IEEE Std C37.09-1999		CEI 62271-100
	6.111.5.3 - CEI 62271-100		
Back-to-back cap. bank or cable switching	4.10 - IEEE Std C37.09-1999		
	6.111.5.3 - CEI 62271-100		
Open wire line charging current switching	4.10 - IEEE Std C37.09-1999		
	6.111.5.1 - CEI 62271-100		
Cable-charging current switching test	6.111.5.2 - CEI 62271-100		

TEST	CLAUSE - STANDARDS	DESCRIPTION	BEST STANDARD
Temperature rise	4.3 - IEEE Std C37.09-1999	Measuring temperature rise by thermocouple, thermometer, or resistance	EQUIVALENT
	6.5 - CEI 62271-100 /6.5- CEI 60694	Measuring temperature rise by thermocouple, thermometer, or resistance	
Internal arc fault	IEEE C37.20.7	2 levels of accessibility	CEI 60298-1996
	6.108 - CEI 60298-1996 / CEI 62271-200	6 criteria to meet *optional test, destructive test	
Low temperature operating	4.13.2 - IEEE Std C37.09-1999	Capability of operating at ambient temperature of -30°C /-50°C	EQUIVALENT
	6.101.5 -CEI 62271-100 / CEI 60129	Capability of operating at ambient température of -30°C/-50°C	
Mechanical life	4.13 - IEEE Std C7.09-1999	Endurance	CEI 62271-100
	6.101 - CEI 62271-100	*Endurance + mechanical operation + environnement	
Load current endurance	4.9.2 - IEEE Std C37.09-1999	see IEEE Std C37.06-1997	IEEE Std C37.09-1999

Au terme de ce chapitre, l'ensemble des tests nécessaires pour un bon fonctionnement d'un disjoncteur ont été revue en profondeur avec les procédures d'essai prescrites par les normes pertinentes IEEE et CEI. Ces différents tests seront réalisés sur le nouveau système d'isolation gazeuse adopté pour notre application industrielle.

Chapitre 5 - Aspects expérimentaux

Après avoir défini les procédures d'essai et analysé les arguments techniques du chapitre précédent, cette partie de l'étude décrit les tests pertinents pour l'application industrielle à savoir les tests diélectriques (tenue à la fréquence industrielle, tenue aux impulsions de foudre, décharges partielles), le test d'élévation de température et l'analyse des résultats en comparaison avec les résultats du SF₆ pour obtenir les mêmes performances diélectriques du disjoncteur. Par la suite, des tests sont effectués pour déterminer la pression minimale requise pour passer les tests diélectriques pour chaque type de disjoncteur (15; 27,5 et 38 kV).

5.1 Tests expérimentaux

Les essais expérimentaux décrits ci-après ont été réalisés avec les gaz SF₆, N₂ et les mélanges N₂-CO₂ et N₂-N₂O. Les tests d'impulsions de foudre, étant les contraintes en tension les plus sévères sont les premiers tests effectués permettant d'éliminer les gaz n'ayant pas la capacité de tenue en tension requise pour ces tests. Ensuite, les tests de tenue à la fréquence industrielle sont effectués avec les gaz ayant réussi les tests d'impulsions de foudre.

5.1.1 Test de tenue aux chocs de foudre normalisés

Ces tests ont été réalisés sur le site de CO7 Technologies avec l'équipe de Energie Conseil Olivier Inc. composé de Guy Olivier et Pierre LaRue. Le banc de test, montré au figure 5.1, est composé de :

- Un disjoncteur VOX de tension nominale allant jusqu'à 38 kV ;

- Un générateur d'impulsions de foudre normalisées de 300 kV ;
- Un oscilloscope pour enregistrer les tracés de courbes ;
- Un diviseur capacitif de rapport 762/1 ;
- Un transformateur régulateur.

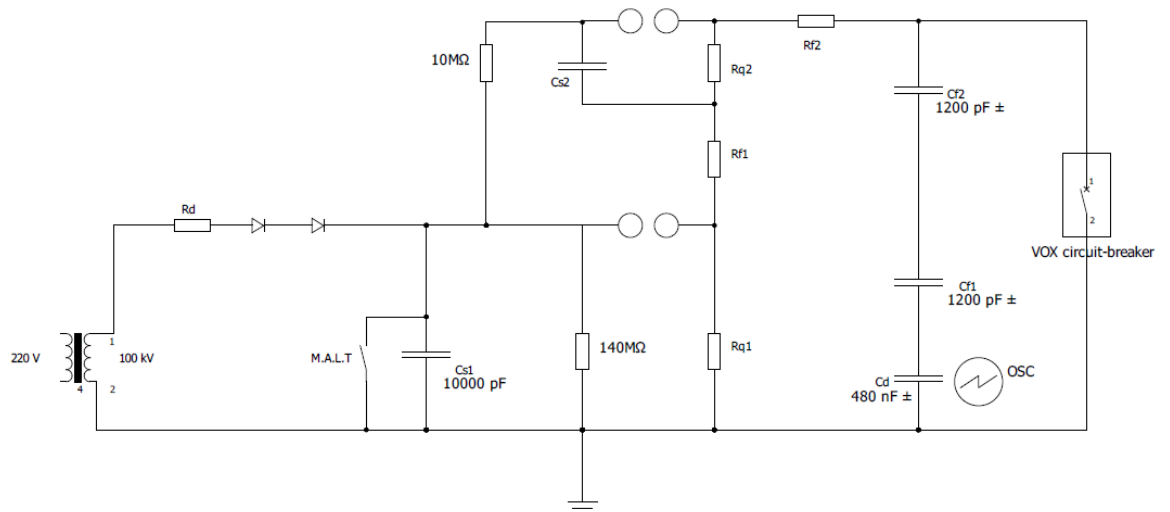


Figure 5.1 : Schéma électrique du générateur d'impulsions de foudre à deux étages [34]

Tableau 5.1 : Composantes variables du générateur [34]

Séquences	C1	R _{F1}	R _{F2}	R _{Q1}	R _{Q2}	C _{F1}	C _{F2}	C _d	Rapport de division
1 à 18	10000 pF	375 Ω	161 Ω	6100 Ω	6100 Ω	1260 pF	1257 pF	479 nF	762

5.1.1.1 SF₆ sous une pression de 1,5 bar abs

Les derniers tests expérimentaux de tenue aux chocs de foudre du VOX isolé au gaz SF₆ ont été effectués conformément aux recommandations des normes IEEE Std C37.09-1999,

chapitre 4.4 / ANSI C37.06-2000 par Areva T&D en 2005. Les résultats ont été satisfaisants et sont résumés au tableau 5.2.

Tableau 5.2 : Résultats des tests aux chocs de foudre avec SF₆ sous une pression de 1,5 bar abs

SF6 à 1,5 bar abs			Tests d'impulsions de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	B, b	A, a, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	C, c	A, B, a, b, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
Ouvert	A	a, B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	B	A, a, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	C	A, a, B, b, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	a	A, B, b, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	b	A, a, B, C, c, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK
	c	A, a, B, b, C, f	3	3	+	200	OK
			3	3	-	200	OK

5.1.1.2 Azote pur sous une pression de 2,17 bars abs

Ces tests ont été réalisés sur le site industriel de CO7 Technologies Inc. par Energie Conseil Olivier (ECO), compagnie spécialisée dans ces types d'essais. Il a fallu augmenter la pression d'azote à 2,17 bars abs pour réussir les tests aux chocs de foudre à 170 kVp correspondant pour un disjoncteur extérieur de 38 kV selon la norme CEI 60060-1 2010.

Tableau 5.3 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs à 170 kVp avec l'azote à 2,17 bars abs [34]

N ₂ à 2.17 bars abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	B, b	A, a, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	C, c	A, B, a, b, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
Ouvert	A	a, B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	B	A, a, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	C	A, a, B, b, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	a	A, B, b, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	b	A, a, B, C, c, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK
	c	A, a, B, b, C, f	15	15	+	170	OK
			15	15	-	170	OK

Ce tableau donne les conditions d'essais et l'état du disjoncteur lors des 18 séquences d'essais. Les conclusions retenues montrent que le disjoncteur rempli d'azote à une pression absolue de 2,17 bars a subi avec succès l'ensemble des séries de 15 chocs de 170 kVp des deux polarités conformément aux exigences de l'article 7.3.1.2 de la norme CEI 60060-1 2010. Aucun claquage n'a été enregistré durant les tests.

5.1.1.3 Azote pur sous une pression de 2,5 bars abs

Dans la même lancée que les tests effectués avec la pression de 2,17 bars abs pour une tension de 200 kVp ont été terminés avec plus de 3 claquages montrant ainsi la limite d'isolation de cette pression pour ce type de test. Une augmentation de la pression est nécessaire pour effectuer les tests à 200 kVp. Le disque d'éclatement ne pouvant supporter une pression supérieure à 2,2 bars abs a été remplacé par une plaque soudée à la place pour continuer les tests avec une pression d'azote de 2,5 bars abs. Le tableau 5.4 résume les résultats obtenus.

Tableau 5.4 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs à 200 kVp avec l'azote à 2,5 bars abs [47]

N ₂ à 2,5 bars abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Claquages
Fermé	A, a	B, C, b, c, f	15	15	+	200	0
			15	15	-	200	0
	B, b	A, C, a, c, f	15	13	+	200	2(+)
			15	14	-	200	1(-)
	C, c	A, B, a, b, f	15	13	+	200	2(+)
			15	13	-	200	2(-)

Conclusion : le nombre de claquage pour chaque polarité n'ayant pas dépassé la limite fixée à 2 par la norme CEI 60060-1 2010, donc les tests de tenue aux chocs de foudre à 200 kVp sont réussis pour l'azote à 2,5 bars abs.

5.1.1.4 Mélange gazeux N₂-CO₂

Les premiers tests effectués avec le mélange (80-20) N₂-CO₂ à la pression de 2,5 bars abs ont échoué dès les premiers chocs appliqués des deux polarités. La pression est alors augmentée de 0,2 bar pour tenir les premières impulsions de foudre à 200 kVp. Les résultats de tests sont présentés aux tableaux suivants.

Tableau 5.5 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec (80-20) N₂-CO₂ à 2,7 bars abs

80%N ₂ -20%CO ₂ à 2,7 bar abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Claquages
Fermé	A, a	B, C, b, c, f	15	15	+	200	0
			12	9	-	200	3
			4	1	-	187	3
			4	1	-	185	3

Tableau 5.6 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec (60-40) N₂-CO₂ à 2,7 bars abs

60%N ₂ -40%CO ₂ à 2,7 bar abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Claquages
Fermé	A, a	B, C, b, c, f	4	2	+	187	2
			4	1	-	170	3

Conclusion : l'augmentation de la quantité de CO₂ dans le mélange ne fait que détériorer la capacité d'isolation notamment en polarité négative. Ce qui signifie que dans ce mélange l'ajout de CO₂ n'améliore pas davantage la capacité diélectrique surtout en polarité négative et permet aux électrons de gagner assez d'énergie pour quitter les surfaces des conducteurs et participer au claquage. En effet, le claquage électrique de ce système à isolation gazeuse est régi par les conducteurs qui injectent des électrons dans ce gaz plus particulièrement au niveau des irrégularités de surface où le champ se trouve être plus grand. Par conséquent, ce mélange possède une tenue diélectrique plus faible que celle de l'azote pur même en augmentant la pression. De plus, la formule empirique pour déterminer la densité normalisée du champ critique réduit d'un mélange montre que, quels que soient les valeurs des coefficients k₁ et k₂, la densité normalisée du champ critique réduit du mélange N₂-CO₂ reste toujours inférieure à celle de l'azote pur, et par conséquent la performance d'isolation est réduite comparée à celle de l'azote [46].

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{N_2} = 120 Td \quad \text{Équation 5.1}$$

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{CO_2} = 95,2 Td \quad \text{Équation 5.2}$$

$$\left(\frac{E}{P}\right)_{Mix} = \left(\frac{E}{P}\right)_{CO_2} + \left[\left(\frac{E}{P}\right)_{N_2} - \left(\frac{E}{P}\right)_{CO_2} \right] * (1 - x^{k_1})^{k_2} \quad \text{Équation 5.3}$$

x : pourcentage de CO₂ dans le mélange

Td : Townsend, égal à 10⁻¹⁷ V.cm²

k₁ et k₂ : constantes obtenues par interpolation de courbe

$\left(\frac{E}{P}\right)_{Mix}$ en fonction du pourcentage de CO₂ dans le mélange.

5.1.1.5 Mélange 70%N₂-30%N₂O

Le mélange N₂-N₂O comme vu dans le chapitre 3, présente de bonnes caractéristiques en contrainte de surtension par rapport au SF₆ est étudié ici en contrainte de surtension aux chocs de foudre normalisés avec 30% de N₂O. Les tests effectués avec une pression de 2,5 bars abs du mélange à 150 kVp en polarité positive ont été un échec comme le montrent les résultats présentés sur le tableau suivant.

Tableau 5.7 : Séquences d'essais de tenue aux ondes de chocs avec 70%N₂-30%N₂O à 2,5 bars abs

70%N ₂ -30%N ₂ O à 2,5 bars abs			Tests aux chocs de foudre				
Etat du disjoncteur	Tension	Terre	Appliquée	Réussie	Polarité	Tension pic (kVp)	Claquages
Fermé	A, a	B, C, b, c, f	4	3	+	150	1
			4	1	+	150	3

Conclusion : ce mélange ne peut pas faire office d'isolation gazeuse pour le VOX car ne peut supporter une contrainte de surtension en choc de foudre de 150 kVp ou plus. Ce phénomène est causé par les fortes décharges électriques qui apparaissent dans ce mélange gazeux entraînant ainsi le claquage prématuré. Ce mélange n'est pas assez efficace que l'azote pur car ayant une tenue diélectrique moins élevée signifiant ainsi que ces deux gaz ne sont pas compatibles pour donner un mélange gazeux avec une tenue diélectrique compatible dans notre type d'application.

Les résultats expérimentaux obtenus des tests diélectriques effectués sur les gaz N₂ et ses mélanges N₂/CO₂ et N₂/N₂O ont montré que les performances de l'azote diminuent lorsqu'il est dans un mélange avec le CO₂ et le N₂O. La performance diélectrique du mélange n'est

pas améliorée par rapport à celle de l'azote pur car le champ critique réduit de ces mélanges déduit à partir de formule empirique (Eq. 5.3) est inférieure à celui de l'azote pur.

Le graphique suivant résume l'ensemble des résultats obtenus sur les différents tests effectués sur notre disjoncteur d'essai. Il montre en effet que la polarité négative est le paramètre dimensionnant pour ces gaz d'autant plus que c'est la polarité qui représente l'obstacle le plus difficile à franchir et où la capacité diélectrique des gaz est réduite. Seule l'azote pur à 2,5 bars abs a pu valider les exigences requises pour passer les tests des deux polarités pour le disjoncteur VOX 38 kV. Le mélange (80-20) N₂/CO₂ à 2,7 bars abs est le gaz le plus performant en dehors de l'azote pur et remplit les caractéristiques diélectriques pour une isolation d'un disjoncteur de 27,5 kV car il a une tenue de 200 kVp en polarité positive et 187 kVp en polarité négative alors que la tenue aux chocs de foudre est de 170 kVp selon le fabricant et de 150 kVp selon la norme CEI 62271-100. Néanmoins, l'azote pur remplit les conditions d'isolation pour ce type de disjoncteur à une pression plus faible, 2,17 bars abs contre 2,7 bars abs pour le mélange (80-20) N₂/CO₂, ce qui permet de conclure que l'azote est la meilleure solution disponible entre ces gaz et mélanges de gaz pour les applications industrielles de disjoncteurs VOX de 27,5 et 38 kV.

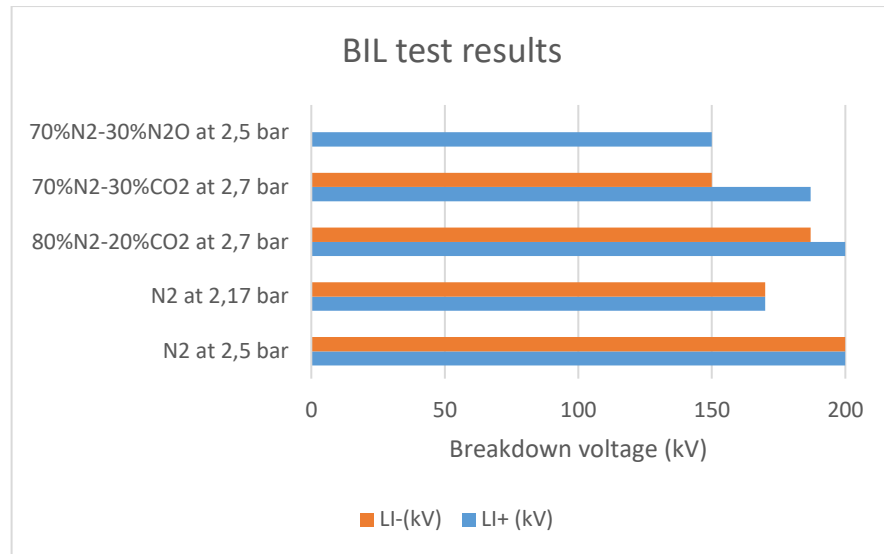


Figure 5.2 : Résumé des résultats de tests d'impulsions de foudre normalisées selon CEI

5.1.2 Tenue de tension à fréquence industrielle

Ces tests de tenue à fréquence industrielle ont été réalisés en compagnie de l'équipe technique de CO7 Technologies sur le site industriel de la compagnie. Le banc de test, montré au figure 5.3 est composé :

- d'un disjoncteur VOX de tension nominale allant jusqu'à 38 kV, vidé de son gaz SF₆ isolant selon les procédures de sécurité ;
- d'un transformateur régulateur avec un système de mesure et de contrôle ;

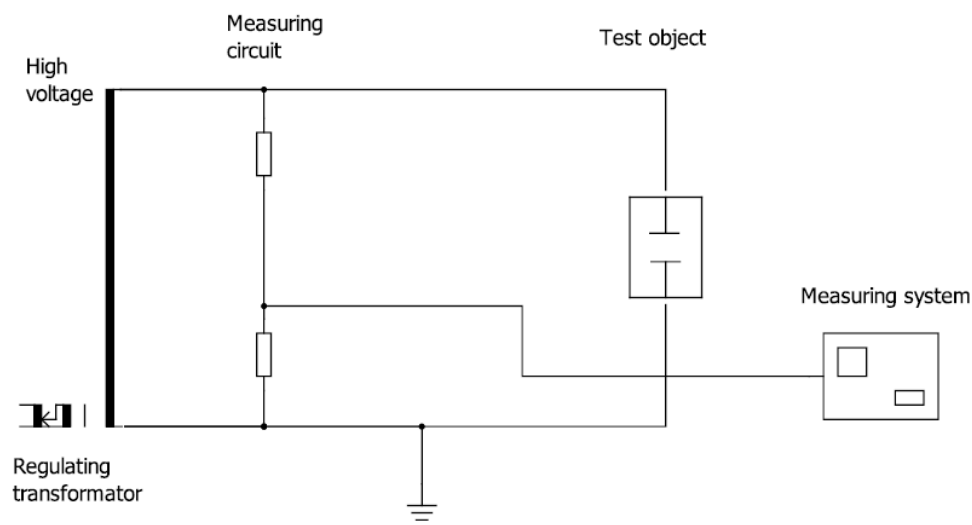


Figure 5.3 : Schéma du circuit de test de tenue de tension à fréquence industrielle

5.1.2.1 SF₆ sous une pression de 1,5 bar abs

Les tests réalisés avec le gaz SF₆ à 1,5 bar abs présent dans un disjoncteur VOX de tension nominale 38 kV conformément à la norme CEI avec différents niveaux de tension (50, 60, 70 et 80 kV) vont pouvoir servir de référence pour les tests avec les autres gaz. Pour rappel, le VOX est un disjoncteur contenant du SF₆ à 1,5 bar abs. Les tests sont effectués à la position fermée du disjoncteur et le courant circulant entre les phases et la terre est mesuré pour servir de comparaison pour les prochains résultats. Les résultats sont décrits aux tableaux suivants.

Tableau 5.8 : Tenue à fréquence industrielle 50 kV à 60 Hz pendant 60 s

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	5,6	OK
	B, b	A, a, C, c, F	5,7	OK
	C, c	A, a, B, b, F	5,6	OK
	A, a, B, b, C, c	-	13,7	OK

Conclusion : Aucun claquage n'a été noté, les tests effectués sont satisfaisants.

Tableau 5.9 : Tenue à fréquence industrielle 60 kV à 60 Hz pendant 60 s

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	6,7	OK
	B, b	A, a, C, c, F	6,8	OK
	C, c	A, a, B, b, F	6,7	OK
	A, a, B, b, C, c	-	16,3	OK

Conclusion : Aucun claquage n'a été noté, les tests effectués sont satisfaisants.

Tableau 5.10 : Tenue à fréquence industrielle 70 kV à 60Hz pendant 60s

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	7,6	OK
	B, b	A, a, C, c, F	7,9	OK
	C, c	A, a, B, b, F	7,8	OK
	A, a, B, b, C, c	-	19,0	OK

Conclusion : Aucun claquage n'a été noté, les tests effectués sont satisfaisants.

Tableau 5.11 : Tenue à fréquence industrielle 80 kV à 60 Hz pendant 60 s

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	8,7	OK
	B, b	A, a, C, c, F	9,1	OK
	C, c	A, a, B, b, F	9,0	OK
	A, a, B, b, C, c	-	21,8	OK

Conclusion : Aucun claquage n'a été noté, les tests effectués sont satisfaisants.

5.1.2.2 Azote pur sous une pression de 2 bars abs

Ayant vu précédemment que la tension de claquage d'un isolant gazeux augmente en fonction de la pression et que la résistance diélectrique du SF₆ est trois fois supérieure à celle

de l'azote pur, les tests ont été commencés avec l'azote pur à une pression relative minimale de 1 bar (2 fois égale à celle du SF₆) et augmentée au besoin pour optimiser la pression de gaz dans le réservoir pour chaque niveau de tension.

Les tableaux suivants présentent les résultats des tests effectués selon la première condition de test du tableau 4.1.

Tableau 5.12 : Tenue à fréquence industrielle avec l'azote à 2 bars abs

Position disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Tension (kV)	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	50	5,6	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	60	6,8	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	70	7,9	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	80	-	Échec

Conclusion : les résultats de ces tests pour l'azote pur sous 1 bar relative ont été satisfaisants et montrent que jusqu'à 70 kV, on a les mêmes capacités d'isolement en fréquence industrielle que le SF₆ à 1,5 bar abs. Les tests à 80 kV ont échoué montrant ainsi la limite d'isolation pour cette pression d'azote pur. L'augmentation de la pression pour l'azote est nécessaire pour dépasser la tenue de tension à 70 kV pour ce type de test.

5.1.2.3 Tests avec l'azote à 2,17 bars abs

Étant donné qu'à 2 bars abs, l'azote pur a réussi la tenue de tension à fréquence industrielle jusqu'à 70 kV, la pression a été augmentée de 0,2 bar car la capacité du disque d'éclatement est limitée à 2,2 bars relatif soit 3,2 bars abs mais après quelques instants la pression relevée sur le manomètre est de 2,17 bars abs. Les tests sont faits juste pour les niveaux de tension de 70 et 80 kV dont les résultats sont montrés sur le tableau suivant :

Tableau 5.13 : Tenue à fréquence industrielle de l'azote à 2,17 bars abs

État du disjoncteur	Tension appliquée à	Terre appliquée à	Tension (kV)	Courant (mA)	Résultats
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	70	7,9	OK
Fermé	A, a	B, b, C, c, F	80	9,1	OK

Conclusion : les résultats sont satisfaisants et montrent l'azote à 2,17 bars abs remplit les capacités d'isolation requises de tenue en fréquence industrielle pour le disjoncteur VOX de tension nominale 38 kV.

La figure ci-après résume les résultats des tests entre l'azote pur et le SF₆. Elle montre aussi que la pression minimale d'azote pur pour passer les tests de tenue de tension à fréquence industrielle est de 2,17 bars abs et que la résistivité des gaz SF₆ à 1,5 bar abs et N₂ à 2,5 bars abs sont dans la même ordre de grandeur donnant ainsi des courants mesurés entre phase et neutre presque égaux.

La figure ci-après résume les résultats des tests entre l'azote et le SF₆ ayant quasiment le même comportement diélectrique. Elle montre aussi que la résistance diélectrique augmente en fonction de la pression et que la pression absolue requise pour une tenue de tension en fréquence industrielle est de 2,17 bars abs contrairement à 2,5 bars abs pour une tenue en impulsions de foudre pour l'application industrielle VOX 38 kV. Ce qui permet de conclure que l'azote pur a 2,5 bars abs remplit les conditions de réussite de tests diélectriques pour remplacer le SF₆ dans le disjoncteur VOX de tension nominale 38 kV.

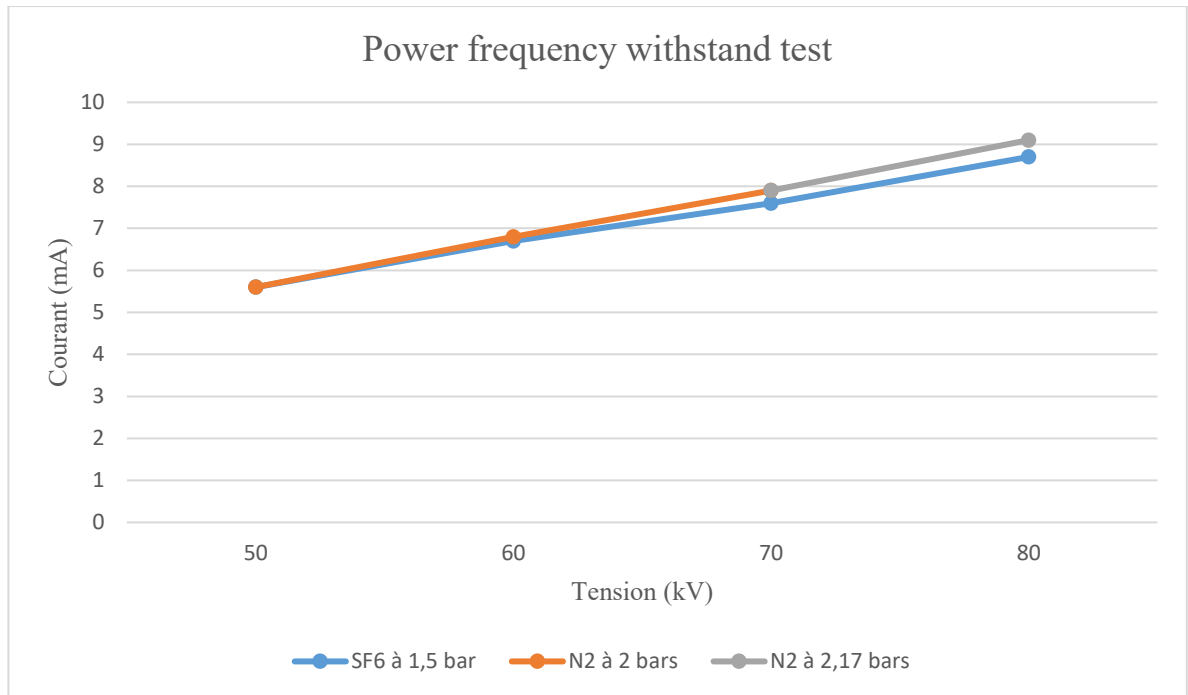


Figure 5.4 : Résultats des tests de tenue à fréquence industrielle avec l'azote pur et le SF₆

5.2 Détermination de la tension de claquage sous impulsion de foudre en fonction de la pression

Étant la contrainte diélectrique la plus critique, les tests de tenue en choc de foudre vont permettre de déterminer la pression optimale pour chaque type de disjoncteur. Pour ce faire, cette étude est divisée en deux parties, d'abord une étude théorique basée sur la littérature et une étude pratique avec des tests réalisés sur le disjoncteur VOX.

5.2.1 *Étude théorique*

G. Olivier et al. ont étudié expérimentalement dans [43-44] la tension de claquage dans une cellule de test pour des pressions allant de 5 à 700 kPa, des distances inter-électrodes de 1 à 50 mm et des tensions cc ou ca pic jusqu'à 200 kV. La loi empirique proposée pour décrire la tension de claquage dans une configuration de champ uniforme est la suivante :

$$U = \delta^G \cdot d^O \cdot t \quad \text{Équation 5.4}$$

U la tension de claquage DC ou AC pic en kV

d la longueur de l'écartement en mm

$\delta = \frac{P}{RT}$ la densité moléculaire en mol/L

G , o et t trois coefficients déterminés expérimentalement

Il est aussi prouvé expérimentalement dans [45] que la relation exponentielle entre tension de claquage et densité moléculaire, indirectement la pression, n'est pas affectée par les conditions de champ non uniforme, mais aussi que les gaz n'ont pas les mêmes comportements sous configuration de champ non uniforme. Pour un type de configuration donnée, les gaz comme l'hélium, le dioxyde carbone, l'argon et l'azote ont leur rapport entre la réduction de la tension de claquage et la valeur actuelle de la tension de claquage en champ uniforme indépendant de la nature du gaz.

On obtient alors dans le cas de champ non uniforme :

$$U = \delta^G \cdot d^{O'} \cdot t' \quad \text{Équation 5.5}$$

G la même valeur qu'en champ uniforme

O' et t' , valeurs valides que pour une seule configuration d'électrodes

Sur une échelle logarithmique, la relation entre la tension de claquage et la densité moléculaire (ou la pression) devient linéaire pour une distance gap (phase-terre) d donnée.

$$\text{Log}U = \text{Log}(\delta^G \cdot d^{O'} \cdot t') \quad \text{Équation 5.6}$$

$$\text{Log}U = G \cdot \text{Log}\delta + \text{Log}(d^{O'} \cdot t') \quad \text{Équation 5.7}$$

$$\mathbf{LogU = G \cdot Log\left(\frac{P}{RT}\right) + B} \quad \text{Équation 5.8}$$

Avec
$$B = \text{Log}(d^{0'} \cdot t') \quad \text{Équation 5.9}$$

La construction et le design interne du disjoncteur VOX, par la forme arrondie aux extrémités des pôles, des jeux de barre, des interrupteurs à vide et de la surface du réservoir montrent que la distribution de champ électrique dans le disjoncteur ne peut-être que quasi-uniforme. Des essais à vide du VOX, réalisés avec Energie Conseil Olivier, sous l'air atmosphérique avec la face arrière ouverte ont confirmé cette hypothèse avec la formation d'arc électrique entre les pôles et la surface interne du réservoir jusqu'à une tension d'impulsion de foudre maximale de 85 kVp comme le montre la figure 5.5, les documents internes montrent que la tenue en fréquence industrielle sous l'air atmosphérique avec les faces avant et arrière ouvert peut aller jusqu'à 42 kVp.

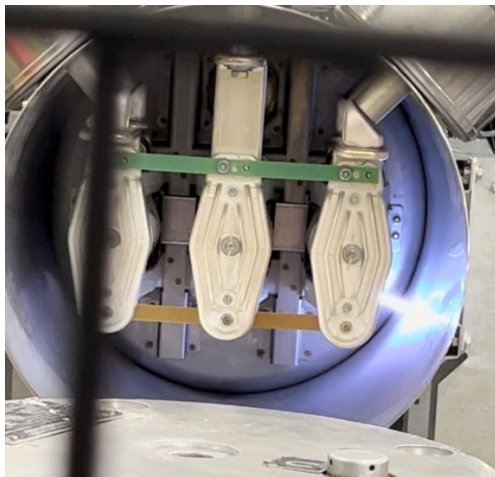


Figure 5.5 : Formation d'arc électrique lors des essais sous l'air atmosphérique

Les expériences effectuées sur plusieurs gaz dans [45] ont montré que le coefficient G est presque constant et n'est pas affecté par la configuration du champ électrique (uniforme ou non-uniforme). Les différentes valeurs du coefficient G obtenues dans le cas de l'azote sont

résumées dans le tableau suivant. La différence entre les valeurs du coefficient est assez minime, la valeur obtenue en champ non-uniforme (sphère-plane), approximativement la configuration qui correspond le mieux dans cette application est choisie pour prédire la tension de claquage de l'azote pour la suite.

Tableau 5.14 : Valeurs du coefficient G en configuration de champ uniforme et non-uniforme [45]

Electrodes	Coefficient G
	Azote
Champ uniforme	0,854
Sphère à sphère	0,856
Sphère-à-plan	0,845

Les tests expérimentaux effectués avec l'azote se résument en deux points : pour 2,5 bars abs la tension de claquage en impulsions de foudre obtenue est de 200 kVp, et pour 2,17 bars abs, aucun claquage n'a été noté à 170 kVp. Le premier point permet de déterminer la valeur constante de B dans l'équation et la valeur de la pression du second point permet de déterminer la valeur de la tension de claquage pour la pression de 2,17 bars abs. Les calculs donnent :

$$B = \text{Log}(d^{0'} \cdot t') = 3,1365 \quad \text{Équation 5.10}$$

$$U(217kPa) = 177,5 \text{ kV} \quad \text{Équation 5.11}$$

Avec ces deux points, la courbe $U = f(P)$ est tracée sur une échelle logarithmique dans la gamme de pression de 100 à 350 kPa. Cette courbe est la conclusion de l'étude théorique permettant de déterminer la tension limite de claquage de tenue en tension de l'azote en fonction de la pression dans cette application de disjoncteur.

Tableau 5.15 : Valeurs estimées de la tension de claquage de l'azote en fonction de la pression

Pression (kPa)	100	125	150	180	210	225	250	275	300	325	350
Densité (mol/L)	0,041	0,051	0,062	0,074	0,086	0,092	0,103	0,113	0,123	0,133	0,144
LogU	1,965	2,047	2,114	2,181	2,237	2,262	2,301	2,336	2,368	2,397	2,425
Uth (kV)	92,21	111,34	129,89	151,52	172,60	182,96	200,00	216,77	233,31	249,64	265,77

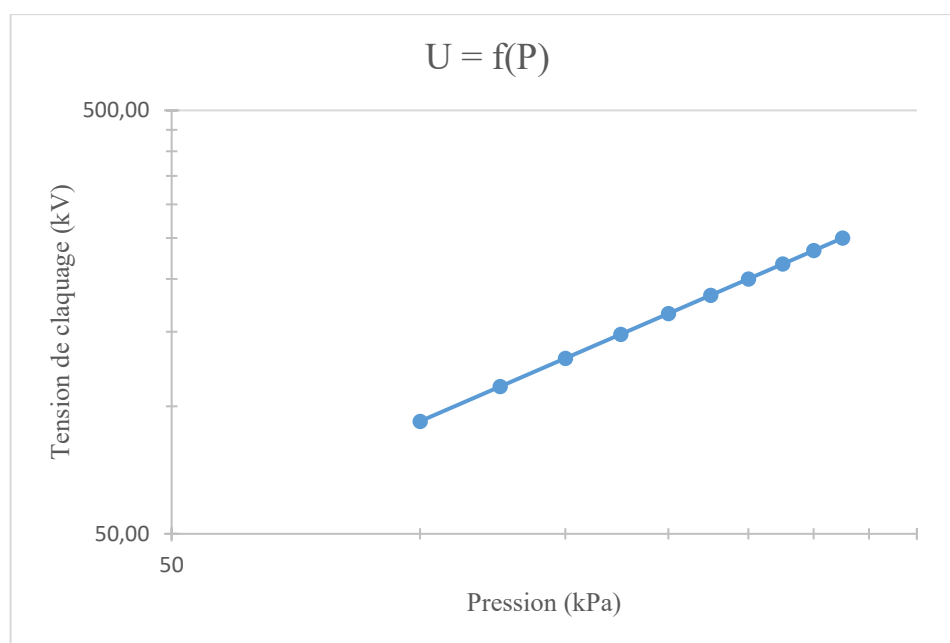


Figure 5.6 : Courbe de la tension de claquage de l'azote en fonction de la pression d'azote

Dans le cas du gaz SF₆, les tests expérimentaux à 1 bar abs pour 170 kVp et à 1,3 bar abs pour 200 kVp ont été réussis sans claquage. Malgré qu'aucun claquage n'ait été noté durant ces deux tests, deux suppositions sont faites pour calculer les coefficients de l'équation 5.8. En premier lieu, la tension de claquage à 1 bar du SF₆ est de 170 kVp et vérifier la valeur de rupture de gaz à 1,3 bar abs, et en second lieu, faire la même supposition à 1,3 bar abs pour

une tension de claquage de 200 kVp et calculer la tension de claquage pour 1 bar. La valeur du coefficient G du SF₆ est égale à 0,995 [45] et les calculs donnent :

$$- \text{ Pour } U_{bd}(100kPa) = 170 \text{ kV}$$

$$B = \text{Log}(d^{0'} \cdot t') = 3,623$$

$$U_{bd}(130kPa) = 227,2 \text{ kV} > 200 \text{ kV}$$

La supposition vérifie les résultats des tests expérimentaux à 1,3 bar.

$$- \text{ Pour } U_{bd}(130kPa) = 200 \text{ kV}$$

$$B = \text{Log}(d^{0'} \cdot t') = 3,567$$

$$U_{bd}(100kPa) = 154 \text{ kV} < 170 \text{ kV}$$

Cette hypothèse ne vérifie pas les résultats des tests expérimentaux car à 1 bar abs les tests ont été avec succès sans claquage à 170 kVp. Par conséquent, c'est la première hypothèse qui est retenue pour estimer la tension de claquage en fonction de la pression car étant en conformité avec les résultats de tests effectués à 1 et 1,3 bar abs. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau et la figure suivante.

Tableau 5.16 : Valeurs estimées de la tension de claquage du SF₆ en fonction de la pression

Pression (kPa)	100	105	110	120	125	130	140	150	175	200	250
Densité(mol/L)	0,041	0,043	0,045	0,049	0,051	0,053	0,058	0,062	0,072	0,082	0,103
LogU	2,19	2,21	2,23	2,27	2,28	2,30	2,33	2,36	2,43	2,49	2,58
Uth (kV)	154,0	161,7	169,4	184,7	192,3	200,0	215,3	230,6	268,8	307,0	383,4

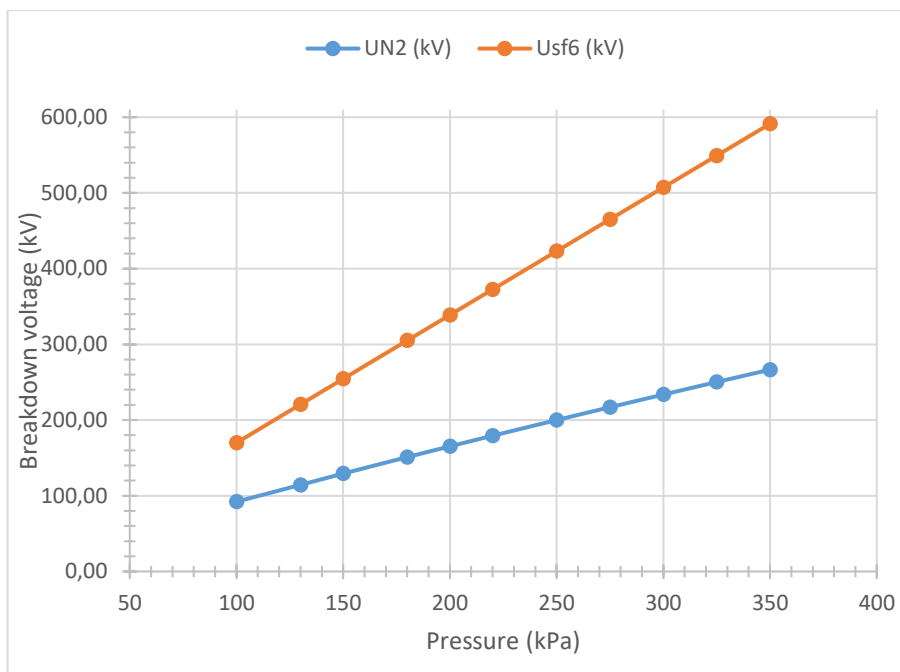


Figure 5.7 : Courbes de la tension de claquage en fonction de la pression pour N₂ et SF₆

5.2.2 Étude expérimentale

Cette partie concerne les tests de tenue en choc de foudre pour déterminer la tension de claquage en fonction de la pression d'azote. Ces tests ont été fait en 2023 en compagnie de Guy Olivier et Pierre LaRue de Energie Conseil Olivier, Inc. avec les mêmes matériels utilisés lors des tests d'impulsions de foudre. Pour chaque type de disjoncteur VOX (15; 27,5 et 38 kV), la pression optimale de gaz est déterminée suivant la tenue en tension U_{50%} d'impulsions de foudre requise conformément aux normes CEI 62271 et ANSI C37.09. Le banc d'essai expérimental est montré à la figure ci-dessous.



Figure 5.8 : Banc de test expérimental pour les tests aux chocs de foudre avec les équipements de Energie Conseil Olivier

Une vérification rapide des phases a été effectuée, voir tableau 5.17 et on note une petite défaillance sur la phase C qui représente la phase la plus contraignante avec une diminution de la capacité de tenue aux chocs de foudre et la phase A étant la phase la meilleure et fiable parmi les 3 car concordant avec les précédents résultats obtenus. Ceci est peut-être dû aux conséquences du nombre élevé de décharges/claquages résultant des derniers tests (BIL et hi-pot tests) effectués sur ce même disjoncteur qui peuvent entraîner des dommages internes (dépôts de métaux, corrosion sur les conducteurs, etc.). Des essais supplémentaires devront être réalisés pour identifier la cause réelle de cette différence de résultats entre les phases A et C.

Tableau 5.17 : Essais de vérification des phases sous impulsions de foudre

N₂ à 1,94 bar abs	Valeurs mesurées
Ubd ph. A (kV)	164
Ubd ph. B (kV)	162
Ubd ph. C+ (kV)	152
Ubd ph.C- (kV)	150

Les essais de chocs de foudre sont ensuite effectués sur les phases A et C et la tension de claquage minimale obtenue en ayant 2 claquages sont relevées sur le tableau suivant et tracés sur la courbe en comparaison avec l'estimation théorique présentée dans la section précédente. La figure 5.9 présente la variation de la tension de claquage avec la pression.

Tableau 5.18 : Valeurs des tensions de claquage mesurées en fonction de la pression de gaz N₂

Pressure (kPa)	67,9	101,9	133,95	166,7	194,37	229,9	266,28	298,97
U_{th.} (kV)	66	94	118	142	162	186	211	233
U_{bdA} (kV)	68	98	122	145	164	183	189	202
U_{bdB} (kV)					162		185	197
U_{bdC+}(kV)	66	94	117	137	152	165	177	183
U_{bdC-} (kV)					150			

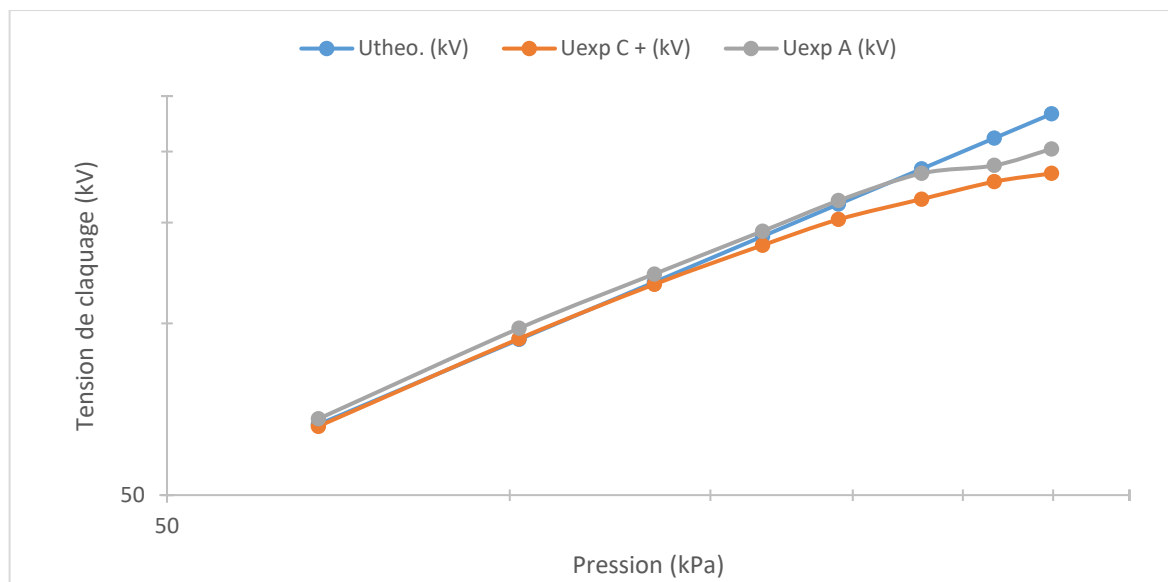


Figure 5.9 : Variation de la tension de claquage aux chocs de foudre avec la pression de l'azote

Discussions

Cette courbe montre un écart de résultats entre les phases d'abord, puis un écart à haute pression entre les résultats théoriques et expérimentaux. La déviation des résultats est plus grande à la phase C qui semble avoir des dommages internes sur la traversée. Ces différences de résultats par rapport à ceux effectués dans les parties 5.1.1.2 et 5.1.1.3 peuvent s'expliquer par les dépôts de poussière et de copeaux de métaux observés dans la surface interne du réservoir, des traversées et sur les jeux de barre lorsque le disjoncteur a été ouvert par la face arrière. Ces impuretés affectent considérablement les résultats de tests notamment à haute pression (2,3; 2,6 et 3 bars abs) et sur les phases B et C.

La figure suivante présente la courbe de tendance des résultats de tests sur la phase A. Les premiers tests effectués aux pressions 2,17 et 2,5 bars abs conformément aux normes CEI sur le disjoncteur de test n'ayant subi aucun test auparavant seront maintenus et considérés comme valides car étant effectués en premier lieu sur le disjoncteur d'essai.

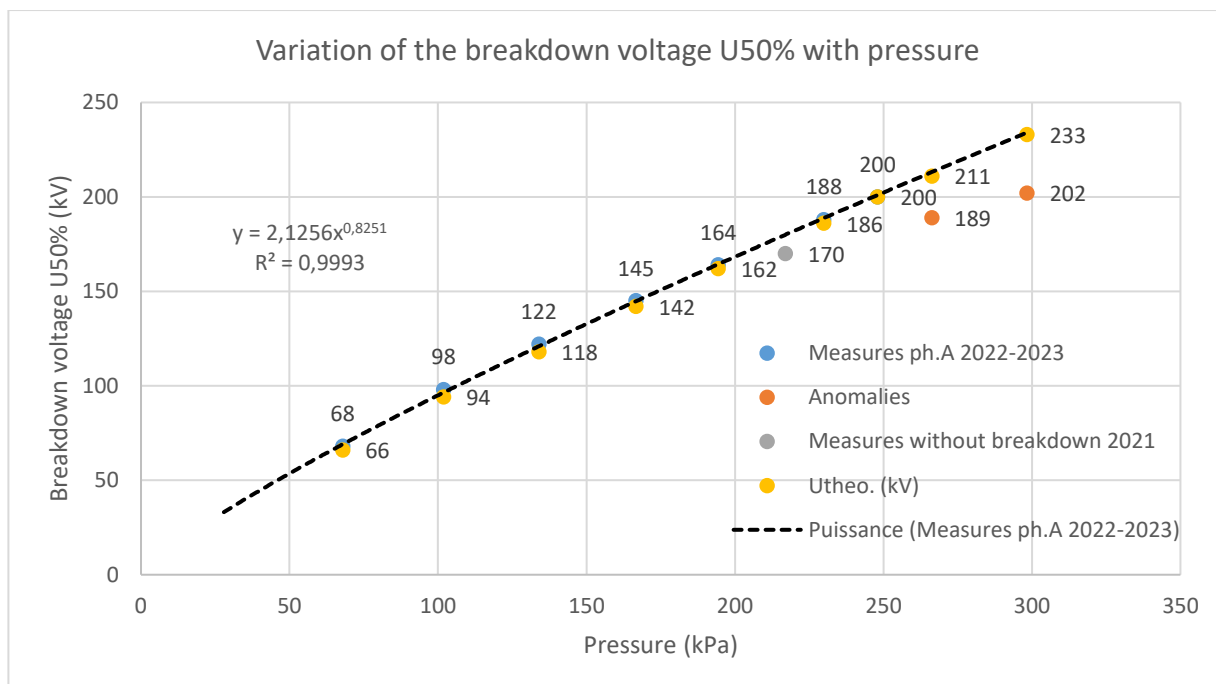


Figure 5.10 : Courbe de tendance de la variation de la tension disruptive avec la pression – N₂ [Rapport ECO- 2023]

L'équation de la courbe de tendance déduite entre la tension de claquage et la pression est la suivante :

$$U_{bd} = 2,1256 * P^{0,8251} \quad \text{Équation 5.12}$$

Pour chaque type de disjoncteur, la pression minimale requise est déterminée à partir de l'équation 5.12 et de la tension de tenue aux chocs de foudre fixée par le fabricant. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant. Les valeurs de pressions finales présentées au tableau 5.19 sont obtenues en majorant de 5% les valeurs de pressions minimales déterminées durant les tests.

Tableau 5.19 : Pressions minimales d'azote pour chaque type de disjoncteur VOX

Type de disjoncteur VOX	Tension BIL (kVp)	Pression minimale (kPa)	Pression finale (kPa)
15 kV	95 - 125	100 - 139	105 - 150
27,5 kV	150 -170	174 - 202	185 - 215
38 kV	200	247	260

Chapitre 6 - Modélisation électrothermique et simulation numérique

Cette partie traite la modélisation électrothermique de quelques gaz dans le disjoncteur simulée sous COMSOL Multiphysics. A la suite des tests diélectriques expérimentaux, le gaz retenu pour poursuivre les recherches pour le remplacement du SF₆ dans le VOX est l'azote pur à une pression minimale de 2,5 bars abs. Les résultats de simulation électrothermique avec l'azote seront comparés avec ceux effectués expérimentalement avec le SF₆.

6.1 Tests expérimentaux

Les tests d'élévation de température du disjoncteur VOX ont été effectués dans les laboratoires d'Areva T&D avec comme gaz d'isolation le SF₆ à une pression absolue de 1,5 bar abs à 20°C. Les tests ont été réalisés en Europe avec comme courant nominal 2000 A, 50 Hz et selon les spécifications des standards IEEE C37.09-1999 ch5.4 et C37.04-1999 ch5.3 [35]. La limite maximale permise est 75 K à 60 Hz ou 71 K à 50 Hz. Les objectifs ont été atteints et les tests sont passés avec succès. La figure suivante montre le banc de test expérimental.



Figure 6.1 : Setup expérimental [35]

Des thermocouples ont été placés à différents endroits critiques dans le disjoncteur (contacts, interrupteurs, jeux de barre, traversées, etc.) pour mesurer et enregistrer la température tout au long des tests, voir figure 6.2. La température ambiante durant les essais était de 27°C et le tableau 6.1 présente les résultats après équilibre obtenus lorsque l'élévation de température ne dépasse pas 1K par heure.

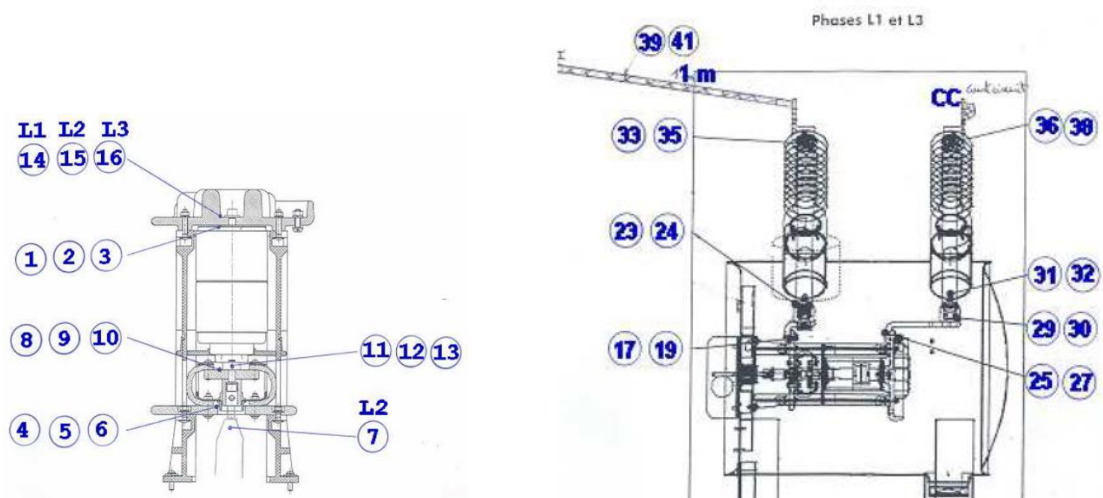


Figure 6.2 : Emplacements des thermocouples [35]

Tableau 6.1 : Résultats des tests expérimentaux [35]

Désignation	Élévation de température (K)		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Fixed cover bottle (FCB)	65	63	65
Nappe inf. cuivre (NIC)	61	59	62
Bride mobile cuivre (BMC)	63	62	64
Sabot alu coté sup (SACS)	66	-	68
Connexion inf. proche traversée (CIPT)		62	
Connexion sup proche nappe pôles (CSPNP)	67	64	66
Traversée proche sabot (TPS)	65	-	68
Connexion supérieure proche traversée (CSPT)		63	

6.2 Modélisation géométrique du disjoncteur

La simulation requiert un certain nombre de simplifications : il s'agit donc d'ignorer certains composants du disjoncteur qui n'ont pas d'influence ou ont un impact minime sur le transfert de chaleur au sein du disjoncteur (barres de soutien des interrupteurs à vide, etc.). La modélisation géométrique du disjoncteur, en utilisant ses dimensions réelles avec le logiciel COMSOL Multiphysics, est montrée par les figures suivantes.

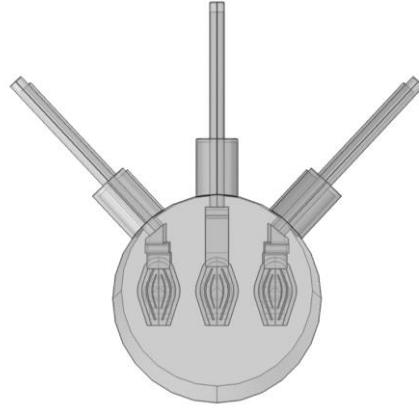


Figure 6.3 : Vue de face du disjoncteur VOX

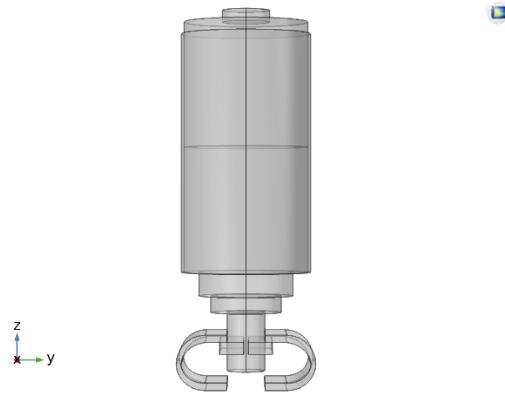


Figure 6.4 : Interrupteur à vide VG5 en position fermée

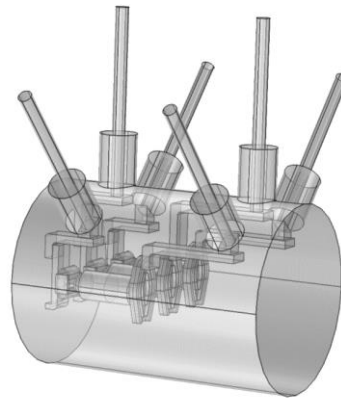


Figure 6.5 : Vue de profil du modèle 3D du disjoncteur VOX

6.3 Matériaux

Toutes les parties conductrices sont en cuivre, l'enceinte externe du disjoncteur est en acier inoxydable, les interrupteurs à vide en céramique. Les propriétés des matériaux, en particulier les conductivités thermique et électrique dépendent de la température. Pour la plage de température (20-100°C), la dépendance est considérée comme linéaire par morceaux. Pour le cuivre et l'aluminium, leur conductivité thermique sur cette plage de température diffère au plus de 20% [33].

- Cuivre

L'ensemble des conducteurs actifs du disjoncteur exceptés les sabots sont en cuivre. Certaines propriétés du cuivre sont directement disponibles sur le logiciel Comsol Multiphysics et résumées au tableau 6.2.

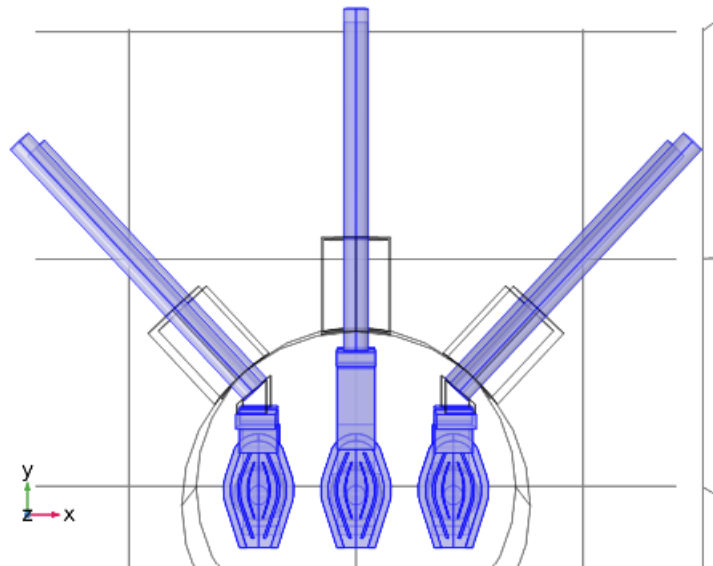


Figure 6.6 : Conducteurs en cuivre

Tableau 6.2 : Propriétés du cuivre

Propriétés	Variables
Conductivité électrique [S/m]	$5,998.10^7$
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	$C_{p_Cu}(T)$
Permittivité relative	1
Masse volumique [kg/m ³]	8940
Conductivité thermique [W/(m.K)]	$\Lambda_{Cu}(T)$

La résistivité du cuivre est considérée comme dépendant de la température selon la relation suivante [31] :

$$\rho_{Cu} = \rho_{Cu_ref} * (1 + \alpha_T(T - 293,15)) \quad \text{Équation 6.1}$$

$\rho_{Cu_ref} = 1,667.10^{-8} \Omega.m$: résistivité de référence

$\alpha_T = 3,862.10^{-3} 1/K$: coefficient de résistivité

T : température en K

La conductivité thermique et la chaleur spécifique du cuivre, fonctions de la température, suivent les relations suivantes [32-33] :

$$C_{p_{Cu}}(T) = 1,039 * T + 80,43 \quad 293,15 \leq T \leq 393,15 \quad \text{Équation 6.2}$$

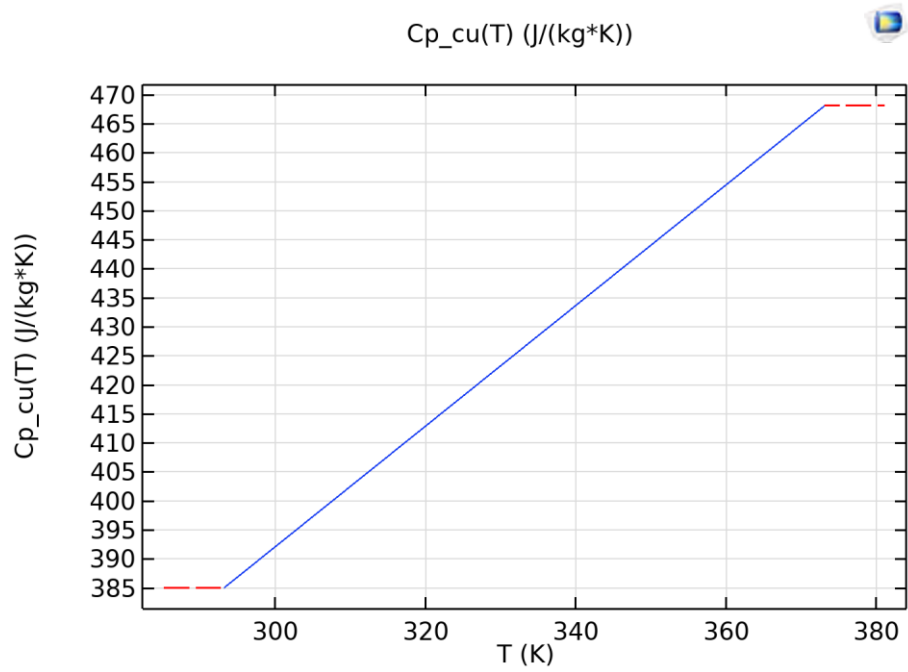


Figure 6.7 : Courbe de chaleur spécifique du cuivre en fonction de la température

$$\lambda_{Cu}(T) = T + 106,85 \quad 293,15 \leq T \leq 393,15 \quad \text{Équation 6.3}$$

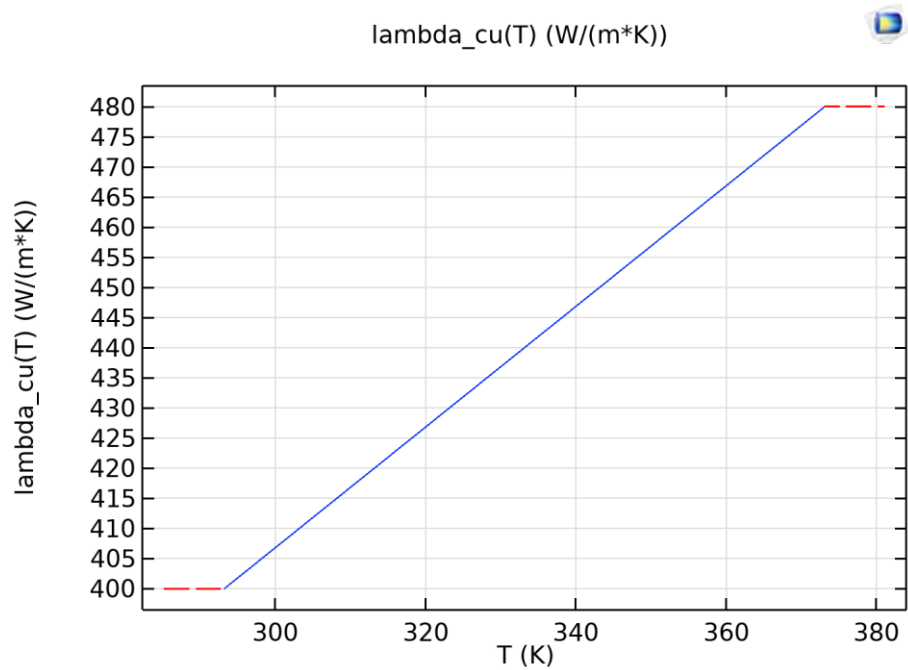


Figure 6.8 : Courbe de conductivité thermique du cuivre en fonction de la température

- Aluminium

Les sabots reposant sur les jeux de barres et servant de lien de connexion avec les traversées sont faits en aluminium. Leur forme a été simplifiée tout en respectant les dimensions du constructeur par des formes trapézoïdales pour contourner le problème de maillage géométrique. Les propriétés de l'azote utilisées dans le logiciel sont présentées au tableau suivant.

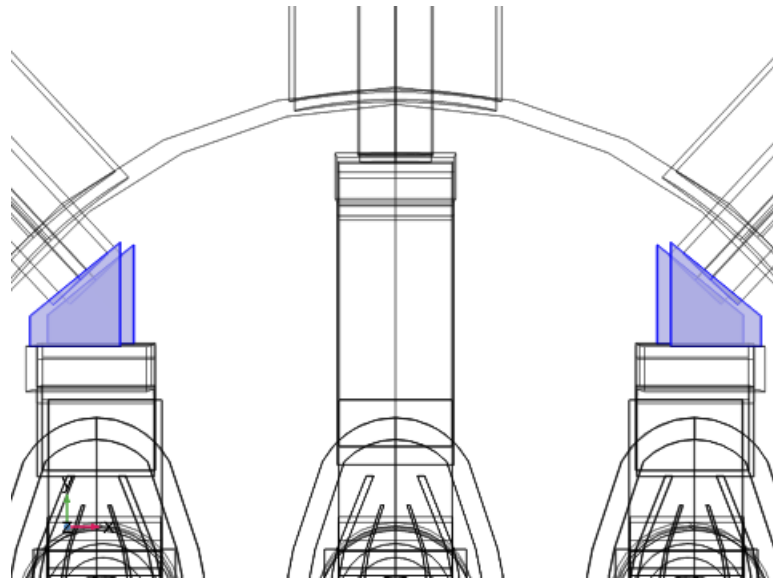


Figure 6.9 : Sabots conducteurs en aluminium

Tableau 6.3 : Propriétés de l'aluminium

Propriétés	Variables
Épaisseur [mm]	3
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	475
Masse volumique [kg/m ³]	7740
Conductivité thermique [W/(m.K)]	25

- Silicone

Les traversées (bushings) du VOX ont été modélisées telles leurs formes réelles (fig. 6.10), mais cela engendre un problème de maillage causé par la forme des disquettes en silicone incompatible à la taille des éléments du maillage. La simulation devient alors non convergente et le temps de calcul devient interminable. Par conséquent, pour contourner ce problème dû à un mémoire interne pas assez grand, les isolations en silicone des traversées sont considérées comme couches minces monocoques d'épaisseur 19,87 mm recouvrant les conducteurs (fig. 6.11). Les propriétés du silicone sont présentées au tableau 6.4.

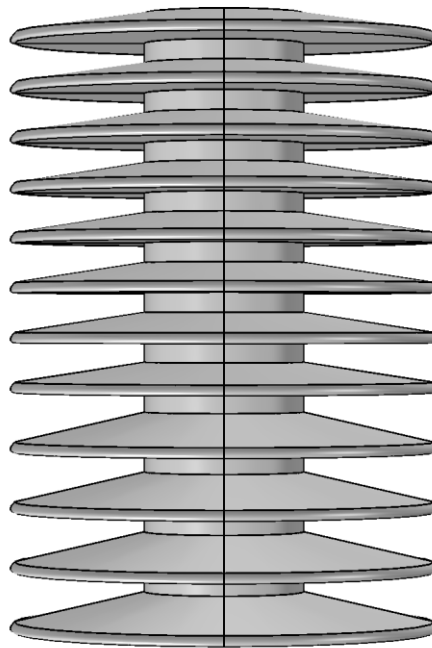


Figure 6.10: Première modélisation de l'isolation en silicone des traversées du VOX

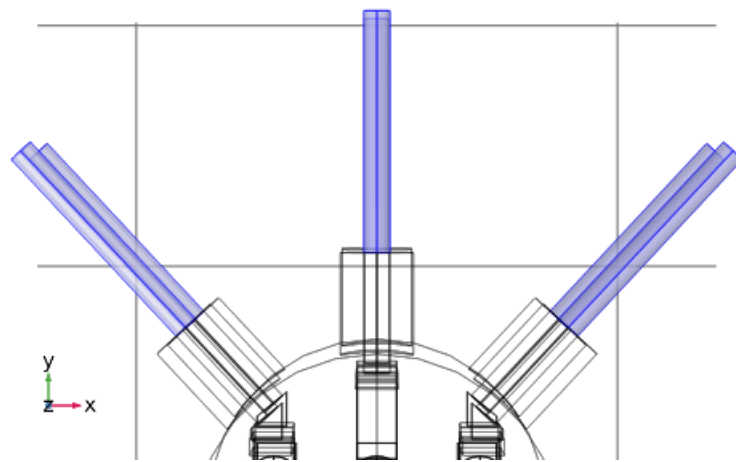


Figure 6.11 : Conducteurs des traversées recouverts de silicone comme isolation

Tableau 6.4 : Propriétés du silicone

Propriétés	Variables
Épaisseur [mm]	19,87
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	700
Masse volumique [kg/m ³]	2329
Permittivité relative	1
Conductivité thermique [W/(m.K)]	130

- Céramique (modélisation de l'interrupteur)

L'interrupteur à vide VG4A ou VG5 est constitué de deux électrodes en cuivre séparées par le vide lorsqu'il est en position ouverte. La coque externe de l'interrupteur est en céramique comme montrée sur la figure suivante.

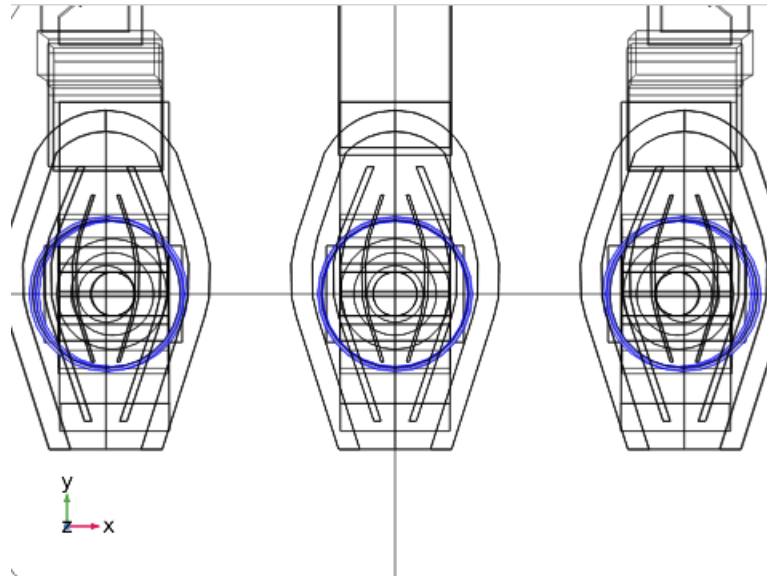


Figure 6.12 : Surface externe des interrupteurs à vide en céramique

Tableau 6.5 : Propriétés de l'interrupteur à vide

Propriétés	Variables
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	730
Masse volumique [kg/m ³]	48
Conductivité thermique [W/(m.K)]	k(T)

Les interrupteurs à vide sont modélisés comme solides avec leur conductivité thermique dépendant de la température suivant la relation suivante [31] :

$$k(T) = \frac{2\sigma T^3 \ln\left(\frac{d_{out}}{d_{in}}\right)}{\frac{1}{\varepsilon_{in} \cdot d_{in}} + \frac{1 - \varepsilon_{out}}{\varepsilon_{out} \cdot d_{out}}} \quad \text{Équation 6.4}$$

σ : coefficient de Stefan-Boltzmann

d_{out} : diamètre de l'interrupteur à vide

d_{in} : diamètre du conducteur à l'intérieur de l'interrupteur à vide

ε_{out} : émissivité de la surface extérieure de l'interrupteur à vide

ε_{in} : émissivité de la surface intérieure de l'interrupteur à vide

T : la température en K

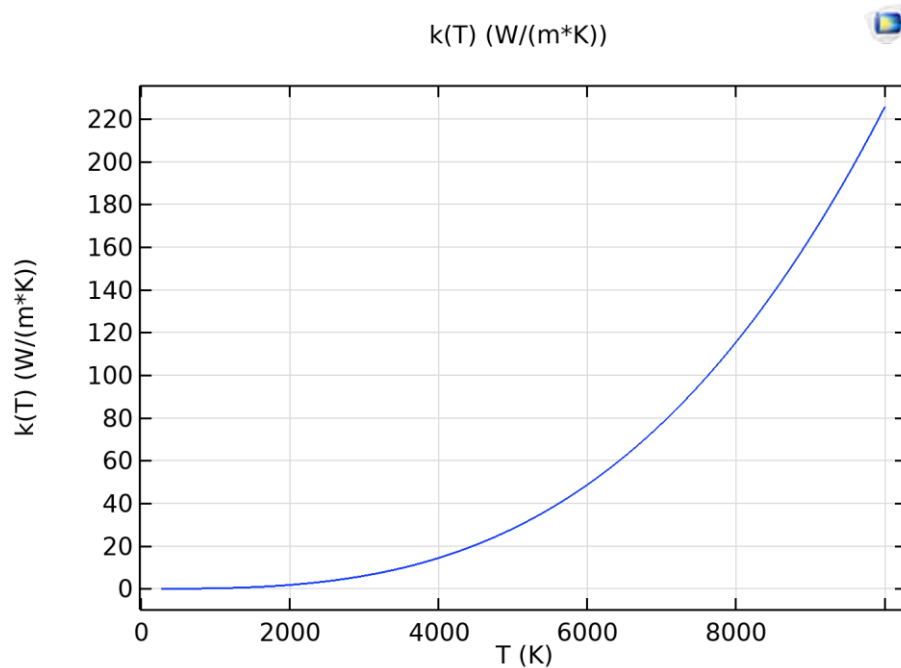


Figure 6.13 : Conductivité thermique de l'interrupteur à vide [31]

- Résine d'époxy

Les conducteurs situés près du cabinet basse tension (LV cabinet) et du mécanisme d'ouverture et de fermeture du disjoncteur sont isolés avec de la résine d'époxy d'épaisseur 0,3 mm pour, d'une part, isoler ces parties des courants de fuite et aussi diminuer l'échauffement thermique dans cette zone d'autant plus que l'époxy est un bon isolant thermique. Représentant une fine couche, la résine d'époxy est modélisée comme couche mince d'épaisseur 0,3 mm sur les conducteurs concernés (voir figure 6. 14).

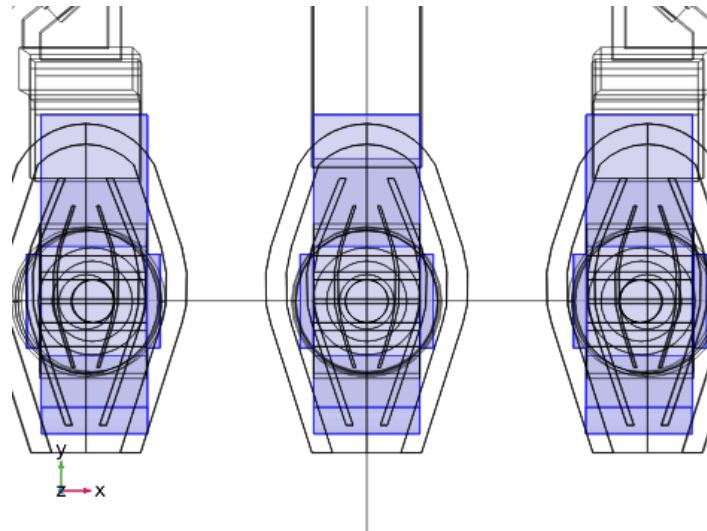


Figure 6.14 : Conducteurs recouverts de couche de résine d'époxy

Tableau 6.6 : Propriétés de la résine d'époxy

Propriétés	Variables
Épaisseur [mm]	0,7
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	1860
Masse volumique [kg/m ³]	3000
Permittivité relative	3,6
Conductivité thermique [W/(m.K)]	0,3

6.4 Caractéristiques des gaz étudiés

Les caractéristiques thermiques et électriques requises sous COMSOL des gaz étudiés sont décrites ci-dessous. Celles qui sont des fonctions de la température sont directement intégrées dans les paramètres pour contourner les approximations et augmenter la précision de calcul durant la simulation.

6.4.1 Hexafluorure de soufre SF₆

Les propriétés du gaz sont résumées au tableau suivant.

Tableau 6.7 : Propriétés du gaz SF₆

Propriétés	Variables
Capacité thermique à pression constante [J/(kg.K)]	Cp_sf(T)
Masse volumique à 1bar et 20°C [kg/m ³]	6,139
Conductivité thermique [W/(m.K)]	lambda_sf(T)
Permittivité relative	1,002
Rapport des chaleurs spécifiques	1,1
Viscosité dynamique [Pa.s]	mu_sf(T)

Calcul de la masse volumique à la pression de 1,5 bar abs

La masse de SF₆ indiquée sur l'étiquette du disjoncteur est de 3,23 kg. En appliquant la loi des gaz parfaits, on peut calculer directement la masse volumique de ce gaz à la pression de 1,5 bar abs à 20°C.

$$PV = \frac{m}{M} \cdot RT \quad \text{Équation 6.5}$$

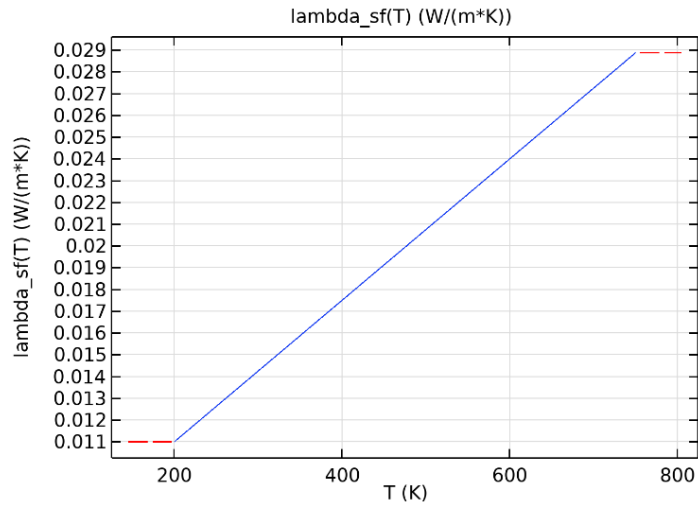
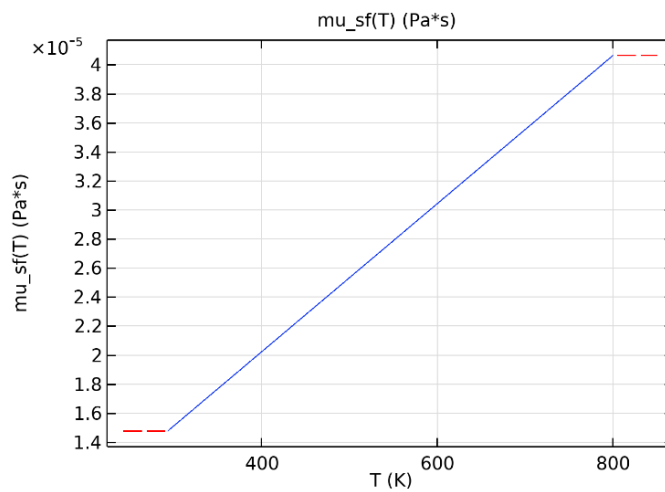
$$\rho_{SF_6} = \frac{m}{V} = \frac{P \cdot M}{RT} \quad \text{Équation 6.6}$$

$$\rho_{SF_6} = 8,99 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Équation 6.7}$$

La conductivité thermique et la viscosité dynamique du SF₆ suivent les relations suivantes [32] :

$$\lambda_{sf(T)} = 3,25 \cdot 10^{-5} * T + 0,0045 \quad 293,15 \leq T \leq 750 \quad \text{Équation 6.8}$$

$$\mu_{sf(T)} = 10^{-5} (5,104 \cdot 10^{-3} * T - 0,01875) \quad 293,15 \leq T \leq 800 \quad \text{Équation 6.9}$$

Figure 6.15 : Conductivité thermique du SF₆Figure 6.16 : Viscosité dynamique du SF₆

La capacité thermique à pression constante du SF₆ est une fonction définie par morceaux comme suit [36] et présentée à la figure 6.17 :

$$c_p = \begin{cases} 403,281 + 1,74955 * T - 1,7272.10^{-3} * T^2 + 6,077.10^{-7} * T^3 - 11015822,26/T^2 & 293,15 \leq T \leq 1000 \\ 1075,854 + 3,31386.10^{-3} * T - 6,89607.10^{-7} * T^2 + 4,8795.10^{-11} * T^3 - 56686532,93/T^2 & 1000 \leq T \leq 6000 \end{cases}$$

Équation 6.10

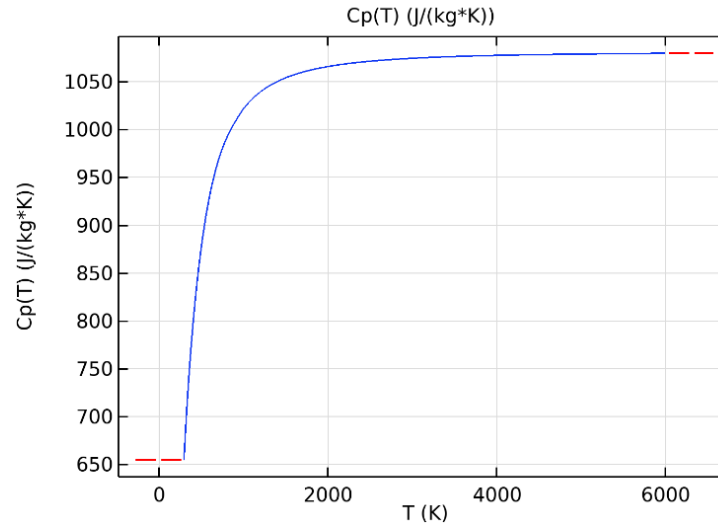


Figure 6.17 : Capacité thermique à pression constante du SF_6

6.4.2 Azote N_2

Les propriétés du gaz sont résumées au tableau suivant.

Tableau 6.8 : Propriétés du gaz N_2

Propriétés	Variables
Capacité thermique à pression constante $[\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$	$C_p(T)$
Masse volumique $[\text{kg}/\text{m}^3]$	1,24982
Conductivité thermique $[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$	$\lambda_{\text{N}_2}(T)$
Permittivité relative	1,002
Rapport des chaleurs spécifiques	1,4013
Viscosité dynamique $[\text{Pa}\cdot\text{s}]$	$\mu_{\text{N}_2}(T)$

Calcul de la masse volumique de l'azote à 2,5 bars abs

En utilisant les résultats lors du calcul de la masse volumique du SF_6 , on peut en déduire le volume effectif occupé par le gaz, différent du volume totale du réservoir qui est

comparablement de 385 L. la masse volumique de l'azote à 2,5 bars abs est déterminé à partir de la loi des gaz parfaits.

$$V_{occ} = \frac{m_{SF_6}}{\rho_{SF_6}} \quad \text{Équation 6.11}$$

$$V_{occ} = 359,3 \text{ L} \quad \text{Équation 6.12}$$

$$\rho_{N_2} = \frac{m}{V} = \frac{P.M}{RT} \quad \text{Équation 6.13}$$

$$\rho_{N_2} = 2,87 \text{ kg/m}^3 \quad \text{Équation 6.14}$$

La conductivité thermique et la viscosité dynamique du N_2 suivent approximativement les relations suivantes [32] et sont présentées aux figures suivantes :

$$\lambda_{n2}(T) = \begin{cases} 2,248 \cdot 10^{-4} * T - 0,03992 & 293,15 \leq T \leq 400 \\ 6,6 \cdot 10^{-5} * T + 0,0236 & 400 \leq T \leq 1000 \end{cases} \quad \text{Équation 6.15}$$

$$\mu_{N_2}(T) = 10^{-7}(0,559 * T - 6,18) \quad \text{Équation 6.16}$$

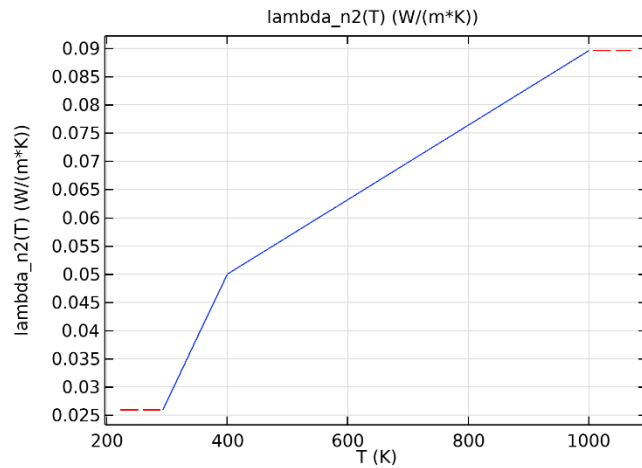
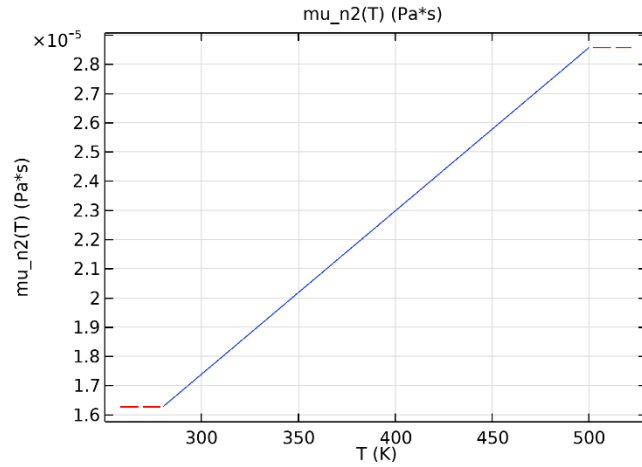


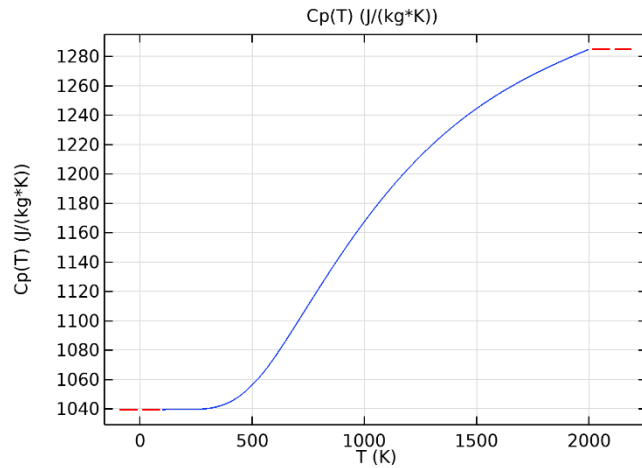
Figure 6.18 : Conductivité thermique du N_2

Figure 6.19 : Viscosité dynamique du N₂

La capacité thermique à pression constante du N₂ est une fonction définie par morceaux comme suit [37] et présentée à la figure suivante :

$$C_p = \begin{cases} 1035,228929 + 0,0662135 * T - 3,44552 \cdot 10^{-4} * T^2 + 5,9412 \cdot 10^{-7} * T^3 + 4178,571429/T^2 & 293,15 \leq T \leq 500 \\ 696,6367857 + 0,710251786 * T - 3,07091 \cdot 10^{-4} * T^2 + 4,89209 \cdot 10^{-8} * T^3 + 18842892,86/T^2 & 500 \leq T \leq 2000 \end{cases}$$

Équation 6.17

Figure 6.20 : Capacité thermique à pression constante du N₂

6.5 Modélisation mathématique

6.5.1 Courants électriques

La simulation est effectuée à courant nominal 2000 A, 60 Hz appliquée aux terminaux. Les équations résolues dans cette partie permettent de calculer la densité de courant électrique, les pertes Joules volumétriques dues au passage du courant et le champ électrique. La modélisation passe par la résolution des équations de Maxwell :

$$J = \sigma_e E + \frac{\partial D}{\partial t} + J_e \quad \text{Équation 6.18}$$

$$E = -\nabla V \quad \text{Équation 6.19}$$

$$\nabla \cdot J = Q_{j,v} \quad \text{Équation 6.20}$$

J : densité de courant électrique (A/m²)

σ_e : conductivité électrique (S/m)

$J_e = 0$: densité de courant externe (A/m²)

E : champ électrique (V/m)

V : potentiel électrique (V)

$Q_{j,v}$: pertes Joules volumétriques (W/m³)

D : champ de déplacement électrique (C/m²)

Les contacts électriques des électrodes dans les interrupteurs à vide sont considérés comme des contacts de surface et les équations suivantes définissent la circulation du courant entre les contacts en tenant compte des paramètres du matériau tels que la rugosité de surface, la dureté Brinell, la conductance de restriction et la pression de contact des surfaces.

$$n.J_1 = h_c.(V_1 - V_2) \quad \text{Équation 6.21}$$

$$n.J_2 = h_c.(V_2 - V_1) \quad \text{Équation 6.22}$$

$$h_c = 1,25 * \sigma_{contact} \frac{m_{asp}}{\sigma_{asp}} \left(\frac{p}{H_c}\right)^{0,95} \quad \text{Équation 6.23}$$

$$\frac{2}{\sigma_{contact}} = \frac{1}{(\sigma_1 n_d).n_d} + \frac{1}{(\sigma_2 n_d).n_d} \quad \text{Équation 6.24}$$

$$\frac{p}{H_c} = \left(\frac{p}{c_1 \left(1,62 \frac{\sigma_{asp}}{m_{asp} \sigma_0}\right)^{c_2}} \right)^{\frac{1}{1+0,07c_2}} \quad \text{Équation 6.25}$$

$$\sigma_0 = 1\mu m \quad \text{Équation 6.26}$$

$$\frac{c_1}{H_0} = 4 - 5,77 \frac{H_B}{H_0} + 4 \left(\frac{H_B}{H_0}\right)^2 - 0,61 \left(\frac{H_B}{H_0}\right)^3 ; H_0 = 3,178 \text{ GPa} \quad \text{Équation 6.27}$$

$$c_2 = -0,370 + 0,442 \frac{H_B}{c_1} \quad \text{Équation 6.28}$$

m_{asp} : rugosité de surface, poids moyen des aspérités

σ_{asp} : rugosité de surface, pente moyenne des aspérités

h_c : conductance de constriction

P : pression de contact

H_B : dureté Brinell

La conductance de constriction est obtenue par la corrélation de Coopernick-Mikic-Yovanovich et les paramètres m_{asp} et σ_{asp} sont supposés respectivement $1 \mu m$ et 0,4. La dureté Brinell du cuivre est de 250 MPa, la force de contact des électrodes de l'interrupteur donnée par le constructeur est de 5000 N et la pression de contact calculée est de 533,43 kPa.

6.5.2 Transfert de chaleur

La génération de chaleur dans le disjoncteur est causée par des pertes joules des résistances. La chaleur transférée aux conducteurs est principalement par conduction, celle

transférée des conducteurs au gaz se fait par convection et rayonnement, et finalement transférée à l'air ambiant en dehors du disjoncteur.

Le transfert de chaleur par conduction est la conséquence d'un gradient de température dans le milieu. Pour les gaz, elle est transportée d'une molécule à une autre par les collisions moléculaires. Pour la convection, c'est un transfert d'énergie entre une surface solide et un fluide du dans un premier temps par la diffusion d'énergie au niveau du fluide à cause du gradient de température et dans un second temps par le mouvement du fluide. La radiation est un transfert d'énergie par ondes électromagnétiques, ce qui lui permet d'être transmise sur de longues distances sans interaction avec un milieu.

Les équations thermiques dérivant les phénomènes cités ci-haut peuvent être écrites suivant la relation de Navier-Stokes :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot q = Q + Q_{ted} \quad \text{Équation 6.29}$$

$$q = -k \nabla T \quad \text{Équation 6.30}$$

$$Q_c = h_0 (T - T_{amb}) \quad \text{Équation 6.31}$$

$$Q_r = \sigma \varepsilon (T^4 - T_{amb}^4) \quad \text{Équation 6.32}$$

u : vecteur vitesse

k : conductivité thermique

C_p : chaleur spécifique du gaz

Γ : coefficient de diffusion

$$\rho = \frac{P_A}{R_s T} \text{ dans les domaines de gaz idéals}$$

La température ambiante est de 27°C, même valeur que les tests expérimentaux et le coefficient de convection entre la surface extérieure et le milieu ambiant et supposé égal à 8W/(m².K) [33].

Le transfert de chaleur dans la couche d'époxy est régi par les relations suivantes :

$$-n_d \cdot q_d = -\frac{1}{2} d_s \rho C_p \frac{\partial T_d}{\partial t} - \frac{T_u - T_d}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s \quad \text{Équation 6.33}$$

$$-n_u \cdot q_u = -\frac{1}{2} d_s \rho C_p \frac{\partial T_u}{\partial t} - \frac{T_d - T_u}{R_s} + \frac{1}{2} d_s Q_s \quad \text{Équation 6.34}$$

$$R_s = \frac{d_s}{\lambda} \quad \text{Équation 6.35}$$

R_s : résistance thermique

d_s : épaisseur de la couche

Q_s : densité de la source d'énergie de la couche

T_d : température de la partie inférieure de la couche

T_u : température de la partie supérieure de la couche

q_d : flux de chaleur hors-plan reçu de la partie inférieure de la couche

q_u : flux de chaleur hors-plan reçu de la partie supérieure de la couche

6.5.3 *Écoulement laminaire*

Le réservoir contenant le gaz ne contient aucun orifice excepté celui de remplissage du gaz muni d'un clapet anti-retour, et lorsqu'il est rempli et prêt à être opérationnel, le réservoir est considéré comme scellé à vie et aucun flux de gaz ne peut entrer ni sortir, l'appareillage est au repos et la vitesse du gaz est supposée nulle. Le domaine du réservoir et ses frontières sont définis dans la section « transferts de chaleur fluide-solide ». L'écoulement est supposé

laminaire et les résultats obtenus seront comparés avec les résultats expérimentaux pour évaluer cette supposition. Quant au mouvement du fluide, il n'est entraîné que par les forces de flottabilité causées par la différence de température. Ces forces sont obtenues avec l'approximation de Boussinesq et le mouvement du fluide est gouverné par les équations suivantes :

$$\rho \nabla u = 0 \quad \text{Équation 6.36}$$

$$\rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-pI + K] + F \quad \text{Équation 6.37}$$

$$K = \mu(\nabla u + (\nabla u)^T) \quad \text{Équation 6.38}$$

$$\vec{F} = \Delta\rho \cdot \vec{g} = [\rho(T) - \rho_0] \cdot \vec{g} \quad \text{Équation 6.39}$$

$$Q_{vd} = \tau : \nabla u \quad \text{Équation 6.40}$$

$\rho(u \cdot \nabla)u$: forces inertielles

$-\nabla(pI)$: forces dues à la pression

K : forces visqueuses

F : forces de flottabilité

τ : stress tension

Q_{vd} : dissipation visqueuse

6.6 Maillage du modèle géométrique

Le maillage de la géométrie permet de décomposer le modèle en éléments finis afin de calculer la solution. Le maillage tétraédrique de taille grossière a été choisie pour réduire le temps de calcul dans une durée raisonnable et la mémoire utilisée pour résoudre le problème. Ce type de maillage permet d'avoir un maillage fin sur les petites parties de la géométrie. Le

rendu du maillage est de 294259 éléments au total, 91 domaines, 654 faces, 1295 arêtes et 758 points. Le résultat est montré à la figure suivante.

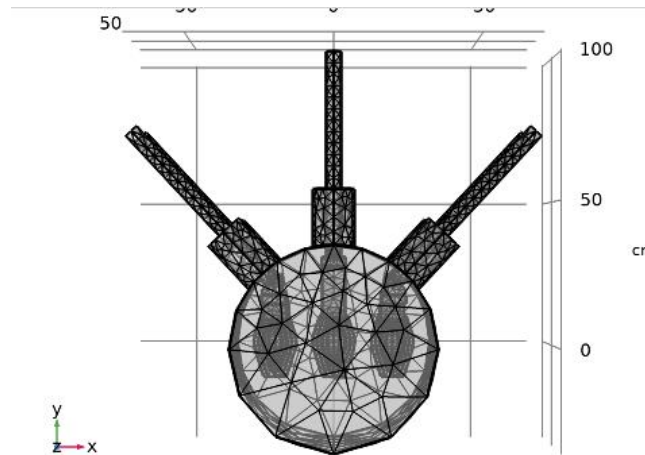


Figure 6.21 : Maillage du disjoncteur

6.7 Résultats et comparaison avec les tests expérimentaux

6.7.1 Simulation avec le SF₆ à 1,5 bar abs

La simulation a pris 9911 s soit 2 h 46 min 15 s pour trouver une convergence vers une solution finale avec le solveur temporel de Comsol Multiphysics. Après 16 h, l'augmentation de température ne dépasse plus 1K par heure, ce qui met fin au test d'élévation de température selon les spécifications des normes IEEE et CEI. La température maximale obtenue à la fin du test est de 96,36°C correspondant à une différence de 69,36°C. Le tableau suivant présente les résultats de température des différents emplacements où des thermocouples ont été placés lors des tests expérimentaux. Il faudra noter que la simulation tient bien en compte la répartition du courant dans les conducteurs (skin effect) car la densité de courant varie en tout point.

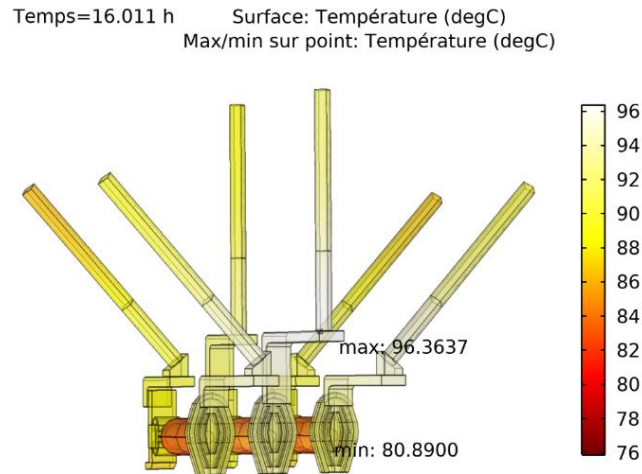


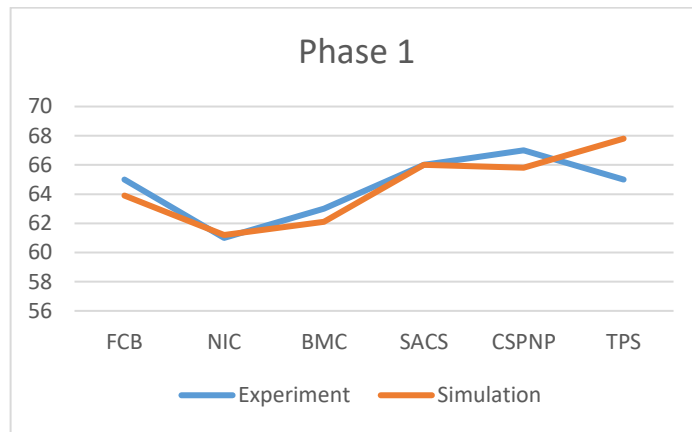
Figure 6.22: Distribution de température dans les conducteurs à la fin des tests

Tableau 6.9 : Résultats de simulation des tests avec le SF₆

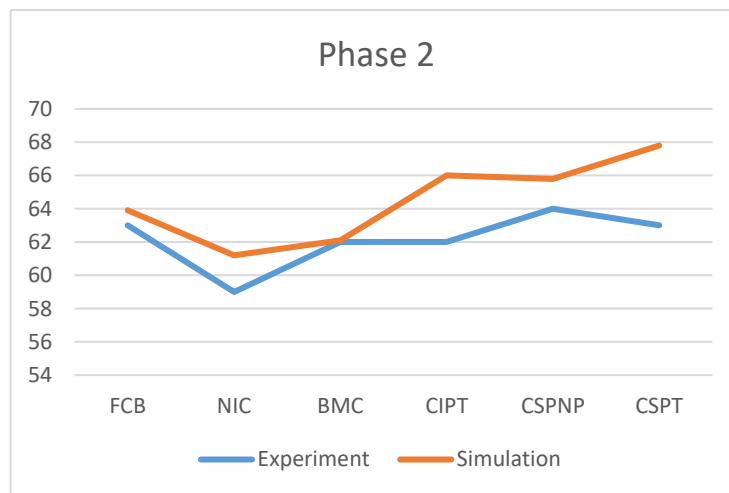
Désignation	Elévation de température (K)		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Fixed cover bottle	63,9	65,2	64
Nappe inf. cuivre	61,2	61,9	61,2
Bride mobile cuivre	62,1	62,9	62,4
Sabot alu coté sup	66	-	66
Connexion inf. proche traversée		63,9	
Connexion sup proche nappe pôles	65,8	67,5	65
Traversée proche sabot	67,8		68,1
Connexion sup. proche traversée		69,4	

Ces résultats comparés avec ceux du test expérimental montrent une déviation maximale de 1,6 K sur les phases 1 et 3 et de 6,4 K au niveau de la connexion inférieure proche traversée sur la phase 2. La figure suivante montre les résultats obtenus en comparaison avec ceux des tests expérimentaux. Ces différences obtenues peuvent être causées par les simplifications

faites sur le modèle géométrique en particulier l'élimination du mécanisme d'ouverture des contacts M5S situé au milieu du disjoncteur, proche du cabinet basse tension permettant de réduire davantage la température notamment celle de la phase du milieu. Autres facteurs possibles de cette différence peuvent être les paramètres des contacts électriques (la rugosité de surface, entre autres...) qui sont inconnus ou la modélisation des isolations des traversées considérés comme des couches minces monocoques.



(a)



(b)

Figure 6.23 : Différence de température entre les tests expérimentaux et la simulation numérique a) sur la phase 1, b) sur la phase 2

Ces résultats de simulation, malgré les différences notées sur la phase 2, sont en accord avec le reste des résultats expérimentaux et n'excèdent pas les limites recommandées par la norme IEEE : le modèle numérique développé est bien valide pour prédire l'élévation de température avec l'utilisation de l'azote comme gaz d'isolation.

6.7.2 Simulation avec N_2 à 2,5 bars abs

L'azote pure sous pression absolue de 2,5 bars ayant réussi les tests de tenue aux chocs de foudre et de tenue à fréquence industrielle est utilisé dans cette simulation pour trouver l'élévation de température au sein des différents conducteurs. La simulation a duré 10210 s soit 2 h 50 min 10 s et la figure montre la distribution de température à la fin des tests.

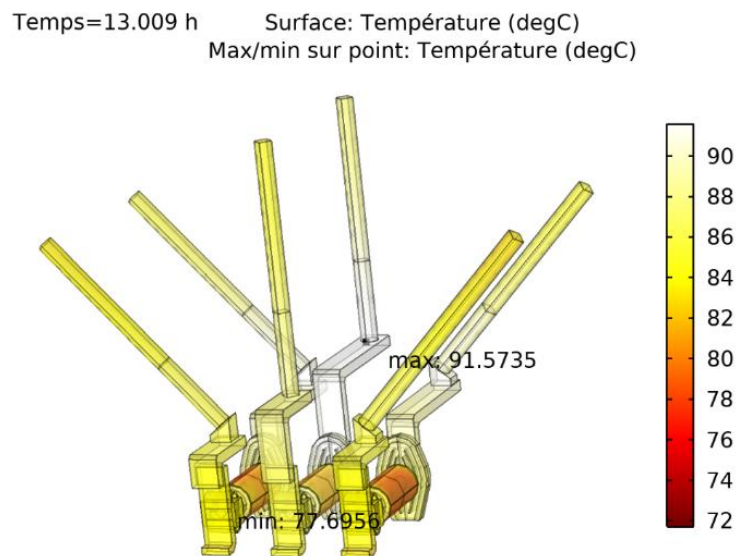


Figure 6.24 : Distribution de température sur les conducteurs avec N_2 pur à 2,5 bars abs

Le test prend fin après 14 heures avec une température maximale de 91,57°C correspondant à une élévation de 64,57°C plus faible que celle obtenue avec le SF_6 . La figure 6.25 montre la comparaison de la température maximale entre le N_2 et le SF_6 . On note que pour l'azote, la température maximale est la même que celle pour le SF_6 durant les premières heures, mais

diminue légèrement et est inférieure aux points d'arrêt des tests et en régime permanent. La conclusion tirée de cette première analyse est que l'azote pur à 2,5 bars abs dans le design actuel du VOX a réussi les tests d'élévation de température pour un courant nominal de 2000 A, 60 Hz. Le tableau suivant présente les résultats obtenus aux emplacements des thermocouples lors des tests expérimentaux.

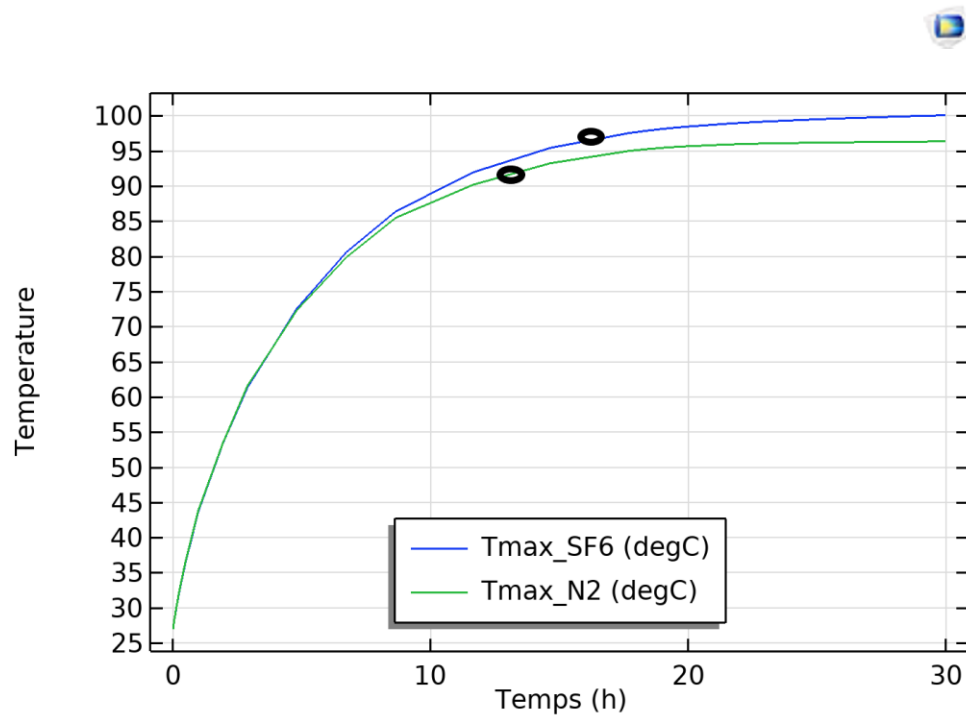
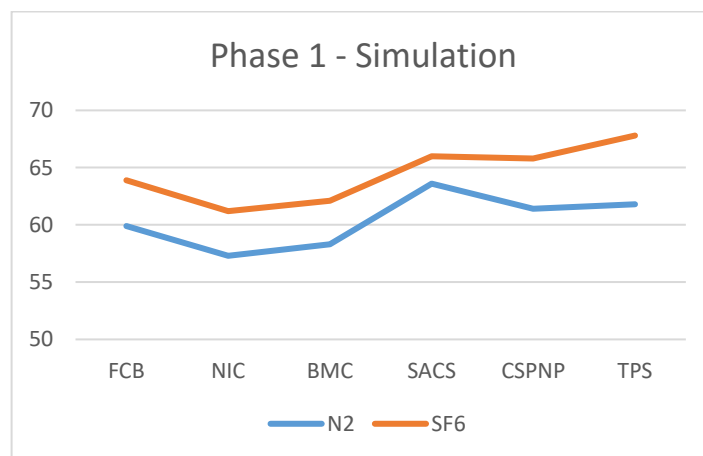


Figure 6.25 : Température maximale des conducteurs et points d'arrêt des tests avec N₂ et SF₆ comme gaz d'isolation

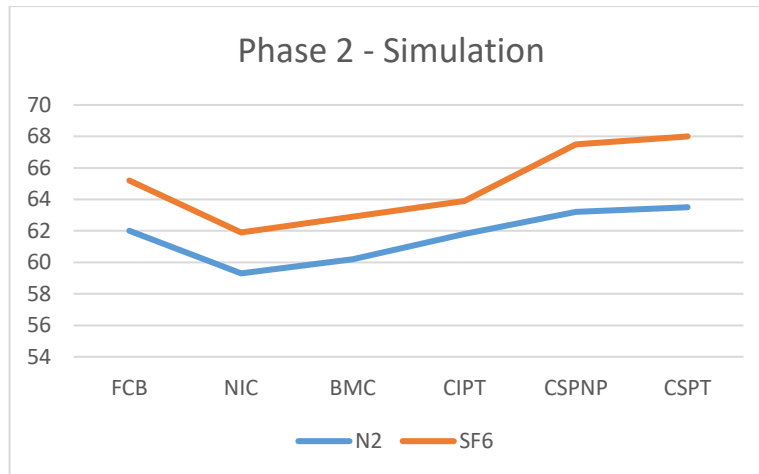
Tableau 6.10 : Résultats de simulation des tests avec le N₂

Désignation	Elévation de température (K)		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Fixed cover bottle	59,9	62	60,3
Nappe inf. cuivre	57,3	59,3	57,4
Bride mobile cuivre	58,3	60,2	58,6
Sabot alu coté sup	63,6	-	64
Connexion inf. proche traversée		61,8	
Connexion sup proche nappe pôles	61,4	63,2	61,2
Traversée proche sabot	61,8		63,2
Connexion supérieure proche traversée		63,5	

La figure suivante montre les éléments conducteurs dans le disjoncteur sont mieux refroidis dans l'azote pur à 2,5 bars abs que dans le SF₆ à 1,5 bar abs. Ceci est causé d'abord par la conductivité thermique de l'azote plus élevé que celui du SF₆ sur cette plage de température, ensuite la pression relative de l'azote 3 fois plus égale à celle du SF₆ qui a un impact sur le calcul de la densité du gaz et des équations de transfert de chaleur.



(a)



(b)

Figure 6.26 : Comparaison entre les résultats de simulation avec N₂ et SF₆ à la fin des tests sur a) sur la phase 1, b) sur la phase 2

Cette partie du mémoire concernant la simulation numérique de l'élévation de température des parties actives du disjoncteur montre une bonne concordance avec les résultats théoriques expérimentaux avec quelques petites différences dues aux simplifications effectuées en vue de rendre la simulation plus réalisable avec les ordinateurs classiques avec une mémoire interne moyenne. Une nette amélioration du comportement thermique au sein du disjoncteur est notée dans les résultats lorsque l'azote pur à 2,5 bars abs est utilisé par rapport au SF₆ à 1,5 bar abs. Sur l'ensemble des composants auxquels sont placés des thermocouples lors de l'essai expérimental, la température est inférieure à la valeur expérimentale obtenue en raison de la conductivité thermique de l'azote beaucoup plus élevée que celle du SF₆ mais aussi de la pression trois fois plus élevée jouant un rôle important sur le calcul de la masse volumique qui est utilisée dans les équations thermiques. Il faut noter aussi une nette diminution de l'échauffement des conducteurs isolés avec de la résine d'époxy due notamment à la bonne conductivité thermique de ce matériau. Ceci permet d'explorer une nouvelle solution, toujours dans le but d'améliorer de l'échauffement de

température au sein du disjoncteur : une solution hybride constituée toujours avec l'azote à 2,5 bars abs plus de la résine d'époxy isolant le maximum de surfaces des conducteurs possibles dans le réservoir. La résine d'époxy, étant un bon isolant, permettra dans le cas de tests diélectriques, d'empêcher les électrons de quitter la surface des conducteurs pour migrer vers le milieu gazeux pour participer au claquage : donc son utilisation avec l'azote ne présente aucun risque majeur sur les résultats des tests diélectriques.

6.8 Simulation avec la solution hybride N₂ et résine d'époxy

Une autre solution est aussi proposée après analyse des résultats obtenus avec la simulation avec l'azote seule. Les conducteurs recouverts de résine d'époxy de 0,7 mm d'épaisseur dans la précédente simulation ont montré que l'échauffement est moins élevé par rapport à d'autres endroits dans le disjoncteur. Dans cette partie, les surfaces des conducteurs (jeux de barres, bride mobile, etc.) exceptés les interrupteurs à vide et les sabots en aluminium sont isolés avec de la résine d'époxy avec la même épaisseur 0,7 mm comme montré sur la figure suivante.

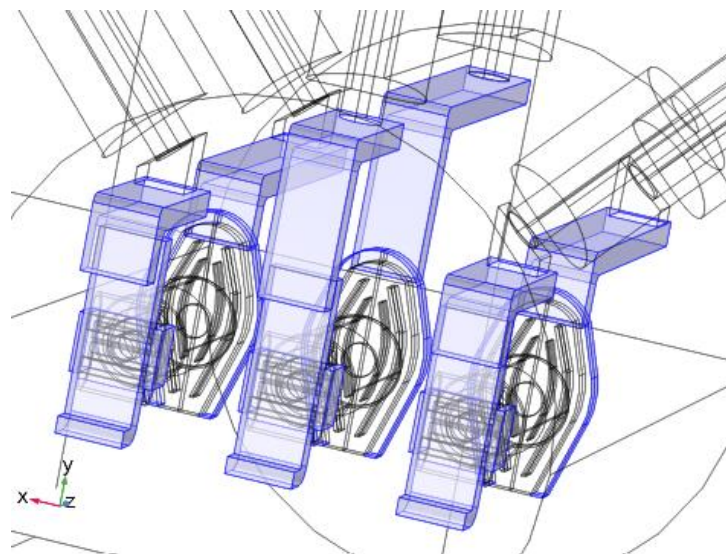


Figure 6.27 : Surfaces des conducteurs à isoler avec de la résine d'époxy

La simulation est effectuée avec un courant nominal de 2000 A, 60 Hz pour voir la différence par rapport à la dernière simulation. Les résultats obtenus lorsque l'élévation de température ne dépasse plus 1K/h comparés avec la solution simple avec ceux de l'azote pur à 2,5 bars abs sont présentés ci-dessous. On note une importante différence avec la solution hybride aussi bien avec le SF₆ qu'avec l'azote. La différence de température maximale observée avec le SF₆ à 1,5 bar abs est de 25,1°C et de 22°C avec l'azote à 2,5 bars abs. La résine d'époxy utilisée aide à la dissipation de chaleur en augmentant la surface d'échange disponible d'autant plus qu'elle est appliquée sur une grande partie des conducteurs (figure 6.27), ce qui contribue à diminuer la chaleur des surfaces des conducteurs et augmenter l'efficacité du processus de dissipation de chaleur. La modélisation de la couche de résine d'époxy en couche mince ainsi que du mode de transfert de chaleur entre les conducteurs et la couche d'époxy peuvent aussi exercer une influence sur les résultats obtenus. Il est important d'effectuer des tests expérimentaux en ce sens pour comparer les résultats, améliorer la modélisation numérique de la couche de résine d'époxy ou valider les résultats de simulation.

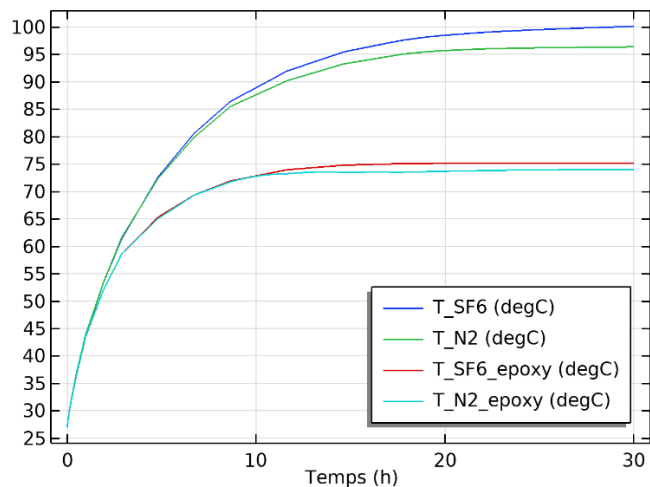
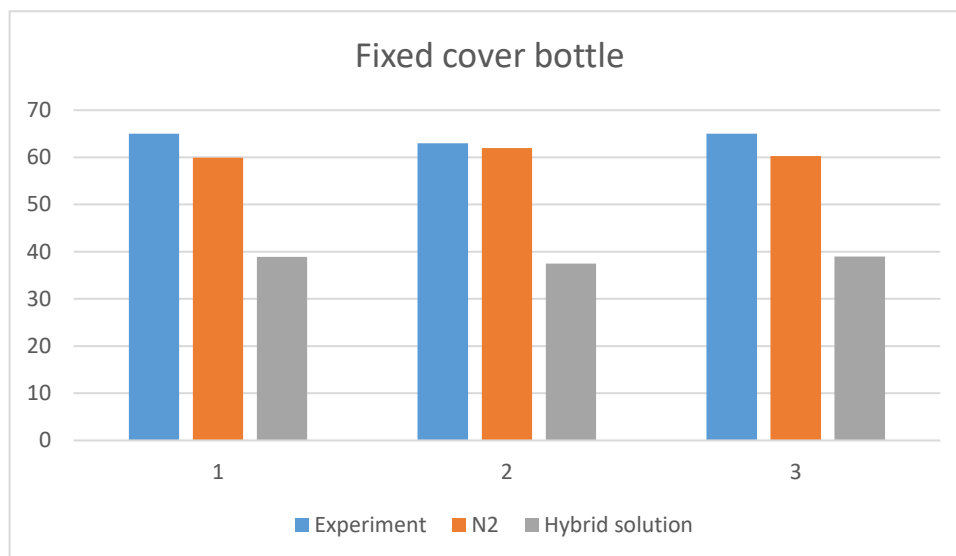


Figure 6.28 : Résultats de simulation avec la solution hybride

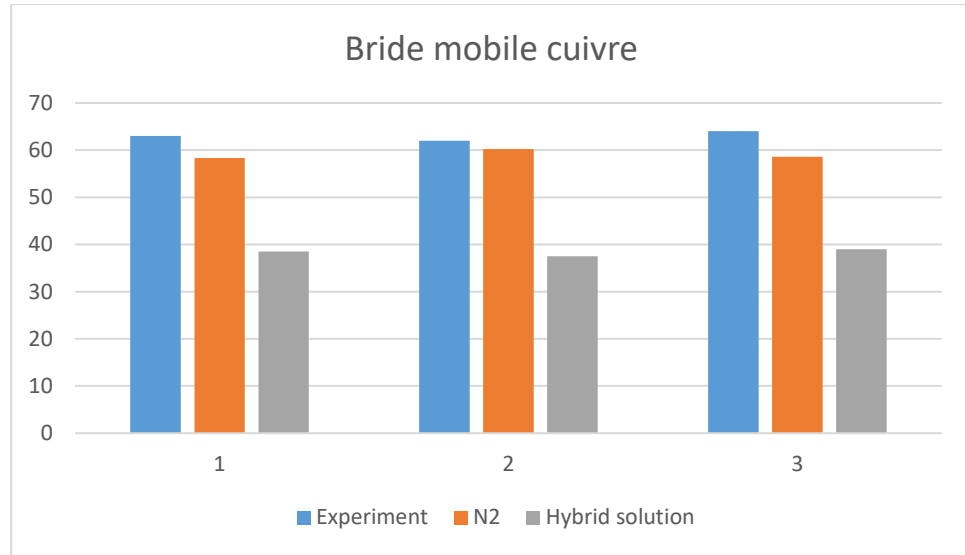
Les valeurs de température obtenues dans les différents emplacements de thermocouples sont présentées au tableau suivant. Les figures suivantes illustrent la différence entre la solution avec l'azote simple, la solution hybride et les résultats expérimentaux.

Tableau 6.11 : Résultats de simulation avec la solution hybride N₂+résine d'époxy

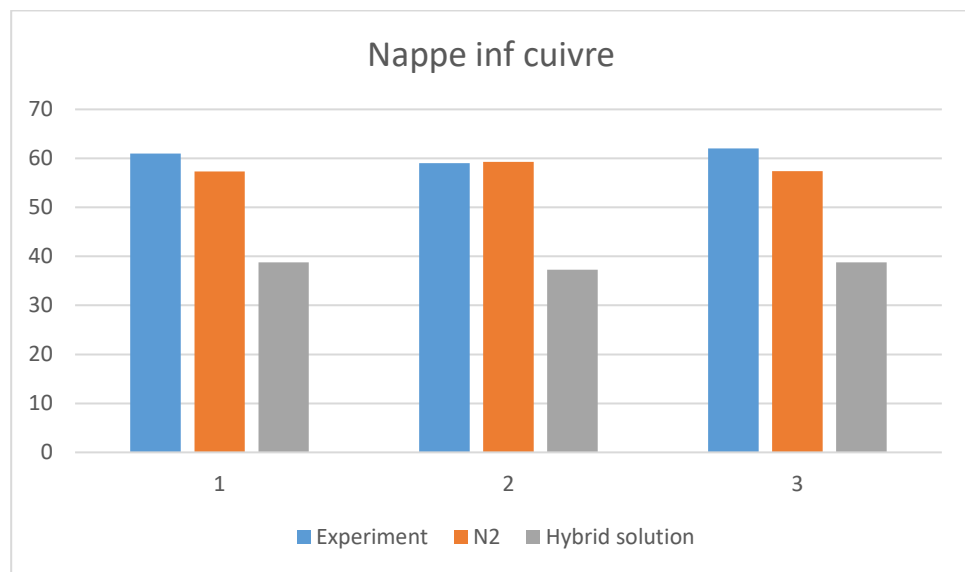
Désignation	Elévation de température (K)		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Fixed cover bottle	38,9	37,5	39
Nappe inf. cuivre	38,8	37,3	38,8
Bride mobile cuivre	38,5	37,5	39
Sabot alu coté sup	41,1		41
Connexion inf. proche traversée		39,9	
Connexion sup proche nappe pôles	39	37,5	38,8
Traversée proche sabot	41,7		41,7
Connexion supérieure proche traversée		39,7	



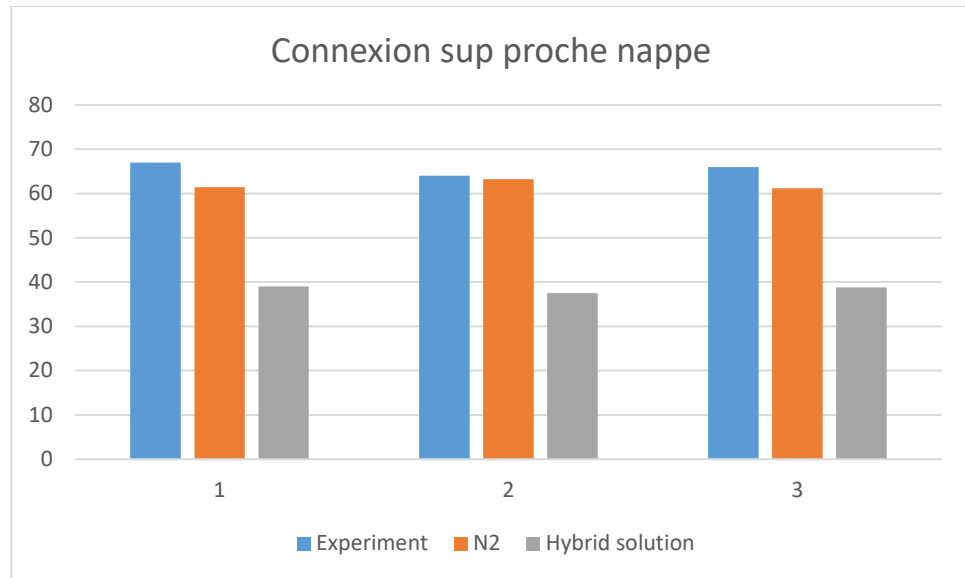
a)



b)



c)



d)

Figure 6.29 : Comparaison des résultats entre les solutions et les expériences sur quelques emplacements des thermocouples

6.9 Simulation des tests diélectriques avec l'azote pur

Les tests diélectriques sont simulés pour évaluer les champs électriques dans le gaz et comparer les valeurs obtenues avec les champs électrique de claquage du gaz. La géométrie et les matériaux des différents composants utilisés précédemment restent les mêmes avec le disjoncteur en position fermée. Seul le module « Courants électriques » est utilisé avec la tension électrique appliquée aux terminaux qui varie en fonction du type de test. La conductivité électrique nécessaire à la simulation de ces tests est évaluée à partir des tests diélectriques effectués dans le chapitre 5 avec l'azote pur.

Tableau 6.12 : Conductivité électrique de l'azote à partir des tests expérimentaux

Pression absolue N ₂ (bar)	2	2	2/2,17	2,17
Tension (kV)	50	60	70	80
Courant (mA)	5,6	6,8	7,9	9,1
Impédance (MΩ)	15,46	15,28	15,35	15,23
Conductivité électrique (10 ⁻⁶ S/m)	1,44	1,46	1,45	1,46

6.9.1 Test de tenue en tension à fréquence industrielle

La simulation des tests de tenue en fréquence industrielle est effectuée comme décrit dans CEI 62271-100 avec le disjoncteur en position fermée. La tension appliquée sur les terminaux est de 80 kV, 60 Hz comme suit :

$$V_p = 80\sqrt{2} * \sin(\omega t) \quad \text{Équation 6.41}$$

Le tableau suivant présente les résultats obtenus et la figure d'après montre les courbes des champs électriques maximaux.

Tableau 6.13 : Résultats de simulation de tests de tenue à fréquence industrielle

N ₂ à 2,17 bars abs			
Etat du disjoncteur	Appliquée	Terre	Champ électrique max. (kV/mm)
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	2,57
	B, b	A, a, C, c, f	2,60
	C, c	A, B, a, b, f	2,67

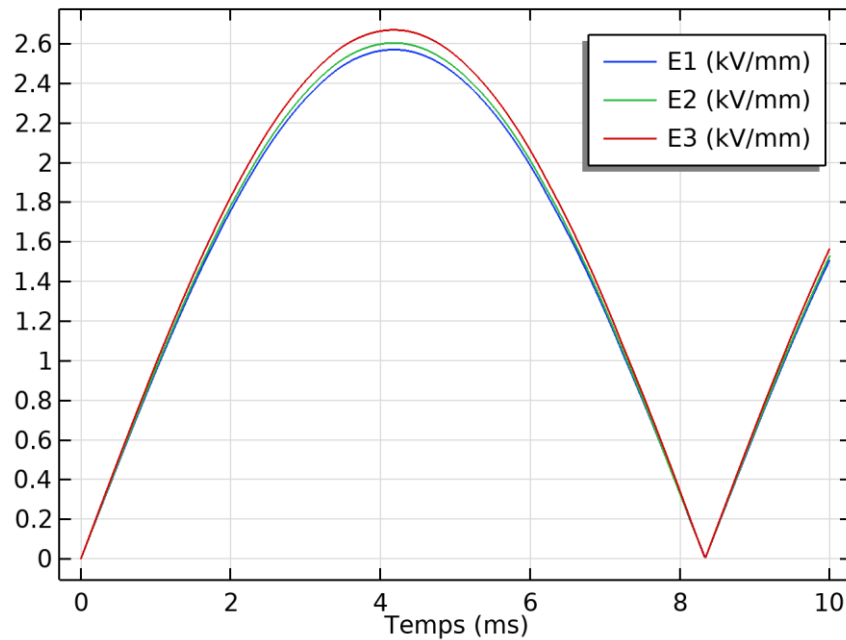


Figure 6.30 : Courbes de champs électriques maximaux dans le gaz N_2

La valeur maximale de champ électrique obtenue dans cette simulation est de 2,67 kV/mm. F. Guastavino et al. dans [40] ont étudié la tension de claquage de mélanges gazeux composés d'azote et de SF_6 dans une configuration d'électrodes séparés par 8 mm. Les résultats obtenus montrent que la tendance de la courbe est quasi-linéaire pour le cas de l'azote avec comme tension moyenne de claquage de 19 et 36,2 kV respectivement pour 1 et 3 bars comme l'indique la figure 6.27. Il en est déduit la tension moyenne de claquage pour 2,17 bars qui est de 29,06 kV et le champ moyen électrique de claquage, 3,63 kV/mm.

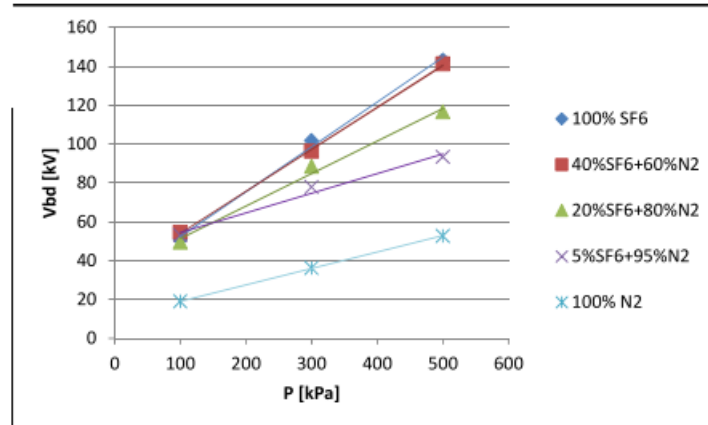


Figure 6.31 : Tendence tension de claquage vs pression des gaz testés [40]

De même, le champ électrique obtenu dans [41] par D. Denissov et al. dans une configuration d'électrodes en plaque d'aluminium avec l'azote en fonction de la pression sans contamination de particules est montré à la figure 6.29. La valeur correspondant pour la pression de 2,17 bars avoisine 34 kV/cm soit 3,4 kV/mm.

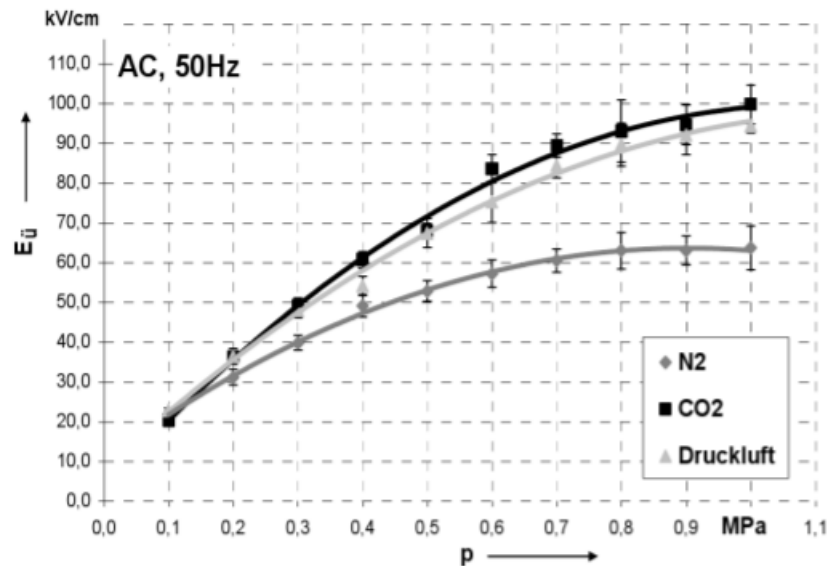


Figure 6.32 : Champ électrique de claquage en fonction de la pression [41]

Ces valeurs expérimentales sont supérieures à la valeur maximale obtenue avec la simulation et prouvent que l'azote pur à 2,17 bars abs peut facilement passer les tests de tenue à fréquence industrielle à 80 kV dans le disjoncteur VOX.

6.9.2 Simulation tests d'impulsions choc de foudre

La simulation de ces tests est effectuée à une tenue à 200 kVp comme décrit par CEI 62271-100. Les tests sont effectués avec le disjoncteur en position fermée. La tension appliquée sur les terminaux est une impulsion choc de foudre normalisée (1,2/50 μ s) décrite comme suit :

$$V_{imp} = 209.10^3 \left[e^{\left(\frac{-t}{69.10^{-6}}\right)} - e^{\left(\frac{-t}{0,57.10^{-6}}\right)} \right] \quad \text{Équation 6.42}$$

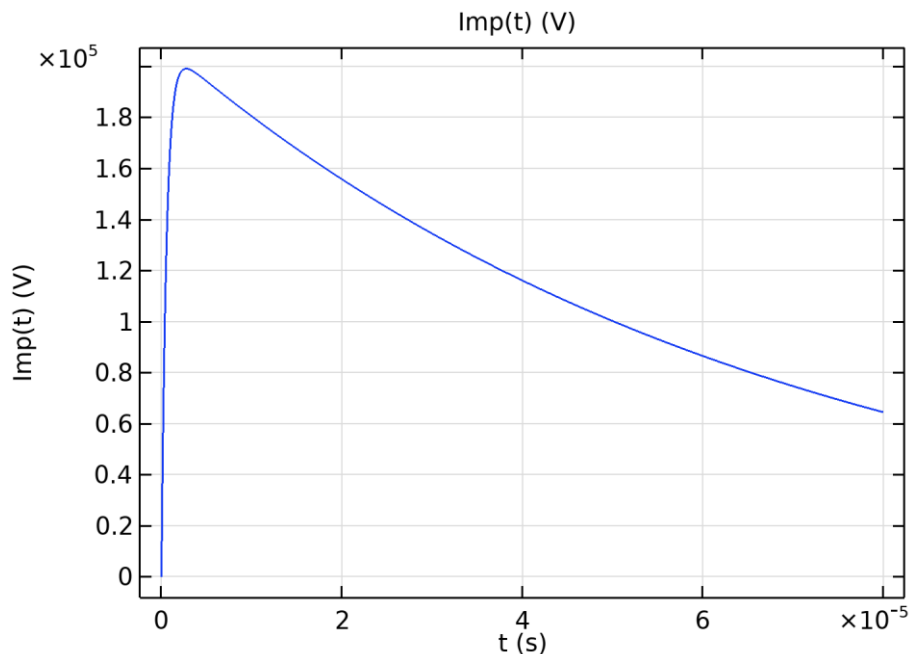


Figure 6.33 : Courbe de tension choc de foudre normalisée (1,2/50 μ s)

La simulation effectuée dans un intervalle de temps d'une impulsion permet d'évaluer le champ électrique maximum dans le gaz. Les résultats sont illustrés à la table suivante.

Tableau 6.14 : Résultats de simulation avec l'azote à 2,17 bars abs

N₂ à 2,17 bars abs			
Etat du disjoncteur	Appliquée	Terre	Champ électrique max. (kV/mm)
Fermé	A, a	B, b, C, c, f	4,52
	B, b	A, a, C, c, f	4,58
	C, c	A, B, a, b, f	4,70

Les résultats de tests sont tracés sur un même graphique et on note que la valeur maximale de champ électrique enregistrée est de 4,70 kV/mm obtenue sur la phase C. Le claquage expérimental obtenu dans [42] par Meijer et al., pour l'azote est évalué à $2 \pm 0,3$ kV/(mm.bar), ce qui correspond pour notre cas de simulation de 2,17 bars à 4,34 kV/mm. La valeur maximale obtenue avec la simulation est supérieure à 4,34 kV/mm, ce qui signifie que la limite de résistivité du gaz sera atteinte lors des tests pouvant mener à un claquage. Cela explique pourquoi les tests expérimentaux de tenue aux chocs de foudre avec la pression de 2,17 bars abs ont été un échec à 200 kVp. Une augmentation de la pression est requise afin d'améliorer la résistivité du gaz pour pouvoir passer les tests avec un champ électrique inférieur à la limite de claquage.

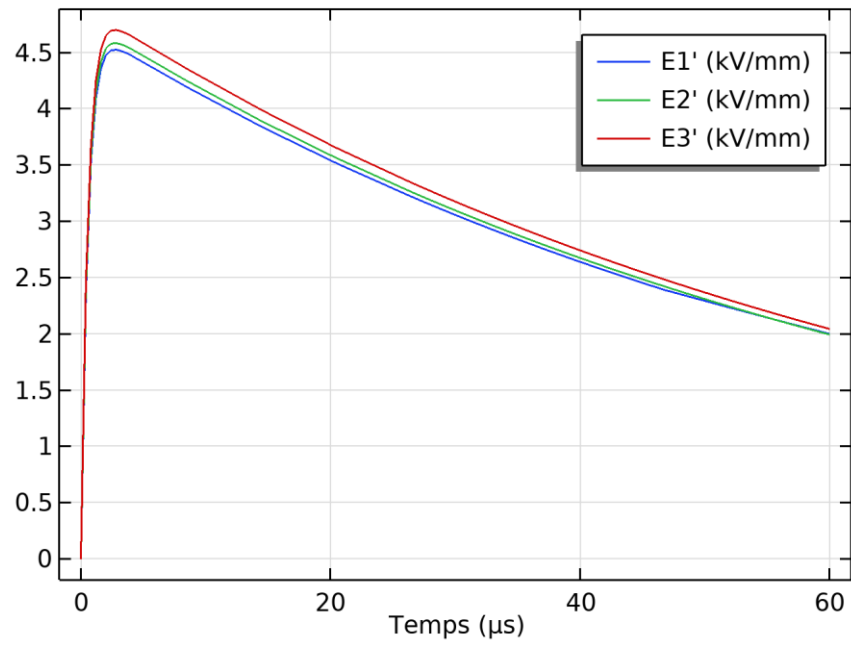


Figure 6.34 : Courbe de champ électrique maximum des tests d'impulsions de foudre

CONCLUSION

L'étude portant le remplacement du SF₆ comme gaz d'isolation dans une application industrielle de disjoncteur moyenne tension à interrupteurs à vide relève d'une étude minutieuse avec beaucoup de paramètres à tenir en compte dont les plus importants ici sont un pouvoir de réchauffement global faible, une température d'ébullition relativement basse et une bonne capacité diélectrique par rapport au SF₆.

D'abord, l'étude de l'art, tenant compte de ces paramètres a permis de se concentrer sur les gaz naturels et/ou mélanges gazeux sans SF₆ à savoir sur le gaz naturel N₂ ainsi que ses mélanges avec le protoxyde d'azote N₂O et le dioxyde de carbone CO₂ avec des proportions diverses pour trouver le mélange avec la pression et compositions optimales.

A la suite du changement du gaz d'isolation, les tests et vérifications de performances conformément aux standards CEI et ANSI doivent être refaits pour certifier le nouveau disjoncteur SF₆-free. Mais, parmi ces tests, plusieurs ne sont pas affectés par le changement du gaz d'isolation et les tests requis se limitent aux tests diélectriques et test d'élévation de température. Seule l'azote pur a réussi les tests diélectriques selon les recommandations du constructeur et des normes CEI et ANSI pour un disjoncteur de 38 kV. Les valeurs de pressions absolues obtenues sont de 2,5 bars pour une tenue de tension aux impulsions de foudre de 200 kVp et 2,17 bars pour une tenue de tension à fréquence industrielle de 80 kV pendant une minute. Les mélanges à base d'azote n'ont pas été concluants lors des tests diélectriques car l'ajout de CO₂ ou de N₂O contribue à la diminution du champ critique réduit

rendant ainsi le mélange vulnérable aux décharges électriques. Les résultats de tests ont montré que les mélanges gazeux N_2/CO_2 et N_2/N_2O résistent moins en polarité négative qu'en positive car les électrons ont beaucoup plus la facilité grâce à la nature de ces mélanges, de gagner assez d'énergie pour quitter la surface des conducteurs et participer au claquage du gaz. L'implémentation de la nouvelle solution d'isolation gazeuse, à savoir l'azote pur N_2 à 2,5 bars abs, n'engendrera aucun changement sur la conception mécanique du disjoncteur d'autant plus que la capacité de tenue en pression du disque d'éclatement est de 3,2 bars abs et celle du réservoir est de 581 kPa, soit 5,81 bars.

La simulation électrothermique effectuée pour étudier l'élévation de température au sein du disjoncteur avec comme gaz d'isolation l'azote pur à 2,5 bars abs a montré des résultats meilleurs que ceux obtenus expérimentalement avec le SF_6 à 1,5 bar abs. Les petites différences notées sont causées par les simplifications nécessaires faites lors de la modélisation en vue de réduire le temps de calcul et l'espace mémoire utilisé pour réaliser la simulation dans un temps raisonnable avec un stockage mémoire relativement limité. La simulation avec l'azote à 2,5 bars abs comme gaz d'isolation a montré des résultats meilleurs que ceux du SF_6 à 1,5 bar abs obtenus expérimentalement en raison de la capacité thermique et de la conductivité thermique plus élevés que ceux du SF_6 et de la pression qui est trois fois supérieure à celle du SF_6 .

L'azote pur à 2,5 bars abs constitue donc une bonne solution de remplacement du SF_6 en termes de gaz d'isolation du disjoncteur moyenne tension à coupure dans le vide, car remplit toutes les conditions de tests diélectriques nécessaires au bon fonctionnement de l'isolation, mais aussi possède un comportement thermique meilleur que celui du SF_6 . De plus, cette nouvelle solution est financièrement et écologiquement meilleure que le SF_6 car c'est un gaz

naturel, donc moins cher et plus disponible que le SF₆ qui est un gaz industriel, et son pouvoir de réchauffement global est nul, par conséquent aucun effet néfaste sur l'atmosphère contrairement au SF₆ qui équivalait à 23900 fois au CO₂ en termes de pollution atmosphérique.

Les résultats obtenus dans cette étude ouvrent aussi de nombreuses perspectives d'investigations pour améliorer l'isolation dans le disjoncteur VOX. La simulation électrothermique effectuée avec la couche d'époxy 0,7 mm recouvrant les jeux de barres avec l'azote à 2,5 bars abs comme gaz d'isolation a montré une diminution considérable de l'élévation de la température par rapport à la solution normale avec l'azote. Des tests expérimentaux supplémentaires devront être faits dans ce sens pour comparer et vérifier ces résultats de simulation. De même, l'époxy est un bon isolant et contribuerait à empêcher la propagation et le déplacement des électrons à partir des surfaces des conducteurs vers le milieu isolant pour participer au claquage. Son utilisation avec l'azote constituerait donc une solution d'isolation hybride (solide-gaz) fiable qui peut remplacer le SF₆ dans le disjoncteur VOX. De plus, d'autres études pour augmenter la capacité en courant du disjoncteur à la capacité maximale de l'interrupteur à vide VG5-2500A peuvent être effectuées et améliorer davantage l'isolation et la durée de vie de l'appareillage tout en restant dans les limites d'échauffement permises.

Bibliographie (ou Références)

- [1] *Cahier technique 188 : Propriétés et utilisation du SF₆ dans les appareils HT et MT*, 1st ed., Schneider Electric Co., 2003, pp.1-25.
- [2] S.A. Boggs, "Sulfur Hexafluoride: Introduction to the Material and Dielectric." *IEEE Elec. Insul. Magazine*, Vol. 5, N°5, pp.18-21, 1989.
- [3] L.G Christophorou, J.K Olthoff and R.J. Van Brunt, "Sulfur Hexafluoride and the Electric Power Industry", *IEEE Elec. Insul. Magazine*, Vol.13, N°5, 1997.
- [4] N. M. Nguyen, « Caractérisation de matériaux écologiques en vue du remplacement du SF₆ dans les systèmes d'isolation moyenne tension », Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., Université de Grenoble, France, 2011.
- [5] SF₆ Alternatives: A literature review on SF₆ gas alternatives for use on distribution networks, 4th ed., Western Power Distribution Co., 2018, pp. 1-54.
- [6] B. Pan, et al., "Green gas for grid as an eco-friendly alternative insulation gas to SF₆: A review," *MDPI Applied Sciences*, 2020, pp. 1-13.
- [7] Y. Kieffel, T. Irwin, P. Ponchon, and J. Owens "Green Gas to Replace SF₆ in Electrical Grids." *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 14, N°2, pp. 32-39; 2016.
- [8] United Nations Organization. (1998). "Kyoto Protocol To The United Nations Framework Convention On Climate Change".
- [9] 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.
- [10] S. Philip, "Compressed gas insulation in the million-volt range: A comparison of SF₆ with N₂ and CO₂", in *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. 82, N°66, pp.356-359.
- [11] Beroual, A. and A. Haddad, "Recent Advances in the Quest for a New Insulation Gas with a Low Impact on the Environment to Replace Sulfur Hexafluoride (SF₆) Gas in High-Voltage Power Network Applications." *MDPI Energies* **10**(8), 2017.

- [12] C. Preve, R. Maladen and D. Piccoz, "Method for validation of new eco-friendly insulating gases for medium voltage equipment" in *IEEE International Conference on Dielectrics (ICD)*, pp. 235-240, 2016.
- [13] Tortorici, J. F. and O. Gascard, "Joint d'isolation diélectrique pour ampoule à vide." Areva T&D, pp.1-14, 2006.
- [14] L. Chen and al., "CF₃I Gas Mixtures: Breakdown Characteristics and Potential for Electrical Insulation." in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.32, N°2, pp.1089-1097, 2017.
- [15] Su, Z., et al., "Discharge characteristics of CF₃I/N₂ mixtures under lightning impulse and alternating voltage." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.24, N°5, 2017.
- [16] Katagiri, H., et al., "Investigation of the performance of CF₃I Gas as a Possible Substitute for SF₆." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.15, N°5, pp. 1424-1429, 2008.
- [17] Ngoc, M. N., et al., "Electrical breakdown of CF₃I and CF₃I/N₂ gas mixtures" in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, France, 2009, pp. 557-560.
- [18] Xiao, A., et al., "Recent Development of Alternative Gases to SF₆ for High Voltage Electrical Power Applications" in *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2020.
- [19] J. D. Mantilla and al., "Investigation of the insulation performance of a new gas mixture with extremely low GWP" in *IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Switzerland, pp. 469-473, 2014.
- [20] Nechmi, H. E., et al., "Fluoronitriles/CO₂ gas mixture as promising substitute to SF₆ for insulation in high voltage applications." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.23, N°5, 2016.
- [21] O. Lesaint, et al., "A Study of Breakdown Properties of HFO Gas under DC and Impulse Voltage" in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP)*, France, 2018, pp. 606-609.
- [22] Yao, Y., et al., "Dielectric performance of HFO-gas mixtures" in *IEEE 21st International Conference on Pulsed Power (PPC)*, United Kingdom, 2017, pp. 1-6.

- [23] Tian, S., et al., "Research status of replacement gases for SF₆ in power industry," AIP Advances, 2020.
- [24] John Kuffel, E. K., W. S. Zaengl, "High Voltage Engineering Fundamentals", London, England W1P 9HE, British Library, 2000.
- [25] Hauschild, W. and E. Lemk, "High-Voltage Tests and Measuring Techniques", Springer, 2014.
- [26] H. Ito, "Switching Equipment", Switzerland, Springer, 2018.
- [27] Smeets, R., et al., "Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems", WILEY, 2015.
- [28] "Guide de conception MT, " Schneider Electric Industries SA, Grenoble, 2000.
- [29] International European Commission, "High voltage switchgear and controlgear", Part 100: High-voltage alternating current circuit-breakers, 2001.
- [30] "AC High-voltage circuit-breakers rated on a symmetrical current basis," IEEE Std C37.09, 1999.
- [31] R. Nowak and al., "A 3-D Electrothermal Simulation of the Outdoor Medium-Voltage Circuit Breaker," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, N°2, pp. 572-579; 2019.
- [32] L. Wang, and al. "Simulation Analysis on the Impact of Different Filling Gases on the Temperature Rise of C-GIS." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology*, Vol.9, N°10, pp. 2055-2065, 2019.
- [33] M. T. Dhotre, J. Korbel, X. Ye, J. Ostrowski, S. Kotilainen, and M. Kriegel, "CFD simulation of temperature rise in high-voltage circuit breakers," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 32, N°6, pp. 2530–2535, Dec. 2017.
- [34] G. Olivier. "Rapport tests : Disjoncteur extérieur VOX, essais à 170 kV". Energie Conseil Olivier, Inc. Montréal, 2021.
- [35] S. IBANEZ and G. APARICI, "DRC 414-VOX 38-2000A-25-VG4A-temperature rise", AREVA T&D, Montpellier, France, 2006.
- [36] National Institute of Standards and Technology, *Sulfur Hexafluoride*. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C2551624&Mask=1EFF>.

- [37] National Institute of Standards and Technology, *Nitrogen*. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7727379&Units=SI&Mask=1&Type=JANAFG&Plot=on>
- [38] J. Pachin, A. Hösl and C. M. Franck, "Breakdown Measurement of N₂O Mixtures with CO₂, N₂, O₂ in Uniform Electric Fields." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol.28, N°5, Oct. 2021.
- [39] W. Pfeiffer and D. Schoen, "Alternative gaseous insulation for GITL using N₂O/N₂ gas mixtures – dielectric performance of 20/80 % N₂O/N₂ for VFT-stress," in *5th Intern. Conf. Gas Discharges Their Appl.*, 2004, pp. 351– 354.
- [40] F. Guastavino, A. Ratto, F. Porcile, E. Torello and D. Santinelli, "Dielectric characterization of gas mixtures as electrical insulating for high voltage components and appliances" in *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2013, Italy, pp. 1008-1110.
- [41] D. Denissov, H. Rebholz, W. Köhler and S. Tenbohlen, "Dielectric Strength of Different Gases in GIS.," University of Stuttgart, Germany, 2005.
- [42] S. Meijer, J.J Smit and A. Girodet, "Comparison of the Breakdown Strength of N₂, CO₂ and SF₆ using the Extended Up-and-Down Method" in *IEEE 8th International Conference on Properties & applications of Dielectric Materials*, 2006, France, pp. 653-656.
- [43] G. Olivier, G. Daigneault, Y. Gervais, "Uniform field breakdown of Fluorocarbons and other gases" in *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1984, USA, pp. 358-363.
- [44] G. Daigneault, G. Olivier, Y. Gervais, A. Galarneau, "Uniform field breakdown of gas mixtures", Annual Report, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1985, pp. 130-136.
- [45] J. F. Drapeau, G. Olivier, Y. Gervais, "Non uniform field breakdown of gases", Annual Report, *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 1988, pp.238-244.
- [46] M. Akbar and N. H. Malik, "Electrical Breakdown of N₂O-SF₆, N₂O-CCl₂F₂ and N₂O-CO₂ Gas Mixtures." *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 1985, Vol. EI-20 N°3, pp. 581-585.

- [47] G. Olivier. "Rapport ECO-2022-505 : Disjoncteur extérieur VOX, essais à 200 kV".
Energie Conseil Olivier, Inc. Montréal, 2021.

Annexe A – Limites d'élévation de température selon CEI 62271-100 : 2007

Table 3 – Limits of temperature and temperature rise for various parts, materials and dielectrics of high-voltage switchgear and controlgear

Nature of the part, of the material and of the dielectric (Refer to points 1, 2 and 3) (Refer to note)	Maximum value	
	Temperature °C	Temperature rise at ambient air temperature not exceeding 40 °C K
1 Contacts (refer to point 4) Bare-copper or bare-copper alloy – in air – in SF ₆ (sulphur hexafluoride) (refer to point 5) – in oil Silver-coated or nickel-coated (refer to point 6) – in air – in SF ₆ (refer to point 5) – in oil Tin-coated (refer to point 6) – in air – in SF ₆ (refer to point 5) – in oil	 75 105 80 105 105 90 90 90 90	 35 65 40 65 65 50 50 50 50
2 Connection, bolted or the equivalent (refer to point 4) Bare-copper, bare-copper alloy or bare-aluminium alloy – in air – in SF ₆ (refer to point 5) – in oil Silver-coated or nickel-coated refer to point 6) – in air – in SF ₆ (refer to point 5) – in oil Tin-coated in air – in SF ₆ (refer to point 5) – in oil	 90 115 100 115 115 100 105 105 100	 50 75 60 75 75 60 65 65 60
3 All other contacts or connections made of bare metals or coated with other materials	(Refer to point 7)	(Refer to point 7)
4 Terminals for the connection to external conductors by screws or bolts (refer to point 8) – bare – silver, nickel or tin-coated – other coatings	 90 105 (Refer to point 7)	 50 65 (Refer to point 7)

Annexe B – Résultats de simulation avec la résine d'époxy comme couche mince sur tous les conducteurs du disjoncteur

