

TABLE DES MATIERES

GLOSSAIRE	- 7 -
INTRODUCTION GENERALE	- 9 -
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART	- 15 -
I.1 INTRODUCTION	- 16 -
I.2 MATERIELS ET MATERIAUX CONCERNES PAR L'ETUDE	- 17 -
I.2.1 Tensions	- 17 -
I.2.2 Matériel (câbles)	- 17 -
I.2.3 Matériaux d'isolation concernés.....	- 18 -
I.3 CONTRAINTES ENVIRONNEMENTALES ET D'UTILISATION DE L'HELICOPTERE	- 20 -
I.3.1 Contraintes Environnementales.....	- 20 -
I.3.2 Contraintes d'utilisation.....	- 22 -
I.4 POLYTETRAFLUOROETHYLENE (PTFE)	- 22 -
I.4.1 Influence des paramètres de température, d'humidité et de contraintes multiples sur les propriétés du PTFE - 22 -	
I.4.2 Evolution des propriétés sous vieillissement.....	- 26 -
I.5 POLYIMIDE (PI).....	- 28 -
I.5.1 Influence des paramètres température et humidité sur les propriétés des PI	- 28 -
I.5.2 Evolution des propriétés sous vieillissement	- 33 -
I.6 DECHARGES PARTIELLES (DP).....	- 36 -
I.6.1 Définition	- 36 -
I.6.2 Classification des décharges partielles.....	- 37 -
I.6.3 Mécanismes de la décharge.....	- 44 -
I.6.4 Détection des décharges partielles	- 52 -
I.6.1 Vieillissement sous décharges partielles.....	- 62 -
I.7 CHARGES D'ESPACE	- 65 -
I.7.1 Définition	- 65 -
I.7.2 Origine	- 66 -
I.7.3 Effets des charges sur le comportement des isolants	- 68 -
I.7.4 Techniques de mesure.....	- 68 -
I.7.5 Potentiel de surface	- 69 -
I.8 CONCLUSION	- 75 -
CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODES.....	- 77 -
II.1 INTRODUCTION	- 78 -
II.2 CABLES ETUDIES	- 79 -
II.3 LES VIEILLISSEMENTS	- 81 -
II.3.1 Les conditions.....	- 81 -
II.3.2 Mise en place des vieillissements.....	- 82 -
	- 5 -

II.4	MESURES PHYSICOCHIMIQUES.....	- 83 -
II.4.1	FTIR.....	- 83 -
II.4.2	DSC.....	- 84 -
II.4.3	ATG.....	- 85 -
II.4.4	Radiographie à rayon X.....	- 86 -
II.5	BANC DE MESURE DECHARGES PARTIELLES	- 87 -
II.5.1	Méthode générale.....	- 87 -
II.5.2	Méthode sur support.....	- 88 -
II.5.3	Méthode avec électrode de masse tubulaire	- 90 -
II.5.4	Modèle fil/plan.....	- 92 -
II.6	BANC DE MESURE DE POTENTIEL DE SURFACE	- 93 -
II.7	CONCLUSION	- 94 -
 CHAPITRE III : CARACTERISATION PHYSICOCHIMIQUE ET ETUDE DU COMPORTEMENT VIS-A-VIS DES		
DECHARGES PARTIELLES DES CABLES NEUFS ET VIEILLIS.....		- 95 -
III.1	INTRODUCTION	- 96 -
III.2	PROPRIETES DU CABLE DR16 A T0	- 96 -
III.2.1	Propriétés physicochimiques.....	- 96 -
III.2.2	Décharges partielles.....	- 101 -
III.2.3	Modélisation électrostatique	- 106 -
III.3	VIEILLISSEMENTS THERMIQUES STATIQUES.....	- 113 -
III.3.1	Vieillissement sous contrainte thermique seule (240°C)	- 113 -
III.3.2	Vieillissement sous contrainte thermique (240°C) et électrique (540 V DC / 1000 V DC).....	- 123 -
III.4	VIEILLISSEMENT THERMIQUE DYNAMIQUE (VRT)	- 135 -
III.4.1	Effet du vieillissement sur les décharges partielles	- 135 -
III.4.2	Effets du vieillissement sur les propriétés physicochimiques	- 138 -
III.5	CONCLUSION	- 141 -
 CHAPITRE IV : POTENTIEL DE SURFACE		- 143 -
IV.1	INTRODUCTION	- 144 -
IV.2	RESULTATS	- 145 -
IV.2.1	Câble neuf	- 145 -
IV.2.2	Comparaison des différents vieillissements	- 151 -
IV.3	DISCUSSION ET MODELE.....	- 154 -
IV.3.1	Remarques et mécanismes possibles	- 154 -
IV.3.2	Modèle de polarisation interfaciale	- 156 -
IV.4	CONCLUSION	- 157 -
 CONCLUSION GENERALE.....		- 159 -
 BIBLIOGRAPHIE		- 165 -

Glossaire

ATG : analyse thermogravimétrique
ATR : réflectance totale atténuée
BPDA : acide dianhydride biphényl-tetracarboxylique
DSC : differential scanning calorimetry
DdP : retour de potentiel
DP : décharge partielle
FEP : copolymère d'éthylène-propylène fluoré
FTIR : infra-rouge à transformée de fourrier
IEC : Commission électrotechnique internationale
DP : décharge partielle
PDIV : partial discharge inception voltage
PEA : pulse électro-acoustique
PI : polyimide
PDA : diamine p-phénylène
PMDA : dianhydride pyromellitique
PTFE : polytetrafluoroéthylène
RdP : retour de potentiel
RPDIV : repetitive partial discharge inception voltage
Td : température de dégradation
Tf : température de fusion
Tg : température de transition vitreuse
VH : vieillissement humide (85°C/85%HR)
VRT : variation rapide de température (cycles thermiques)

Introduction générale

L'architecture des futurs aéronefs comportera de nouvelles fonctions électriques, en remplacement des circuits hydrauliques et pneumatiques. L'augmentation de l'énergie électrique permet d'obtenir une réduction des masses (élimination du réseau hydraulique) et donc une économie de carburant (et par conséquent une réduction des émissions), un asservissement plus précis, une maintenance plus aisée résultant en plus de sécurité et de confort. Il est alors nécessaire d'augmenter la puissance électrique soit en augmentant l'intensité, soit en augmentant la tension. De façon à ne pas pénaliser le rendement (pertes ou augmentation de masse), il est nécessaire de monter en tension. Or, l'effet des « hautes » tensions sur les systèmes électriques est très peu étudié en aéronautique.

Ces travaux ont été effectués pour et à la demande d'Airbus Helicopters. Même si dans l'ensemble les contraintes aéronautiques avions et hélicoptères sont prises en compte, les travaux se sont surtout concentrés sur les environnements hélicoptères. Actuellement, les tensions de distribution sont généralement de 28 V DC et 270 V DC séquentiel et jusqu'à 230 V AC pour les hélicoptères et les avions. Les tensions envisagées sont aujourd'hui inférieures à 1000 VDC. Toutefois, dans un futur plus éloigné, la possibilité d'augmenter encore ce niveau de tension reste ouverte. L'augmentation de tension peut entraîner des dégradations prématurées des matériaux habituellement utilisés qu'il est indispensable de connaître pour assurer la sécurité des systèmes.

Ces dégradations peuvent conduire à :

- des évolutions des propriétés électriques : sous de fortes tensions, le risque de déclenchement de décharges partielles est plus élevé, ce qui peut engendrer des dégradations de l'isolation et des caractéristiques fonctionnelles des câbles ;
- des évolutions des propriétés telles que des modifications des propriétés diélectriques, mécaniques, chimiques des isolants sont possibles sous fortes tensions. Cela peut être aggravé par une susceptibilité accrue sous contraintes environnementales (pression, humidité et température).

Les évolutions de ces propriétés peuvent apparaître sous contraintes électriques et environnementales, telles que les cycles hydriques qui peuvent aussi faire évoluer les câbles et entraîner des dégradations plus rapides que prévues, voire non prévues.

Actuellement, différents matériaux sont utilisés pour le câblage des systèmes aéronautiques et leurs limites d'utilisation sous fortes tensions ne sont pas connues. Cependant quelques essais préliminaires ont mis en évidence les risques de dégradation des isolants sous haute tension avec apparition d'arc électrique pouvant entraîner un risque d'un point de vue sécurité et/ou utilisation à long terme des câbles. Les câbles sont généralement installés dans des zones difficiles d'accès et peuvent faire plusieurs mètres de long. Il est pratiquement impossible de les changer au cours

de la vie opérationnelle d'un avion ou d'un hélicoptère et ce pour des durées pouvant facilement atteindre 40 ans.

Ces différents points impliquent la nécessité d'analyser, caractériser et modéliser le comportement des matériaux actuels des câbles sous haute tension et dans différents environnements représentatifs des environnements aéronautiques.

Depuis des décennies, les câbles isolés en polyimide (PI) sont apparus comme un excellent compromis dans le domaine puisque le PI présente des propriétés compatibles avec l'aéronautique pour servir d'isolants : une faible constante diélectrique, de faibles pertes diélectriques, une bonne conductivité thermique pour un isolant et une rigidité diélectrique élevée. Sa température d'utilisation correspond à la gamme de température rencontrée dans les systèmes aéronautiques. Cependant, depuis quelques années, cette couche de polyimide est recouverte de téflon pour réaliser une couche de protection hydrophobe et thermorésistante, notamment pour éviter les effets d'« arc tracking ».

L'objectif de la thèse consiste à déterminer les limites d'utilisation en tension des câbles soumis à différents environnements représentatifs des environnements aéronautiques. En particulier, l'étude du comportement des câbles vis-à-vis des décharges partielles a constitué une part importante des travaux ici décrits. L'évolution de ce comportement ainsi que des propriétés physicochimiques du système d'isolation des câbles en fonction de plusieurs types de vieillissements accélérés a donc été examinée.

Au démarrage de la thèse, l'ambition était de conduire ces travaux sur 6 différents types de câbles représentatifs des différentes gammes aujourd'hui exploitées en aéronautique. Une présentation synthétique de ces câbles et de leurs principales caractéristiques est donnée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1 : Caractéristiques des différents câbles

Dénomination	Isolation	Ame	Tension spécifiée	Gamme de température
DR	PI/PTFE	Cuivre (ou cuivre nickel plaqué)	115 V	-55°C à 260°C
MLB (double paire torsadée de DR)	PI/PTFE	Cuivre (ou cuivre nickel plaqué)	115 V	-55°C à 260°C
AD	PI/PTFE	Alliage d'Al plaqué Ni (ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni)	115 V AC 230 V AC en zone pressurisée	-65°C à 230°C
DZ	PI/PTFE	Cuivre (ou alliage de cuivre avec Ni plaqué)	230 V AC	-65°C à 260°C
AZ	PI/PTFE	Alliage d'Al plaqué Ni (ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni)	115 V	-65°C à 180°C
TE	-	Cuivre (ou cuivre nickel plaqué)	-	-

Des essais de vieillissement accéléré ont été engagés sur ces câbles.

Les objectifs initiaux de ces essais étaient :

- de déterminer les mécanismes de dégradation/défaillance sous différentes contraintes
- de déterminer les facteurs d'accélération de ces essais
- d'évaluer la durée de vie des câbles ainsi que leurs limites d'utilisations en fonction de l'environnement

Toutefois, les durées des essais de vieillissement nécessaires à la mise en évidence de changements de propriétés des câbles n'étaient pas connues. La tenue des câbles aux différentes contraintes imposées lors des vieillissements s'est avérée performante, et par conséquent la durée des essais de vieillissement s'est révélée longue. Par manque de temps, il a été choisi de recentrer les travaux sur un seul type de câble : le câble DR16.

Aussi, le premier chapitre du manuscrit présente un état de l'art consacré aux différents matériaux d'isolation des câbles DR16 et à leurs propriétés de tenue sous les contraintes représentatives des conditions aéronautiques (mécaniques, thermiques, électriques, humidité). Puis dans le même chapitre, un rappel sur la physique des décharges est exposé en se concentrant

sur les décharges partielles ; leur classification et méthodes de détections sont rapidement décrites. Enfin, la dernière section du chapitre porte sur la charge d'espace, son origine, son effet sur le comportement des isolants, ainsi que les différentes techniques et méthodes de mesure la mettant en évidence.

Le deuxième chapitre présente les moyens expérimentaux mis en œuvre pour l'étude, incluant en premier lieu un descriptif détaillé des câbles, en particulier du câble DR16. Les conditions des essais de vieillissement accéléré ainsi que leur mise en place sont exposées. Les méthodes de caractérisation physicochimiques des isolants et du câble lui-même sont présentées. Une description détaillée du banc de mesure de décharges partielles est alors proposée. Enfin, la technique de mesure de potentiel de surface sur câble est exposée dans son principe et dans sa réalisation.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus sur le câble DR16 à l'état neuf et vieilli en termes de décharges partielles et d'analyses physicochimiques. Les essais de vieillissement retenus pour ce chapitre sont l'essai sous contrainte thermique statique seule (240°C), l'essai sous contraintes couplées thermique (240°C) et électrique (540 V DC ou 1000 V DC), et l'essai sous contrainte dynamique. Ces résultats sont discutés et analysés en utilisant notamment un modèle électrostatique.

Enfin, le quatrième chapitre est consacré aux résultats de mesure de potentiel de surface (déclin et retour) obtenus après différents types d'essais de vieillissement accéléré. Ces résultats sont discutés et un mécanisme est proposé illustré par un modèle analytique.

CHAPITRE I : Etat de l'art

I.1 Introduction

L'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes aéronautiques passe par une utilisation accrue de l'énergie électrique en remplacement des systèmes pneumatiques, hydrauliques et mécaniques traditionnels. Ce remplacement permet des mesures internes et une maintenance plus aisées des systèmes d'actionnement, une économie de carburant par la réduction des masses embarquées, et offre ainsi des systèmes plus performants, moins polluants, avec plus de sécurité et de confort.

Pour répondre à cette augmentation de la demande en puissance électrique embarquée, il est envisagé d'augmenter la tension du réseau de production et de distribution. Il sera donc possible de trouver des tensions continues de ± 270 V (soit 540 V entre phases) et des tensions alternatives de 230 V. Dans un futur plus ou moins proche, ces tensions pourront être encore augmentées jusqu'à 600 VDC voire au-delà. A ces niveaux de tension, l'apparition de décharges partielles au niveau des câbles doit être considérée, compte-tenu des facteurs de structure (géométrie des conducteurs, proximité de masses, présences de défauts d'isolation) et des contraintes environnementales subies (pression, température, humidité). Ce phénomène électrique pourrait entraîner un vieillissement prématuré dans ces systèmes, voire conduire à des ruptures d'isolation.

Depuis des décennies, les câbles isolés en polyimide sont utilisés dans le domaine de l'aéronautique. Cependant, depuis quelques années, cette couche de polyimide est recouverte de téflon pour réaliser une couche de protection hydrophobe et thermorésistante, ceci pour réduire les risques d'arc tracking. C'est sur ce type de câble qu'a porté le travail présenté dans ce manuscrit.

Ce chapitre a pour but de présenter :

- le contexte aéronautique en précisant les différents matériels concernés et les contraintes qu'ils subissent (aussi bien environnementales que fonctionnelles) ;
- l'effet de ces contraintes sur le polyimide et le PTFE ;
- et enfin les phénomènes de décharges partielles ainsi que les différentes techniques mises en œuvre pour les détecter et les analyser.

Cette synthèse bibliographique a également pour but d'identifier les phénomènes qui ont été peu étudiés, tel que l'effet du champ électrique sur le vieillissement du téflon par exemple.

I.2 Matériels et matériaux concernés par l'étude

I.2.1 Tensions

D'une part, les systèmes existants seront impactés par l'augmentation de la tension électrique dans les avions. D'autre part, de nouveaux systèmes nécessitent une augmentation de tension.

- Les systèmes de dégivrage requièrent 330 V DC intermittent voire 400 V DC ;
- L'hybridation des moteurs (association des moteurs électriques avec moteurs thermiques existants) nécessite 540 V DC ou +/-270 V DC ;

I.2.2 Matériel (câbles)

Le câble étudié dans le cadre de ce travail est un câble unipolaire, avec une âme au potentiel, recouverte d'un ou plusieurs isolants, sans blindage externe. Il s'agit d'un câble de type DR (Figure I-1) dont le système d'isolation est hybride Polyimide (PI)/Polytétrafluoroéthylène (PTFE), avec une âme en cuivre (ou cuivre plaqué nickel). D'après [1] et [2], ils sont utilisés dans les systèmes électriques sous une tension de 115 V dans une gamme de températures d'utilisation comprise entre -55°C et +260°C.

Le Tableau I-1 présente le câble concerné par l'étude et ses spécificités.

Tableau I-1 : Câble concerné par l'étude et leurs spécificités

Dénomination	Isolation	Ame	Tension spécifiée (norme)	Gamme de température (norme)
DR	PI/PTFE*	Cuivre (ou cuivre plaqué nickel)	115 V AC	-55°C à 260°C

*Données fournisseur

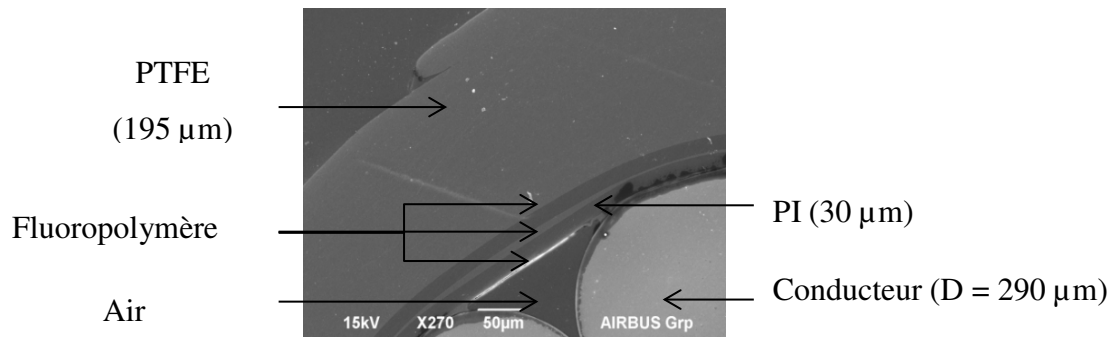


Figure I-1 : Structure du câble DR

I.2.3 Matériaux d'isolation concernés

Les différents matériaux qui constituent le câble DR (Figure I-1) sont le polytétrafluoroéthylène (PTFE), le polyimide (PI) et un fluoropolymère nommé copolymère d'éthylène-propylène fluoré (FEP).

I.2.3.1 Formulation

Le PTFE est un polymère fluoré thermoplastique linéaire. La formule du PTFE est présentée en Figure I-2.

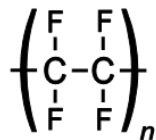


Figure I-2 : PTFE [3]

Il existe différents types de PI. La Figure I-3 donne les formules générales d'un PI avec ou sans noyau aromatique.

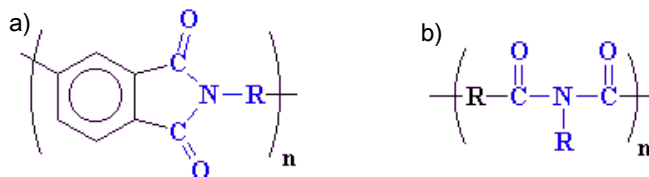


Figure I-3 : PI a) avec un noyau aromatique et b) sans noyau aromatique [4]

Le FEP est représenté à la Figure I-4.

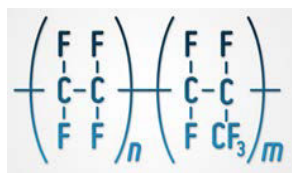


Figure I-4 : FEP [5]

I.2.3.2 Propriétés physico-chimiques

Les matériaux polymères PI, PTFE et FEP sont des matériaux qui possèdent des propriétés compatibles avec l'aéronautique pour servir d'isolants, puisqu'ils présentent une faible constante diélectrique, de faibles pertes diélectriques, une rigidité diélectrique correcte, et une bonne conductivité thermique pour un isolant. Ainsi, ces matériaux ont des températures d'utilisation correspondant à la gamme de température requise pour les systèmes aéronautiques. Ces différentes propriétés sont regroupées dans le Tableau I-2.

De plus, le PI présentant un très faible taux de dégazage, il a donc une très bonne stabilité sous basse pression. Le PTFE et le FEP résistent très bien à tous les réactifs organiques et minéraux [6], et les PI résistent très bien aux fluides industriels (huile, essence). Enfin, ces trois polymères ont une très bonne tenue aux radiations ionisantes [7].

Par ailleurs, il faut noter que la couche extérieure est en PTFE car ce polymère permet la protection des UV et fait office de barrière à l'humidité.

Le FEP est une couche permettant l'adhésion entre le PTFE et le PI, ainsi que le PI et les torons du câble.

Tableau I-2 : Propriétés des 3 matériaux utilisés dans les câbles [6]–[8]

Propriétés	PTFE	PI (Kapton®)	FEP
Constante diélectrique à 50 Hz, 23°C	2,1	3,6	2,1
Tanδ à 10 ³ Hz, 23°C	2.10 ⁻⁴	3.10 ⁻³	2.10 ⁻⁴
Coefficient de dilatation thermique (K ⁻¹)	13.10 ⁻⁵	2.10 ⁻⁵	5.10 ⁻⁵
Conductivité thermique (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	0,25	0,12	0,25
Résistivité volumique (Ω.m), 23°C	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁵
Rigidité diélectrique (kV/mm)	36	303	36
Température limite d'utilisation en continu (°C)	-150 à +250	NA à + 220 (Tmin ponctuelle = - 269°C)	-150 à +200
Résistance à l'arc (s)	200	NA	200
Absorption d'eau (%) Immersion 24h, 23°C	<0,04	2	<0,01

I.3 Contraintes Environnementales et d'utilisation de l'hélicoptère

I.3.1 Contraintes Environnementales

I.3.1.1 Introduction

Les câbles de type DR sont notamment mis en œuvre dans les hélicoptères. C'est la raison pour laquelle les contraintes environnementales ici retenues seront principalement relatives à l'exploitation de ce type d'aéronef. Le fonctionnement des systèmes électriques embarqués dans les hélicoptères est soumis à de nombreuses variations des paramètres environnementaux liés notamment aux changements d'altitude et de conditions extérieures.

Le document SPX902A0002E01 [9], qui est extrait de la norme [10] citant toutes les conditions environnementales pour tous les équipements aéronautiques, donne les différentes conditions environnementales auxquelles sont soumises des équipements de l'hélicoptère.

Nous avons extrait les conditions environnementales qui semblent être les plus pertinentes pour cette étude.

1.3.1.2 Altitude

Comme l'hélicoptère peut voler jusqu'à 6000 m d'altitude, il peut subir des pressions allant de 1013,25 hPa à 471 hPa (Figure I-5 a). La température normalisée de la troposphère est comprise entre 15°C au sol et -55°C à 11000 m d'altitude. A 6000 m, la température normalisée de l'air est de -24°C (Figure I-5 b).

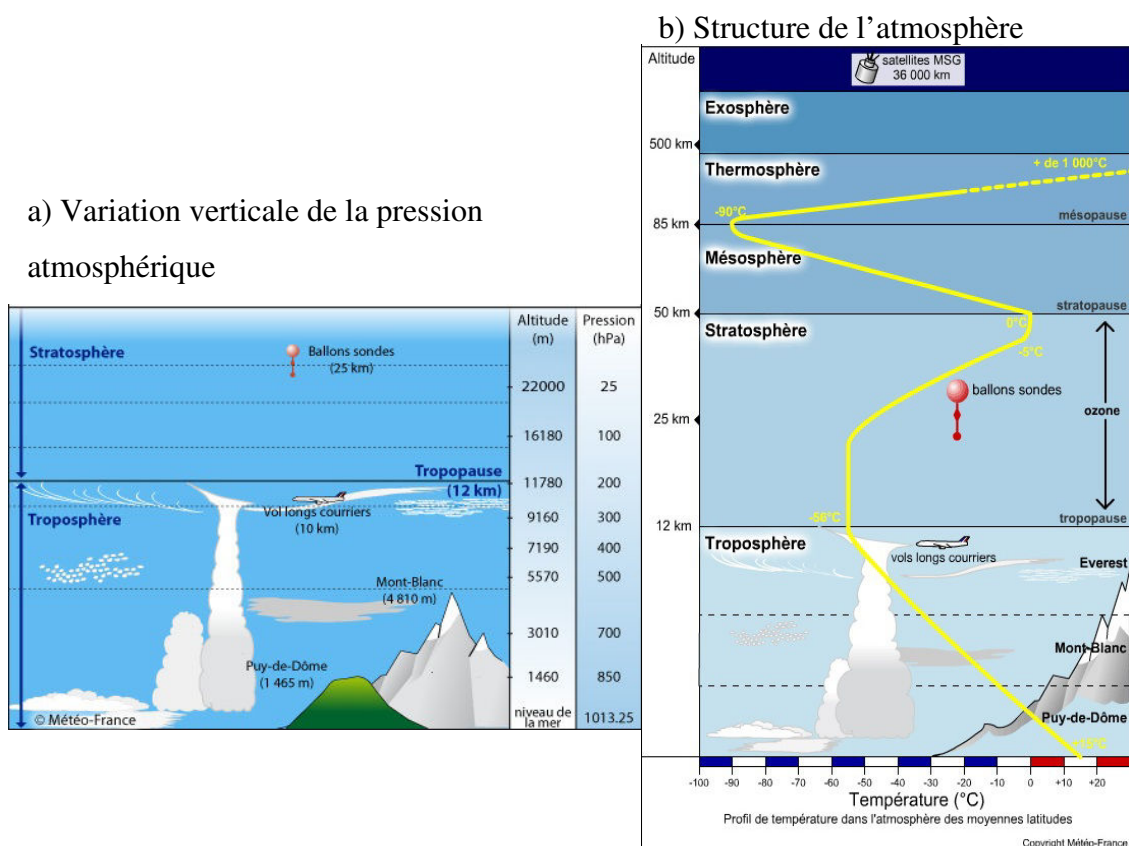


Figure I-5 : a) Pression et b) Température en fonction de l'altitude [11]

1.3.1.3 Autres contraintes environnementales

L'humidité relative de l'environnement de l'hélicoptère peut être présente dans l'habitacle, donc au contact des matériels et isolants en particulier. Il existe un certain nombre de normes ([9], [10], [12]) pour évaluer l'impact des variations d'humidité (condensation) sur les matériels.

Enfin, ceux-ci peuvent aussi être exposés aux rayonnements UV.

I.3.2 Contraintes d'utilisation

I.3.2.1 Température

Compte-tenu des températures des zones d'évolution des hélicoptères et des échauffements des câbles, la gamme de température spécifiée est de -55°C à +260°C. Par ailleurs, les normes n'imposent pas de test de cyclages thermiques mais plutôt des transitoires de température.

I.3.2.2 Contaminations

Des contaminants, tels que des huiles (Jet A Fuel), des nettoyeurs ou d'autres produits organiques, du sable et de la poussière, ou même de l'eau salée, peuvent se trouver en contact des systèmes étudiés [9].

I.3.2.3 Contraintes mécaniques

Les matériels peuvent également subir des contraintes mécaniques occasionnelles (compression, frottements) provoqués par les utilisateurs.

De plus, les équipements embarqués dans les hélicoptères subissent des vibrations ; leur fréquence dépend de la vitesse de rotation et du type d'hélices ainsi que des zones dans lesquelles se trouvent les différents matériels. D'après des communications avec Airbus Helicopters, les connecteurs subissent davantage les vibrations car ils sont en liaison directe avec la carcasse, alors que les câbles sont maintenus par des harnais qui transmettent moins les vibrations.

I.4 Polytetrafluoroéthylène (PTFE)

I.4.1 Influence des paramètres de température, d'humidité et de contraintes multiples sur les propriétés du PTFE

I.4.1.1 Température

I.4.1.1.1 Aspects structuraux

Le PTFE comporte des chaînes macromoléculaires entièrement couvertes par des atomes de fluor (Figure I-6). Cette couche de protection rend le PTFE plus stable thermiquement que les autres polymères fluorés de la même famille. Le PTFE est constitué de deux types de liaisons chimiques : la

liaison C-C, dont l'énergie de liaison est 348 kJ/mol et la liaison C-F avec une énergie égale à 507 kJ/mol (Conesa J.A, 2001). La liaison C-C est donc énergétiquement plus sensible à la dégradation.

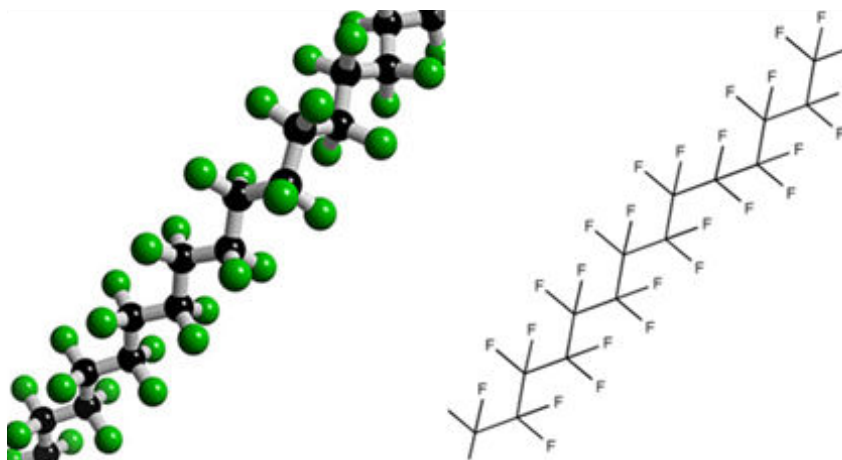


Figure I-6 : Représentation du PTFE [13]

Le comportement thermique du PTFE sous une atmosphère inerte ou oxydante est différent [14]. Dans le cas de la décomposition thermique sous atmosphère inerte (N_2 , He, etc.), le PTFE se décompose par effet thermique : l'élévation de température fournit suffisamment d'énergie pour casser les liaisons chimiques. Les liaisons C-C énergétiquement plus faibles que les liaisons C-F, se cassent donc dans un premier temps. Les liaisons C-C en extrémité des chaînes moléculaires principales se rompent plus facilement pour former un composé $CF_2=CF_2$ stable.

I.4.1.1.2 *Thermolyse*

Les réactions de dépolymérisation de premier ordre sont principalement des mécanismes de dégradation thermique. Il est reporté dans la thèse de Huang [15] les premiers résultats sur la décomposition thermique du PTFE en 1947. Le PTFE a été chauffé à 600 °C à différentes pressions (6×10^2 et 1×10^5 Pa) et à 700 °C à 5×10^3 Pa [16]. Il a été montré que les produits principaux de la pyrolyse du PTFE sont des monomères TFE (tetrafluoroéthylène). Plus la pression diminue et plus la quantité de monomères TFE est grande. D'autres produits, tels que le HFP (hexafluoropropène) et le c- C_4F_8 (cyclo-perfluorobutane), sont formés par des réactions secondaires dépendant de la température, de la pression et de l'atmosphère.

L'analyse par spectroscopie de masse montre que la dégradation de ce polymère commence à environ 440 °C [17]. Ainsi, l'utilisation du PTFE à des températures supérieures à 400 °C est déconseillée.

I.4.1.1.3 *Thermo-oxydation*

La décomposition du PTFE sous atmosphère oxydante (air) est plus complexe en raison de la participation de l'oxygène dans les réactions de dégradation. L'analyse thermique gravimétrique dynamique du PTFE sous différentes atmosphères (Figure II-16) montre que la perte de masse du PTFE s'effectue en une seule étape. A la fin de la décomposition il perd entièrement sa masse. La perte de masse et la vitesse de décomposition sont plus importantes sous air que sous azote. Une augmentation de la rampe en température (de 5 à 25 °C/min) provoque une diminution de la vitesse de décomposition ; celle-ci peut être reliée avec la vitesse de transfert de chaleur de l'atmosphère à l'échantillon testé.

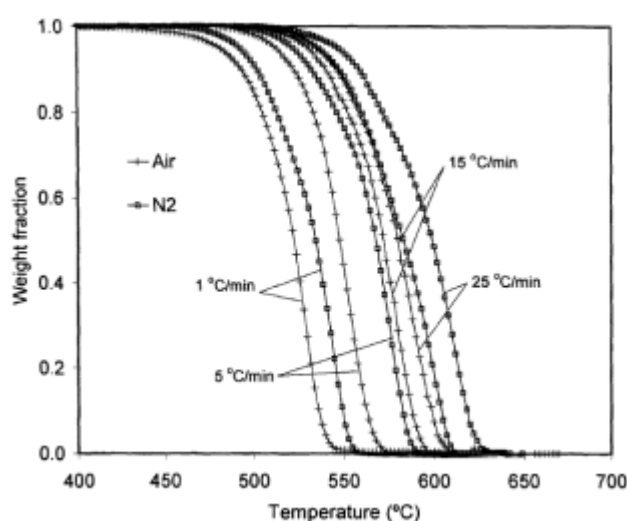


Figure I-7 : Courbe ATG du PTFE à différentes atmosphères et avec différentes rampes [14]

Il y a six fois plus de fluorure de carbonyle CF_2O formé sous air que sous azote. On peut considérer que la décomposition du PTFE sous air est constituée des réactions de dépolymérisation et d'oxydation : les radicaux issus de scissions des chaînes par l'effet thermique réagissent avec l'oxygène dans l'air pour former des radicaux peroxydes. Ensuite, ces radicaux peroxydes réagissent en formant des groupements $-\text{CFO}$ aux extrémités des chaînes moléculaires du PTFE dégradé. En présence de molécules d'eau au sein du polymère, les groupements $-\text{CFO}$ peuvent également se transformer en acide carboxylique $-\text{COOH}$ par des réactions d'hydrolyse. Ces changements de structure chimique au cours du vieillissement thermo-oxydatif peuvent être détectés par la technique FTIR.

I.4.1.1.4 *Propriétés diélectriques*

Les propriétés diélectriques du PTFE peuvent évoluer sous l'effet de la température.

L'équipe de Hammoud [18] reporte des valeurs de permittivité et de facteur de perte en fonction de la température dans le Tableau I-3, ces mesures ont été réalisées avec un champ de 140 V/mil, soit 5,5 MV/m. On peut voir que la constante diélectrique augmente légèrement en fonction de la température, alors que le facteur de perte augmente plus significativement. Pour interpréter ces résultats, on peut invoquer les processus de relaxation accélérés par la température, tendant donc à augmenter la permittivité du matériau. A une fréquence de 60 Hz, cette relaxation (orientation de dipôles par exemple) est perceptible et est traduite par une augmentation des pertes ($\tan\delta$).

Tableau I-3: Propriétés diélectriques du téflon en fonction de la température à 60 Hz

Température	20 °C	100 °C	200 °C
ϵ_r	1,84	1,94	1,95
$\tan\delta$	0,0002	0,0006	0,0029

1.4.1.2 Humidité

Les molécules d'eau absorbées dans les matériaux facilitent les phénomènes de diffusion mais fournissent également des porteurs de charges supplémentaires issus de la dissociation des molécules d'eau : $2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_3\text{O}^+ + \text{HO}^-$. Ainsi, l'absorption d'eau augmente la conductivité en masse, ainsi que les pertes diélectriques. Ainsi, Jian et Zhongfu [19] ont montré, par des mesures de potentiel sur une surface libre de PTFE après dépôt de charges par décharge couronne, que lorsque l'humidité augmente, la profondeur moyenne de charge d'espace se déplace vers l'électrode arrière sur près de 36% de l'épaisseur du matériau. Cette observation a été attribuée à une absorption d'eau plus élevée sous forte humidité.

La permittivité de l'eau étant très élevée ($\epsilon_r = 78,5$), celle du matériau ayant absorbé de l'eau augmente (par rapport au même matériau sec).

1.4.1.3 Contraintes multiples

Le PTFE est utilisé comme une couche externe protectrice contre l'humidité dans les câbles étudiés. C'est pourquoi l'étude de l'hydrophobicité de ce matériau sous plusieurs contraintes est une propriété importante. Des tests de perte d'hydrophobicité ont été réalisés par Syed et al. en mesurant l'angle de contact d'une goutte d'eau distillée sur la surface du PTFE [20]. Il est conclu que l'augmentation de la salinité d'une solution dans laquelle est immergé un câble et celle

combinée de la température induisent une diminution de l'angle de contact, traduisant une perte partielle de l'hydrophobicité du PTFE. Ce résultat est interprété par une oxydation de surface.

De plus, les mêmes auteurs montrent qu'après exposition (500 heures) du matériau à un champ électrique continu élevé (12,5 kV/mm), une faible diminution de l'angle de contact est constatée (de $108 \pm 5^\circ$ sous 0 kV/mm à $104 \pm 5^\circ$ sous 12,5 kV/mm). Cet effet est dû à un faible courant circulant sur la surface du PTFE.

I.4.2 Evolution des propriétés sous vieillissement

I.4.2.1 Effet du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques

Li et al. [21] ont mesuré l'évolution de la constante diélectrique d'échantillons de PTFE après une exposition à 360°C. La Figure I-8 présente la partie réelle de la permittivité en fonction du temps d'exposition de ces échantillons (mesures réalisées à 1,15 kHz). On observe une légère diminution de la permittivité : moins de 3 % en 50 h.

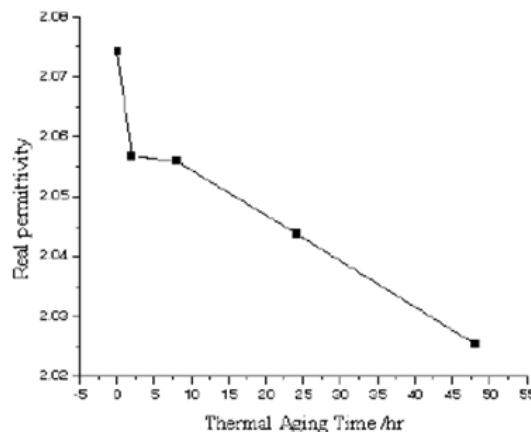


Figure I-8 : Partie réelle de la permittivité du PTFE à TA et 1153,6 Hz en fonction du temps de vieillissement à 360°C [21]

I.4.2.2 Effets du rayonnement UV

Le PTFE résiste très bien aux radiations ionisantes puisque d'après Mergos [22], il ne subit aucun changement visuel après vieillissement (dont 1 cycle de 12h correspond à 8 h à 50°C avec une exposition aux UV-B puis 4h à 50°C) mais aussi aucune modification de ses propriétés diélectriques. Sur la Figure I-9 on peut voir que la constante diélectrique ne subit aucune modification au cours de 72 h de vieillissement (c'est-à-dire 6 cycles).

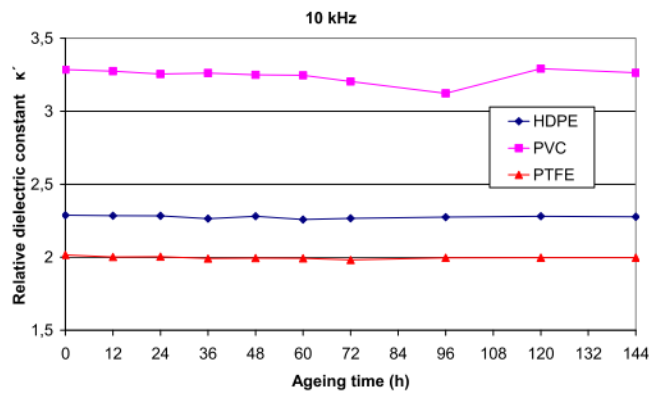


Figure I-9 : Différence de permittivité avant et après vieillissement pour PTFE, PVC et HDPE [22]

I.4.2.3 Effets de contraintes multiples

La conductivité électrique d'un matériau, ou sa résistivité volumique électrique, permet de déterminer la répartition du champ dans ce matériau sous tension continue. La résistance volumique électrique a été étudiée en fonction d'une contrainte électrothermique par Chen *et al.* [23]. Une contrainte modérée de 4 kV/mm sous trois températures différentes comprises entre 90°C et 130°C a été appliquée sur un échantillon de PTFE pendant une longue durée. Il a été observé que la résistance électrique volumique variait peu pendant les 300 jours de conditionnement (Figure I-10). Aux niveaux appliqués dans cette étude, le champ électrique, ainsi que la température, n'ont pas d'influence sur la conductivité du matériau.

Dans le cas de notre étude, le champ appliqué est d'environ 4,3 kV/mm (1000 VDC sont appliquées sur 230 μm d'épaisseur).

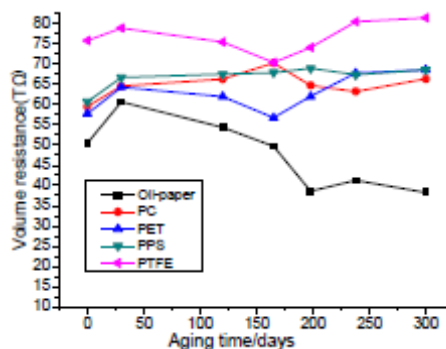


Figure I-10 : Résistance volumique en fonction du temps de vieillissement de 5 polymères à 130°C [23]

Les mêmes auteurs [23] ont également mesuré les tensions d'apparition des décharges partielles (PDIV) du PTFE dans les mêmes conditions de vieillissement sous contrainte

thermoélectrique. La même conclusion peut être faite : la PDIV évolue très peu avec le degré de vieillissement (Figure I-11) dans ces conditions.

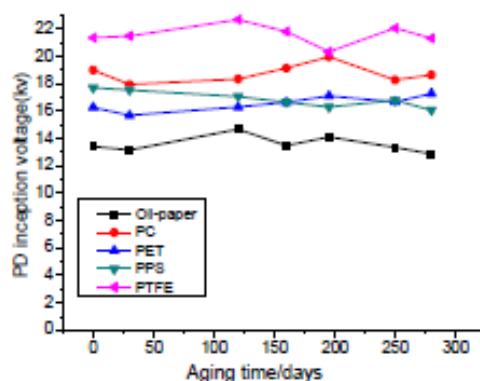


Figure I-11 : Evolution de la PDIV mesurée à TA en fonction du temps de vieillissement à 130°C [23].

I.5 Polyimide (PI)

Les PI correspondent à une famille de matériaux présentant un large éventail de formulations. Les températures de transition vitreuse peuvent ainsi s'échelonner de 200 à plus de 300°C. Le PI est issu de deux monomères A et B, qui peuvent prendre un certain nombre de formulations.

Des exemples de formulations du PI sont donnés en Figure I-3 et Figure I-12.

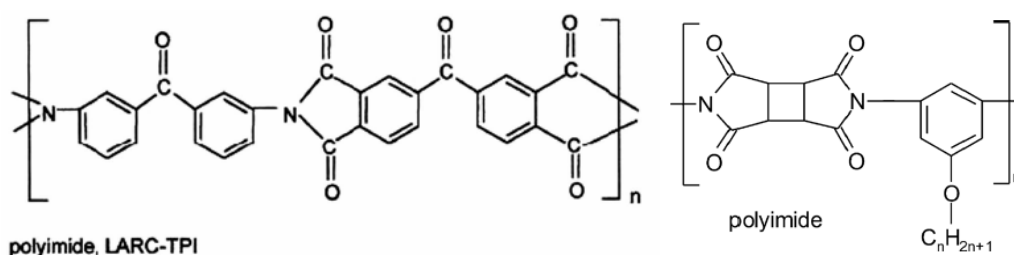


Figure I-12 : Exemples de PI [24], [25]

I.5.1 Influence des paramètres température et humidité sur les propriétés des PI

I.5.1.1 Température

I.5.1.1.1 Dégradation sous l'effet de la température

Afin d'étudier la stabilité thermique du PI, la technique d'analyse thermogravimétrique (ATG) a été utilisée sur plusieurs types de PI par Huang [15] et Turk et al. [26]. Il a été observé

qu'il n'y a aucune perte de masse jusqu'à 450°C ni de transition thermique (Figure I-13). A partir de 460 °C sous air et 480 °C sous azote, la décomposition des échantillons commence. La décomposition thermique diffère selon les types de PI. Pour la décomposition sous air, la mesure couplée en DSC montre un pic exothermique vers 500 °C, ensuite plusieurs pics exothermiques plus intenses entre 570 et 650 °C. Ceci indique que la décomposition thermo-oxydative du PI est constituée de plusieurs types de réaction. La décomposition sous azote est plus simple : il est observé un seul pic endothermique très large vers 580 °C; ce qui confirme que le mécanisme de décomposition sous atmosphère inerte (sous azote) est différent de celui sous atmosphère oxydante (air).

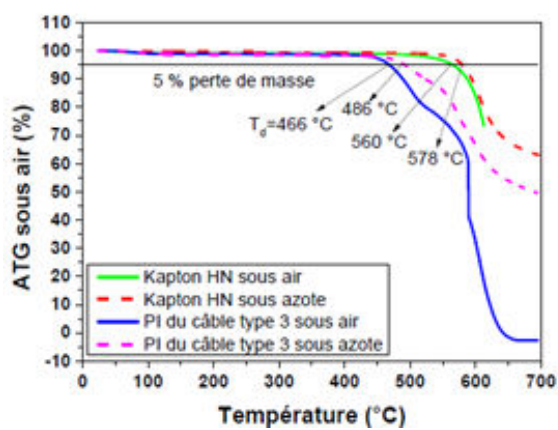


Figure I-13 : ATG de plusieurs PI à 10°C/min sous air et sous azote [15]

Que ce soit par dégradation thermo-oxydative ou par pyrolyse, le mécanisme de dégradation débute par un clivage homolytique des chaînes principales du PI (liaison A-B) ; l'oxygène intervient seulement dans une seconde étape intermédiaire d'oxydation des produits de décomposition. Comme indiqué plus haut, la vitesse de formation de ces produits est plus rapide en présence d'oxygène [17]. L'énergie d'activation de la dégradation du PI sous air est comprise entre 130 et 137 kJ/mol alors que celle sous vide est de 310 kJ/mol. En fin de dégradation thermo-oxydative du PI, des réactions d'hydrolyse et de condensation peuvent intervenir [15].

I.5.1.1.2 Propriétés diélectriques

Hammoud *et al.* [18] ont mesuré la permittivité et le facteur de perte en fonction de la température pour le Kapton (Tableau I-4). Aux basses fréquences, on constate une légère hausse de la constante diélectrique ainsi que du facteur de perte quand la température augmente. Comme pour le PTFE, les processus de relaxation (orientation de dipôles par exemple) sont accélérés par la température et perceptibles aux basses fréquences.

Tableau I-4: Propriété diélectrique du Kapton à 60 Hz

Température	20 °C	100 °C	200 °C
Permittivité	3,23	3,26	3,28
Facteur de perte	0,0100	0,0222	0,0310

Ces données peuvent être comparées à celles obtenues par Zelmat [27] pour un autre PI à différentes températures (Figure I-14). La même tendance est observée : la permittivité augmente avec la température, ainsi que le facteur de perte surtout dans les basses fréquences.

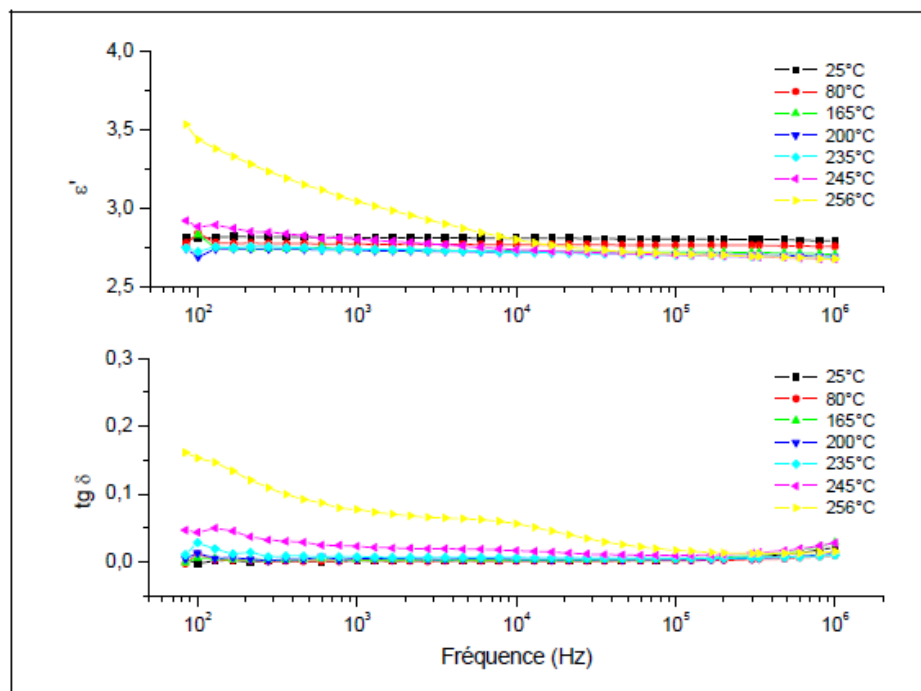


Figure I-14 : Permittivité relative et facteur de pertes en fonction de la fréquence à différentes températures [27]

La conductivité électrique du polyimide a aussi été étudiée par Chisca *et al.* en fonction de la fréquence et de la température sous tension alternative [28]. Il est possible d'observer que la conductivité dépend de la température : plus la température augmente et plus la conductivité augmente (Figure I-14). Ces trois grandeurs que sont la permittivité, les pertes et la conductivité, et qui permettent de qualifier les propriétés isolantes d'un matériau, évoluent donc toutes trois vers la hausse avec l'augmentation de température. Cette tendance, reposant sur des mécanismes lents, est clairement perceptible aux basses fréquences.

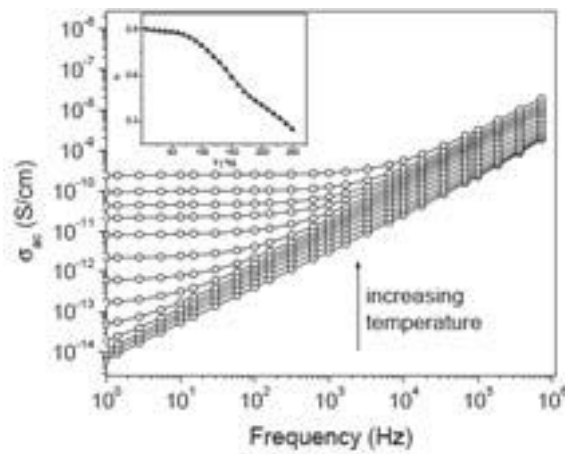


Figure I-15 : Conductivité en AC en fonction de la fréquence pour PI entre 0 et 240°C avec un intervalle de 20°C [28]

La tension de claquage a aussi été étudiée en fonction de la température par Hammoud *et al.* [18]. Le Tableau I-5 donne les valeurs sous tensions continue ou alternative. La rigidité diélectrique du PI diminue donc avec la température. On observe de plus que les valeurs de tension de claquage sont supérieures sous tension continue.

Tableau I-5 : Tension de claquage du kapton (127 µm d'épaisseur) en fonction de la température et du type de courant

Température	20 °C	125 °C	250 °C
Tension de claquage (en kVeff) en AC	7,73	7,37	5,23
Tension de claquage (en kV) en DC	15,37	15,41	9,53

I.5.1.2 Humidité

De même que pour le PTFE, d'après les résultats trouvés par Jian et Zhongfu [19], lorsque l'humidité est augmentée, le potentiel de surface chute. Les auteurs ont mesuré un déplacement de la profondeur moyenne de charge vers l'électrode arrière à près de 44% de l'épaisseur de la surface libre du PI; ceci est attribué à une absorption d'eau plus élevée à plus forte humidité.

La conductivité en fonction de l'humidité a été mesurée par Sacher sur deux films de Kapton d'épaisseurs différentes [29] secs et à 75 % d'humidité relative (HR) qui met en évidence une augmentation de la conductivité avec l'humidité (Figure I-16).

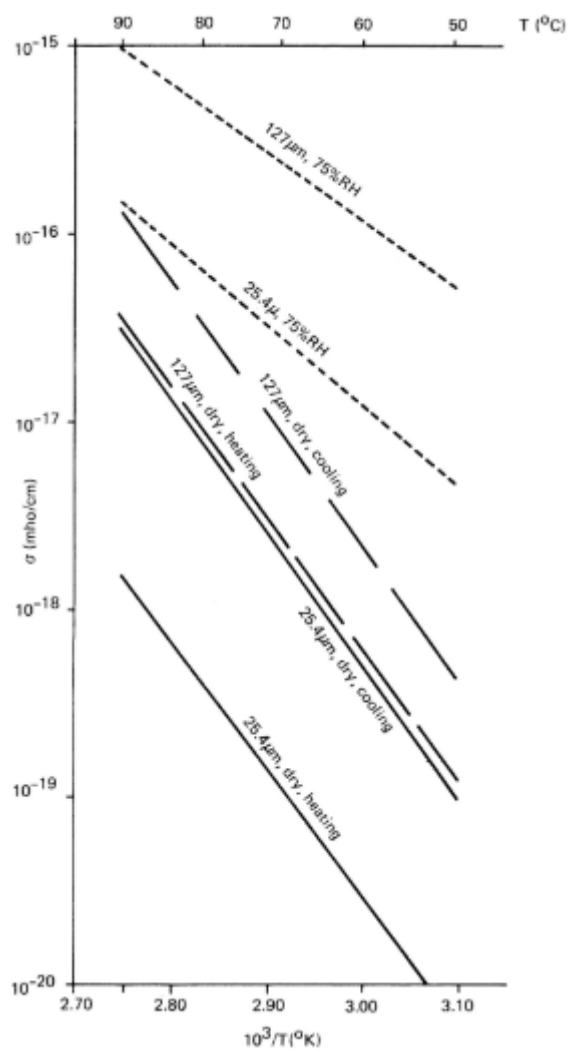


Figure I-16 : Conductivité en fonction de la température du Kapton d'épaisseur 25,4 μm et 127 μm [29]

L'effet de l'eau et de l'eau salée a aussi été étudié sur le Kapton concernant la permittivité et les pertes. Comme illustré par la Figure I-17, plus l'absorption d'eau est importante, c'est-à-dire, plus le temps d'immersion est grand, plus la permittivité augmente et plus les pertes augmentent. L'ajout de sel n'affecte pas les propriétés diélectriques du matériau.

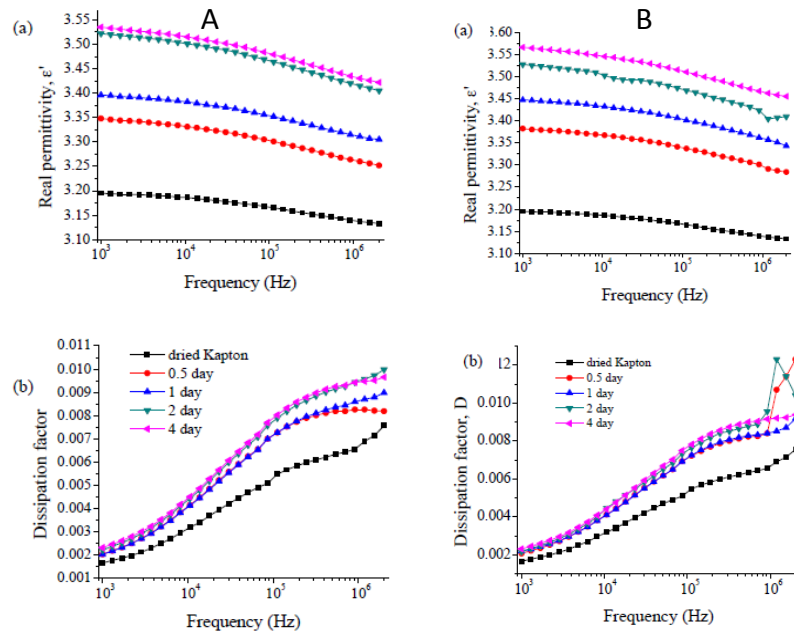


Figure I-17 : A : Effet d'une immersion dans l'eau distillée sur a) la permittivité réelle et b) le facteur de perte

B : Effet d'une immersion dans l'eau salée à 80 g/L sur a) la permittivité réelle et b) le facteur de perte [30]

I.5.2 Evolution des propriétés sous vieillissement

I.5.2.1 Effet du vieillissement thermique sur les propriétés diélectriques

L'évolution de la conductivité électrique du matériau donne des informations concernant la répartition du champ électrique en fonction de ce vieillissement. Elle a été étudiée sur le PI par Khazaka *et al.* sous tension continue, sous atmosphère d'azote et d'air [31]. La courbe est présentée à la Figure I-18. La conductivité sous air est fortement et relativement rapidement altérée au cours du vieillissement, ce qui est dû à une dégradation du PI plus importante que sous azote.

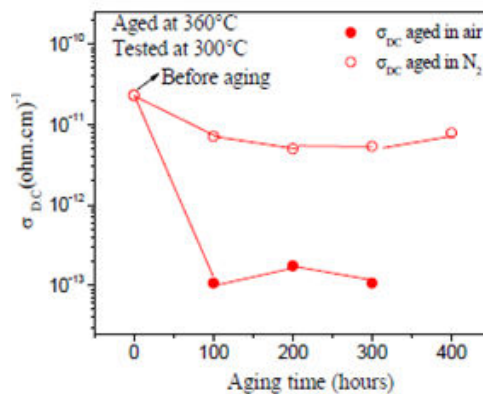


Figure I-18 : Conductivité électrique d'un PI de 4,2 μm d'épaisseur sous air et azote à 300°C [31]

Li *et al.* ont étudié l'effet d'une dégradation thermique sur les propriétés diélectriques d'un film de PI (Kapton NH®) [30]. D'après la Figure I-19, il est observé que la constante diélectrique et les facteurs de perte du PI augmentent avec la température et le temps d'exposition. Ceci est dû à des coupures de chaînes et à la formation de groupes polaires lors du processus de chauffage, dont la présence a été confirmée par des analyses ATG et FTIR.

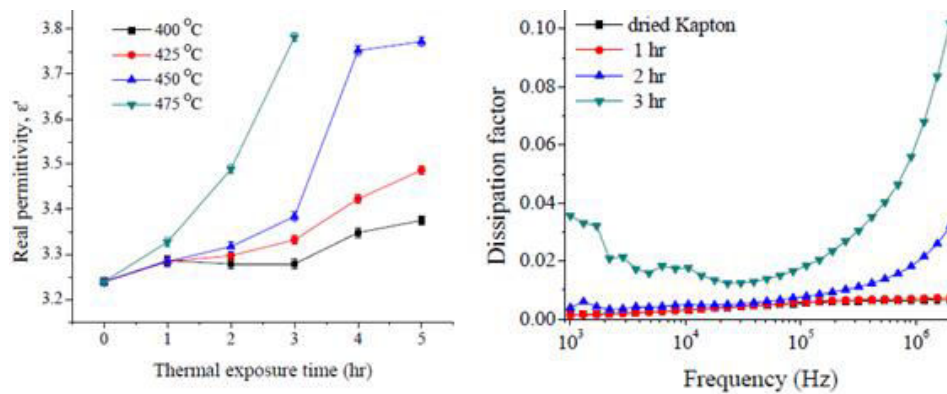


Figure I-19 : à gauche, permittivité du PI en fonction du temps d'exposition et de la température, et à droite, facteur de perte en fonction de la fréquence et du temps d'exposition à 475°C [30]

I.5.2.2 Effet du champ électrique

I.5.2.2.1 Charges d'espace

Dans un isolant solide, l'accumulation d'une charge nette positive ou négative dans certaines régions de son volume est qualifiée de charge d'espace (CE). Cette dernière peut être issue de l'orientation hétérogène de dipôles, de la présence d'impuretés ioniques, de la dissociation d'espèces neutres, ou encore de phénomènes d'injection de charge aux électrodes. Ces charges d'espace ont été étudiées par Fukunaga et Maeno dans plusieurs films de PI [32]. Deux films à base de monomère PMDA (dianhydride pyromellitique) et deux autres à base de monomère BPDA (acide dianhydride biphenyl-tetracarboxylique) sont utilisés pour étudier les CE à l'aide de la méthode PEA (Pulse Electro-Acoustic method) et avec des champs électriques en DC allant de 0 à 100 kV/mm avec des échelons de 10 kV/mm. Dans les 4 PI examinés, des charges s'accumulent de plus en plus dans les matériaux durant l'application du champ ; cependant, seuls les PI à base de PMDA présentent une charge résiduelle après le court-circuit des électrodes. L'étude des CE a été poursuivie en étudiant l'influence de l'humidité. Et puisque des hétérocharges sont observées en plus ou moins grande quantité suivant le PI, il a été conclu que l'eau absorbée modifiait la mobilité des charges dans le matériau sous champs électrique.

L'étude des CE après l'immersion pendant 48 h d'un film de PI (Kapton H®) dans l'eau distillée a été réalisée par Fujita et Kamei, en utilisant la méthode PEA. Ils en ont conclu que plus l'absorption d'eau était importante, plus l'injection de charges dans le matériau est élevée [33].

I.5.2.3 Effet de contraintes multiples

Khazaka *et al* [34] ont étudié le vieillissement thermique à 300°C sur des films de PI (BPDA-PDA : acide dianhydride biphényl-tetracarboxylique- diamine p-phénylène), de différentes épaisseurs, déposés sur deux substrats différents (silicone et acier inoxydable) sous deux atmosphères différentes (air et azote).

Après quelques milliers d'heures de vieillissement (Figure I-20), la tension de rupture du PI sur substrat silicone sous air (C2) et du PI sur substrat d'acier inoxydable sous azote (C3) diminue légèrement. Alors que cette tension diminue très fortement pour le film de PI sur acier inoxydable vieilli sous air (C1), avec une dégradation complète du film à 1200h.

De plus, la formation de cratère est observée pour le film de PI vieilli sous air sur un substrat d'acier inoxydable. Ces différentes observations peuvent être interprétées par le fait qu'il y ait un stress thermomécanique dû à une différence de CTE entre l'acier et le PI. En effet, la couche oxydée du PI va se rompre, ce qui va permettre la diffusion de l'oxygène dans la couche de PI et accélérer le taux de dégradation.

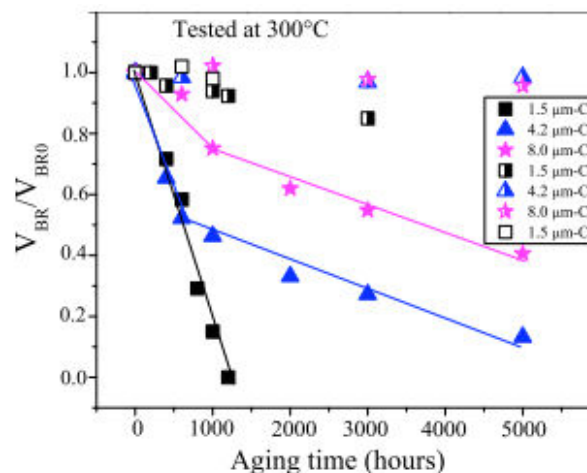


Figure I-20 : Variation de la tension de rupture normalisée pour les films de PI pour plusieurs épaisseurs sous les différentes conditions en fonction du temps de vieillissement. C1 : sous air sur un substrat d'acier inoxydable – C2 : sous air sur un substrat silicone et C3 : sous azote sur un substrat d'acier inoxydable [34]

La Figure I-21 représente les spectres FTIR des films PI vieilli sur substrat Silicone sous air (Figure I-21 a), sur substrat acier inoxydable sous air (C1) et sous azote (C3) (Figure I-21 b). La

bande à 1521 cm^{-1} correspond au cycle phényle du PDA. Après l'essai de vieillissement, il n'y a pas de modification de la fréquence d'absorption pour aucun des échantillons. Ceci indique qu'il n'y a pas de cristallisation durant le vieillissement. Les bandes C=O localisées à 1733 cm^{-1} et 1706 cm^{-1} sont plus intenses après vieillissement sous air (C1 et C2). Ainsi, une oxydation à la surface apparaît. De plus tous les autres pics restent identiques après vieillissement, indiquant une stabilisation de la structure chimique.

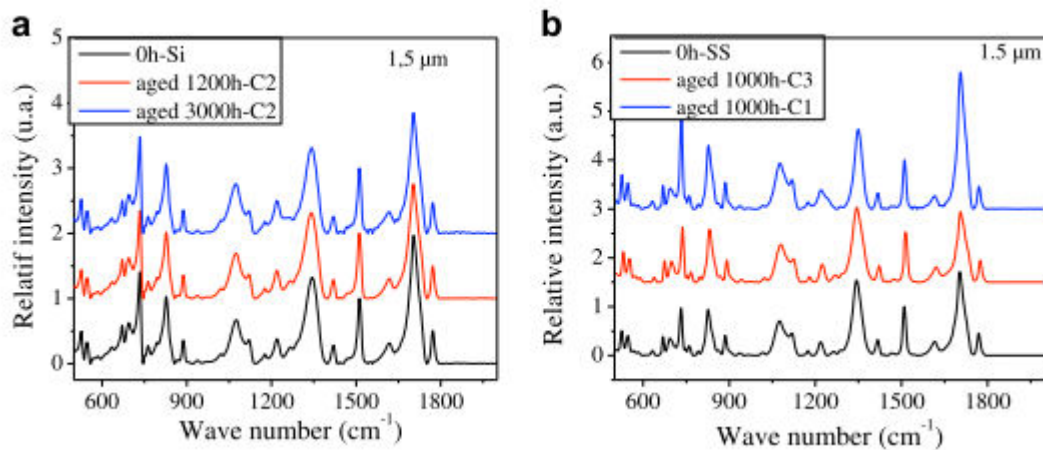


Figure I-21 : Spectres FTIR du film PI avant et après vieillissement, a) sous air sur silicone et b) sur acier inoxydable sous air (C1) et sous azote (C2) [34]

I.6 Décharges partielles (DP)

I.6.1 Définition

Les décharges partielles [35] sont des décharges électriques localisées, résultant d'une ionisation partielle du gaz compris entre au moins deux conducteurs imposant à l'intervalle les séparant un champ électrique, sans toutefois conduire à un court-circuit entre ces conducteurs. Ces décharges sont caractérisées par une tension élevée et un courant moyen d'intensité faible. Le comportement non-disruptif des décharges partielles peut résulter des conditions de pression du gaz, de la géométrie des conducteurs, ou encore de la présence d'un isolant solide entre ces conducteurs. Dans les systèmes d'énergie électrique en exploitation, ces décharges sont dues en particulier à des imperfections (cavité, décollement, contaminants ...) des diélectriques solides, liquides ou gazeux et apparaissent dès qu'une tension suffisante est appliquée. Généralement de telles décharges apparaissent sous la forme d'impulsions ayant des durées très inférieures à $1\text{ }\mu\text{s}$.

Des systèmes d'isolations électriques (SIE) initialement conformes à l'utilisation prévue peuvent avec le temps présenter des défauts dus à des vieillissements homogènes de l'isolant résultant de différents facteurs d'influence :

- facteurs d'environnement (température, humidité, type de gaz, corrosion...)
- facteurs électriques (profil de tension, fréquence, courant, ...)
- facteurs mécaniques (torsion, flexion, vibrations...)

Mais il existe aussi des vieillissements prématurés du SIE dus à des défauts tels que des aspérités de conducteur, la présence de contaminants ou de cavités dans l'isolant. Ces imperfections sont des défauts ponctuels présents lors de la fabrication de ces systèmes, mais au cours du temps, et donc du fonctionnement, ces imperfections peuvent se développer et à terme amener à la rupture de l'isolant.

Toutes ces imperfections peuvent être des sites favorables pour l'apparition de décharges partielles. Par exemple, dans le cas d'une cavité, l'air qui y règne atteint sa limite de tenue diélectrique et perd ses propriétés isolantes à un champ beaucoup plus faible que le solide environnant. Ceci s'explique tout d'abord par le fait que l'air présente une rigidité diélectrique plus faible que celle des isolants solides. De plus, le champ électrique est renforcé aux niveaux des cavités gazeuses dans l'isolant, car la permittivité des isolants solides est toujours plus élevée que celle du vide (ou gaz), et donc le champ électrique dans la cavité sera proportionnellement plus élevé (voir I.6.3.4). Les décharges partielles ainsi produites peuvent alors conduire à une dégradation progressive du matériau et à terme à un claquage de l'isolant.

I.6.2 Classification des décharges partielles

Kreuger [36] a proposé une classification des types de décharges en 4 groupes selon leur localisation [37] :

- a) **Les décharges internes** : elles apparaissent à l'intérieur du matériau isolant, dans des volumes où la rigidité diélectrique est faible, par exemple une cavité dans un solide, ou une bulle dans un liquide.
- b) **Les décharges rampantes (ou de surface)** : elles se manifestent lorsqu'un champ électrique tangentiel intense existe à la surface d'un diélectrique.
- c) **Les décharges couronnes** : elles apparaissent dans un gaz au niveau des renforcements localisés du champ électrique (effet de pointes, câble aérien THT,...). La décharge est dans ce cas restreinte à une zone très réduite à l'immédiate proximité du conducteur à faible rayon de courbure.

- d) **Décharges en arborescence** : elles se produisent suite à un défaut dans l'isolant solide. Elles peuvent donc résulter des décharges dans les cavités internes. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices à l'apparition de nouvelles DP.

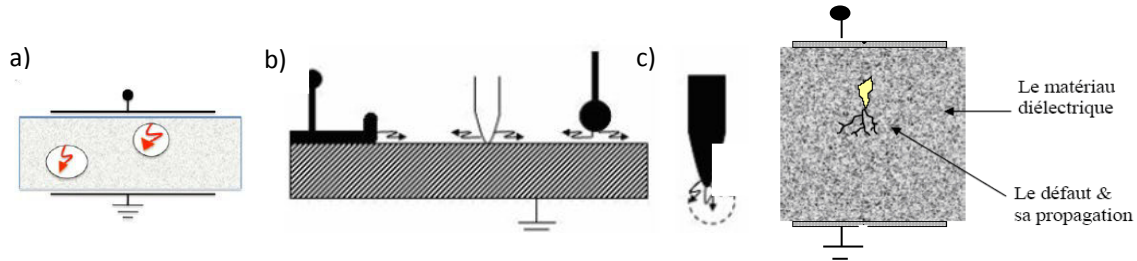


Figure I-22 : Classification des décharges partielles a) internes ; b) de surface ; c) couronne et d) en arborescences [38], [39]

I.6.2.1 Récurrence des décharges en tension alternative (AC)

I.6.2.1.1 Décharges internes

Le comportement des DP internes peut être décrit simplement en utilisant un schéma équivalent [40] de 3 condensateurs notés a, b et c : la Figure I-23 présente une section transversale d'un diélectrique d'épaisseur d comportant une cavité de forme sphérique d'épaisseur t .

La cavité est modélisée par la capacité C_c , la partie du diélectrique sans DP en série avec la cavité est représentée par la capacité C_b et la capacité C_a représente la partie saine restante du diélectrique. La tension appliquée aux bornes du diélectrique est noté V_a et la tension aux bornes de la cavité est notée V_c .

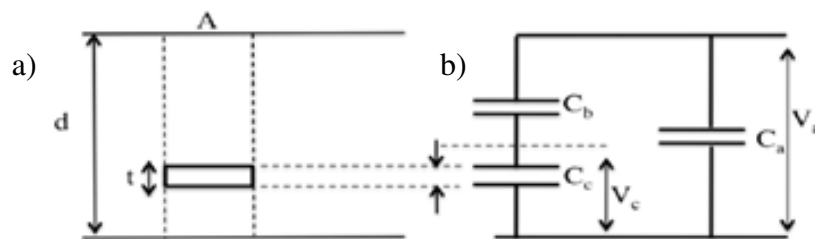


Figure I-23 : Représentation a) schématisée et b) d'un circuit électrique équivalent d'une décharge dans un isolant solide

En considérant $t \ll d$, et en supposant la cavité remplie de gaz, le champ aux bornes de la cavité C_c est alors exprimé par :

$$E_c = \frac{\varepsilon'_r V a}{d} = \varepsilon'_r E$$

avec ε'_r la permittivité relative du diélectrique solide.

La division capacitive impose la relation entre V_a et V_c :

$$V_c = \frac{C_b}{C_b + C_c} V_a$$

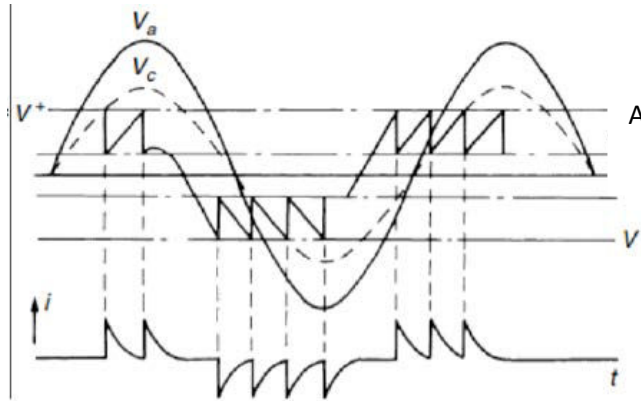


Figure I-24 : Récurrence des décharges partielles dans une cavité [39]

Lorsque le champ électrique dans la cavité atteint le champ disruptif de l'air (correspondant à la V^+ sur la figure), une décharge a lieu et la tension V_c chute à une valeur non nulle mais inférieure à la tension de claquage du gaz. La tension appliquée V_a est alors la tension d'apparition des décharges partielles ou PDIV (Partial Discharge Inception Voltage). Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelques nanosecondes) par rapport à la période de la tension sinusoïdale appliquée (50-60Hz). Ensuite, la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau, et s'effondre lorsque la valeur V^+ est de nouveau atteinte et qu'une nouvelle décharge se produit. Ce phénomène perdure jusqu'à ce que la tension appliquée V_a n'augmente plus (phase $\varphi=90^\circ$). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt des décharges à 270°). Ces décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (quelques nanosecondes) dans l'échantillon et le circuit extérieur. Lorsque la tension appliquée diminue, les décharges se maintiennent tant que la tension n'atteint pas la PDEV (Partial Discharge Extinction Voltage).

I.6.2.1.2 *Décharges couronnes*

Les décharges couronnes apparaissent dans les configurations géométriques qui induisent un renforcement local du champ électrique, comme par exemple une configuration pointe-plan, fil-cylindre, fil-plan, etc....

Leurs signatures diffèrent de celles observées pour des décharges établies dans des cavités. Le développement des décharges couronnes est présenté dans la Figure I-25.a. Lorsque la tension appliquée V_a dépasse une certaine valeur critique U_+ , l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne apparaît. Celui-ci est entretenu jusqu'à ce que la tension appliquée V_a devienne inférieure au seuil de décharge U_+ (Figure I-25.b). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les distributions de décharges sont centrées sur les phases de 90° et 270° sur chaque alternance. Un effet de polarité est observé : les décharges couronne apparaissent à une tension plus faible sous polarité négative que sous polarité positive. Ceci est dû au phénomène de bombardement ionique de la cathode résultant en une émission secondaire d'électrons. On observe un déséquilibre important entre les impulsions de courant intervenant sur les deux alternances. En alternance positive, il s'agit d'impulsions de courant positif de quelques dizaines de mA d'amplitude, d'une durée typique de 100 ns (à pression atmosphérique), et d'une fréquence caractéristique de 10 kHz (pression atmosphérique). Ces impulsions sont associées au développement de décharges filamenteuses nommées « streamers » susceptibles de se propager à distance de la région à champ électrique intense (région de la pointe). En alternance négative, il s'agit d'impulsions de courant négatives de quelques mA d'amplitude, d'une durée typique de 300 ns (à pression atmosphérique), et d'une fréquence caractéristique d'environ 100 kHz (pression atmosphérique). Ces impulsions, nommées impulsions de « Trichel », sont associées à des phénomènes d'ionisations du gaz confinés au niveau de l'électrode à champ fort. En régime établi, une augmentation de tension ne conduit pas à une augmentation de l'amplitude des impulsions, mais à une augmentation de leur fréquence. Notons que ce déséquilibre n'apparaît pas sur la figure suivante où seules les tensions sont représentées.

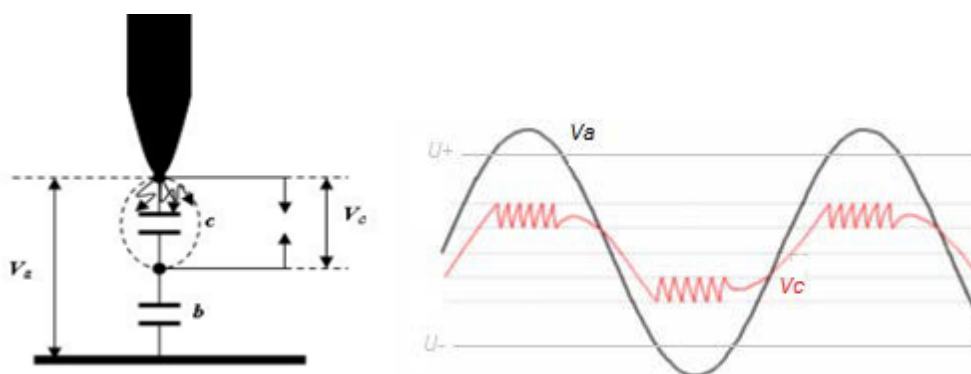


Figure I-25 : a) Circuit équivalent et b) récurrence des décharges couronnes [38], [39]

1.6.2.2 Récurrence des décharges en tension continue (DC)

Le comportement des décharges partielles en tension continue peut être schématisé de la même façon qu'en tension alternative. Cependant, différentes situations doivent être examinées. Dans le cas d'une décharge intervenant entre conducteurs non revêtus par un isolant solide, comme par exemple dans le cas de la décharge couronne, c'est la dynamique d'évacuation de la charge d'espace (ions gazeux) de la zone à champ fort qui déterminera la fréquence de répétition des décharges. Dans le cas où un isolant solide est présent dans l'espace inter-électrodes, la situation est différente. Le phénomène d'ionisation du gaz conduit à une multiplication de porteurs de charges des deux signes (électrons et ions) qui, sous l'action des forces Coulombiennes, migreront dans des sens opposés pour être séparément déposés sur les faces de l'isolant, conduisant ainsi à la création de potentiels de surface ayant un effet antagoniste sur le champ électrique imposé. Ainsi, sous tension continue, après un événement de décharge partielle dans un volume de gaz délimité par des isolants (par exemple une cavité), le champ électrique résultant dans l'intervalle gazeux est inférieur au champ de rupture du gaz. La neutralisation des charges déposées sur les surfaces isolantes n'étant plus possible comme dans le cas d'une alimentation alternative, la seule possibilité permettant d'atteindre à nouveau la tension de claquage aux bornes du volume gazeux est la chute de ces potentiels de surface. Il peut alors s'agir de mécanismes d'écoulement de charges en surface (isolant épais), de conduction (conditions de haute température) ou encore d'injection de charge (isolant fin). Ce mécanisme sera alors caractérisé par une constante de temps dépendant de la géométrie du système et des conditions opératoires. Par exemple, dans le cas d'une isolation de câbles haute tension par papier imprégné, Morshuis [41] a démontré que le taux de répétition des décharges pouvait être approché par la relation :

$$n \cong \frac{1}{\tau} \frac{V_s}{u}$$

Avec τ la constante de temps, V_s la valeur asymptotique de la tension dans un trou (si aucune décharge n'a lieu) et u la tension de rupture [42].

1.6.2.3 Mécanismes de formation des décharges partielles

Un électron placé dans un champ électrique uniforme ($E = V/d$), où V est la différence de potentiel appliquée entre deux électrodes planes séparée d'une distance d , est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules au cours de chocs successifs. L'ionisation d'une particule neutre donne naissance à une particule chargée (ion positif) et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une

seconde particule. Chaque électron nouvellement créé contribue à son tour, par collision ionisante au cours de son déplacement vers l'anode (électrode positive), à la création d'une « avalanche électronique » (Figure I-26).

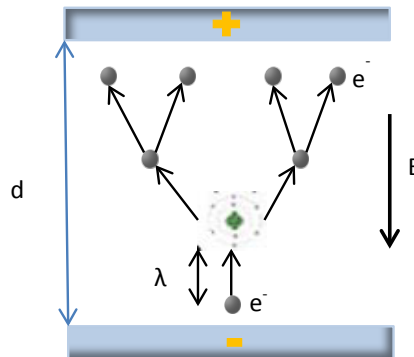


Figure I-26 : Schéma du processus d'avalanche électronique

Pour que la décharge soit auto-entretenu, il faut que ce mécanisme d'avalanche puisse perdurer. C'est pourquoi, il est nécessaire que tous les électrons qui quittent la zone d'ionisation soient remplacés. Il existe plusieurs mécanismes permettant d'émettre ces électrons, dits électrons secondaires, à la surface de la cathode. Le mécanisme le plus important est en général l'émission d'électrons secondaires par impact ionique (comme évoqué plus haut) : les ions positifs, accélérés par le champ électrique, viennent heurter la cathode qui, si l'énergie cinétique des ions est supérieure au travail de sortie des électrons du métal, émet alors des électrons. Ces électrons secondaires sont à l'origine de nouvelles avalanches secondaires. Des électrons secondaires peuvent aussi être créés par photo-ionisation à partir des premières avalanches et en aval de celles-ci. C'est en particulier le principal mécanisme à l'œuvre pour le développement des streamers positifs. Ces successions d'avalanches électroniques provoquent la formation d'une décharge qui conduit au claquage de l'air.

Ces décharges ainsi créées vont générer un courant électrique : le courant de décharge. Du point de vue électrique, la Figure I-27 décrit le comportement de la tension aux bornes de la décharge en fonction de son intensité.

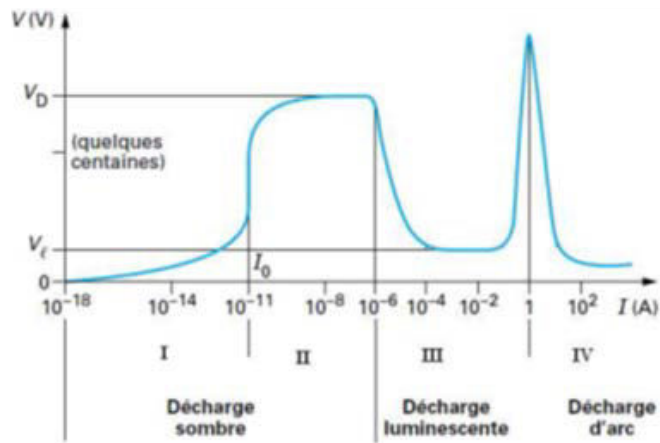


Figure I-27 : Caractéristique courant tension et différents régimes de décharges[43]

Cette courbe permet de distinguer 4 régimes [43] :

Région I : courant et tension faibles (moins de 10^{-11} A, quelques dizaines de volts) et la décharge n'existe qu'en présence d'une source ionisante, d'origine extérieure. Elle ne peut s'entretenir d'elle-même si cette source disparaît. Elle est dite non autonome. La saturation I_0 est atteinte (la tension imposée aux bornes des électrodes permet la collection de toutes les charges libres sans toutefois permettre leur multiplication),

Région II : le courant se remet à croître, caractérisant une amplification de l'ionisation du gaz et de l'émission secondaire à la cathode, résultat du bombardement des ions positifs issus du mécanisme d'ionisation. Ce régime est défini comme la décharge de Townsend, caractérisée par une tension V_D appelée « potentiel disruptif ».

Région III : après l'amorçage (pour la valeur V_D du potentiel), la décharge stabilise en un point fixe, caractérisé par un potentiel fixe lorsque la tension atteint une valeur $V_1 < V_D$ (environ 100 V), un courant I variable sur toute la plage du palier (10^{-6} à 1 A environ). C'est la décharge lumineuse caractérisée par une luminosité visible à l'œil nu.

Région IV : L'amorçage d'arc s'effectue après une zone de transition, où la tension cesse de croître et où des effets thermiques importants au niveau de la cathode commencent à croître. En effet, les courants de décharge deviennent très intenses car toute l'énergie passe par un même canal préférentiel dans l'espace inter-électrode. Ce régime est caractérisé par un courant fort (>100 A), une faible tension (<100 V) et une émission lumineuse très importante dominée par un fond continu.

I.6.3 Mécanismes de la décharge

Dans cette partie, les bases théoriques nécessaires à cette étude sont développées. Une description simple des phénomènes physiques mis en jeu conduit à la loi de Paschen utilisée comme une approximation théorique [40]. Cette loi permet de déterminer la tension d'amorçage d'une décharge [44].

I.6.3.1 Coefficients de Townsend

Cette loi s'appuie sur le développement d'une avalanche d'électrons, telle que décrite ci-dessus, ainsi que sur le mécanisme de rupture de Townsend dans les gaz en considérant la multiplication d'électrons produits par collisions dans l'espace inter-électrodes (ou « gap ») pour lequel le paramètre prépondérant est le produit pression \times distance, associé à la création d'électrons secondaires par bombardement ionique à la cathode. Ces deux processus sont quantifiés par les coefficients de Townsend.

Le premier coefficient de Townsend α correspond au nombre d'électrons dn produits par unité de longueur dx dans la direction du champ électrique pour une quantité d'électrons incidents n , soit : $dn = n\alpha dx$.

Ce coefficient décrit le processus d'avalanche caractérisé par les ionisations successives et la création d'électron (Figure I-26).

Avant d'entrer en collision avec un atome du gaz séparant l'anode et la cathode, l'électron franchit un libre parcours moyen (λ). λ dépend de la section efficace de collision ionisante (elle-même dépendante de la vitesse/énergie de l'électron, de la nature et de la pression du gaz) :

$$\lambda = \frac{1}{\sigma x N} \quad (2)$$

avec σ la section efficace de collision ionisante et N la densité du gaz (nombre d'atomes de gaz par unité de volume) si on considère un gaz parfait :

$$P = Nxk_B x T \quad (3)$$

T étant la température du gaz et k_B la constante de Boltzmann.

Par ailleurs, pour que la collision soit ionisante, l'énergie cinétique de l'électron incident doit être supérieure au potentiel d'ionisation ε_i de la particule cible considérée. En d'autres termes, $e \times E \times x \geq \varepsilon_i$.

Pour obtenir une ionisation par impact électronique direct, il est alors nécessaire :

- que l'électron puisse acquérir l'énergie suffisante, soit réaliser un libre parcours sur x ;
cette probabilité est exprimée par $\varphi(x) = e^{-\frac{x}{\lambda}}$

et

- qu'une collision ionisante intervienne dans la dernière section de parcours dx ; sa probabilité peut être exprimée par $\varphi_c(dx) = \frac{dx}{\lambda}$

La probabilité d'ionisation par impact électronique direct est donc exprimée par $d\Psi$ le produit des probabilités de ces deux événements indépendants :

$$d\Psi(x) = \varphi(x) \times \varphi_c(dx) = e^{-\frac{x}{\lambda}} \times \frac{dx}{\lambda}$$

Si on considère dans cette même tranche de gaz n électrons initiaux, à l'issue des avalanches électroniques impliquant une fraction de ces électrons initiaux (dont l'énergie est supérieure à ϵ_i), dn électrons seront produits :

$$dn = n \times d\Psi$$

$$dn = n \times e^{-\frac{x}{\lambda}} \times \frac{dx}{\lambda}$$

$$dn = n \times \frac{e^{-\frac{x}{\lambda}}}{\lambda} \times dx$$

Par conséquent, le premier coefficient de Townsend (coefficient d'ionisation primaire, i.e. nombre de paires électrons/ions créées par unité de longueur parcourue dans la direction du champ) α est défini par :

$$\alpha = \frac{e^{-\frac{x}{\lambda}}}{\lambda}$$

L'émission d'électrons à la cathode, dite émission secondaire, correspond au deuxième coefficient de Townsend (γ) qui est le nombre d'électrons secondaires émis par ions incidents. Ce coefficient dépend de la densité du gaz, de l'énergie acquise par les électrons (champ réduit E/N) et de la nature des électrodes (γ compris état de surface).

Lorsque les mécanismes d'ionisation et d'émission secondaires entretiennent la décharge, elle est dite autonome ou auto-entretenu. La condition d'auto-entretien est définie par la relation :

$$\gamma[\exp(\alpha d) - 1] = 1 \text{ avec } \exp(\alpha d) \gg 1$$

Cette relation exprime que le nombre net d'électrons supplémentaires (nombre d'électrons créés par l'avalanche moins l'électron initial ($\exp(\alpha d) - 1$)) conduit à la formation d'au moins

un électron secondaire qui peut à son tour initier une avalanche électronique. Le mécanisme peut alors être entretenu.

I.6.3.2 Loi de Paschen

Ainsi, dans l'hypothèse d'un champ uniforme, en combinant les deux dernières expressions avec la condition d'auto-entretien et sachant que E/p (champ réduit exprimé en [V.Torr⁻¹.cm⁻¹]) est une fonction de α/p , on obtient une expression analytique du potentiel d'amorçage V en fonction du produit pd :

$$V = \frac{Bpd}{C + \ln(pd)}$$

Avec

$$C = \ln\left(\frac{A}{1 + \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)}\right)$$

A et B sont des coefficients exprimés respectivement en [Torr⁻¹.cm⁻¹] et [V.Torr⁻¹.cm⁻¹]. Ils sont déterminés expérimentalement pour chaque gaz (Tableau I-6 et Tableau I-7) et sont constants sur un domaine de champ réduit E/p [45].

Tableau I-6 : A et B de plusieurs gaz exprimés en [Torr⁻¹.cm⁻¹] et [V.Torr⁻¹.cm⁻¹]

Gaz	A (Torr⁻¹.cm⁻¹)	B (V.Torr⁻¹.cm⁻¹)
H ₂	5	130
N ₂	12	342
Air	15	365
He	3	34
Ne	4	100
Ar	14	180

Tableau I-7 : A et B de plusieurs gaz exprimé en [mbar⁻¹.cm⁻¹] et [V.mbar⁻¹.cm⁻¹]

Gaz	A (mbar⁻¹.mm⁻¹)	B (V.mbar⁻¹.mm⁻¹)
H ₂	375,03	9750,83
N ₂	900,08	25652,18
Air	1125,10	27377,33
He	225,02	2550,22
Ne	300,03	7500,64
Ar	1050,09	13501,15

A température constante, l'expression, connue sous le nom de loi de Paschen, décrit la tension disruptive d'un gaz dans un champ électrique uniforme comme étant une fonction du produit de la pression p par la distance d (séparant deux électrodes). Le calcul de la loi de Paschen décrit une représentation non linéaire qui présente un minimum dont les coordonnées dépendent de la nature du gaz et des électrodes utilisées (Figure I-28).

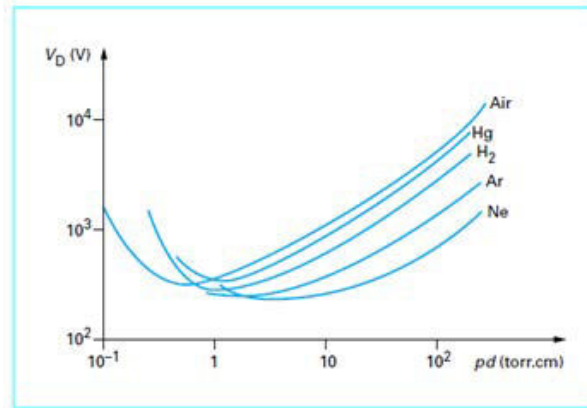


Figure I-28 : Courbe de Paschen pour différents gaz [43]

Plus précisément, dans le cas de l'air, en considérant un coefficient d'émission secondaire $\gamma = 10^{-2}$ et en adoptant les unités mbar \times mm pour le produit pression \times distance (cf. Tableau ci-dessus), on obtient la courbe suivante où sont également reportées les valeurs expérimentales rassemblées par *Dakin et al* [46].

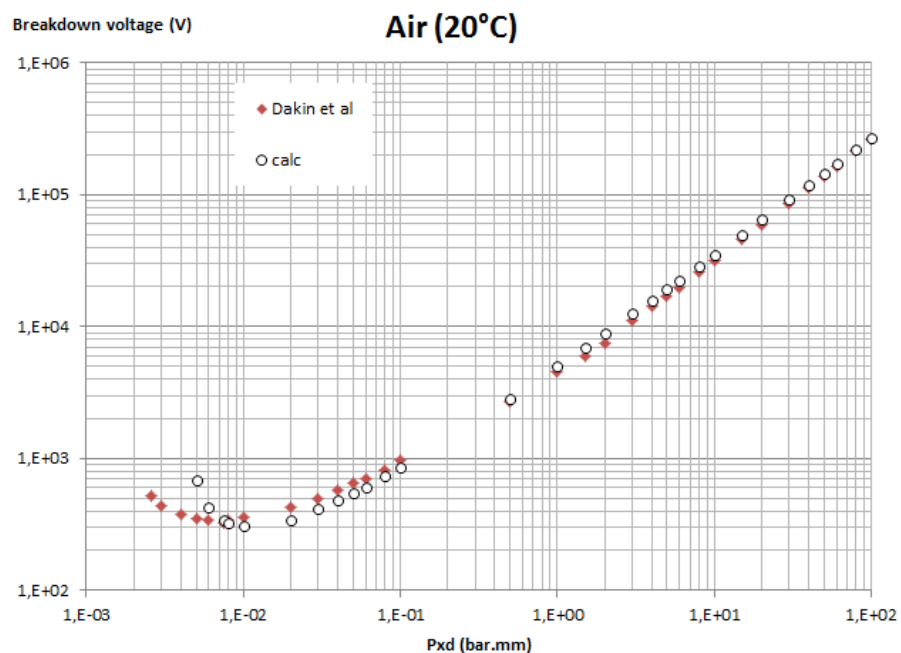


Figure I-29 : Courbe de Paschen pour l'air [46]

L'allure de cette courbe s'explique par différents phénomènes. A distance constante, lorsque la pression diminue, le libre parcours moyen augmente, la tension seuil permettant le phénomène d'avalanche diminue donc aussi. A très basse pression, étant donné le nombre limité de molécules présentes, l'avalanche ionisante est limitée, entraînant une tension disruptive élevée. Pour les pressions élevées, la forte densité moléculaire fait que le libre parcours moyen des particules ionisantes n'est plus suffisant pour déclencher facilement le phénomène d'avalanche ; la tension disruptive est donc plus élevée. Dans le cas de l'air, le minimum de Paschen est de 327 V [46].

A pression constante, la diminution de la distance inter-électrodes implique une augmentation du champ électrique seuil (Figure I-30).

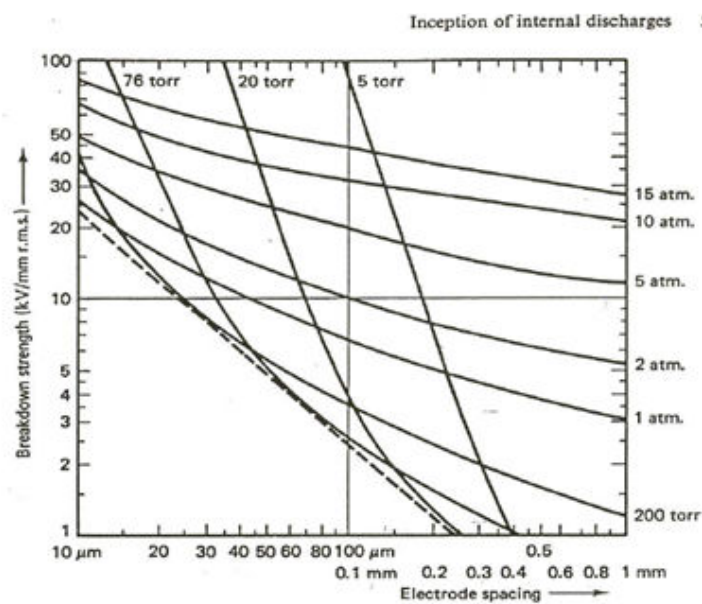


Figure I-30 : Champ de claquage dans l'air selon l'épaisseur et la pression [36]

I.6.3.3 Influence de la température sur la loi de Paschen

Dans l'environnement aéronautique, les systèmes électriques peuvent être soumis à une large gamme de température et de pression du fait des variations d'altitude et de leur localisation dans l'aéronef.

Des analyses en température ont été réalisées sur la PDIV en AC, ainsi que sur l'intensité des DP par [39] : une augmentation de la température conduit à une diminution de la PDIV et à une augmentation de leur intensité. Des analyses en humidité relative ont aussi été réalisées par Sili. Il est noté que plus l'humidité de l'air augmente, plus la tension disruptive augmente, et plus l'intensité des décharges diminue. Les molécules d'eau jouent le rôle d'un gaz électronégatif induisant une augmentation de la tension de rupture de l'air.

Afin de prendre en compte d'éventuels écarts aux conditions de Paschen, notamment pour la température et la pression, des corrections ont été proposées :

- a) Peek [47] définit un facteur correctif multiplicatif δ sur la tension de Paschen afin de tenir compte de ces changements :

$$\delta = \frac{293}{T} \frac{p}{750}$$

Avec T la température en Kelvin et p la pression en Torr.

Ce facteur conduit à une proportionnalité de la tension disruptive à l'inverse de la température. De ce fait, lorsque la température augmente, la courbe de Paschen translate vers « le bas » (abaisse la valeur de la tension de claquage).

- b) La correction de Dunbar [48] est déduite de la loi des gaz parfaits ($PV = nRT$) qui indique que, à volume constant, la pression varie proportionnellement à la température. Ainsi, si (p_0, T_0) correspondent à un état donné d'un gaz, la pression équivalente qui règnerait dans ce milieu à température T peut être calculée par:

$$p = p_0 \frac{T}{T_0}$$

Avec p_0 la pression atmosphérique en Torr et T, T_0 les températures en Kelvin.

Ce facteur correctif implique un décalage de la courbe de Paschen vers « la droite » (c'est-à-dire une valeur croissante du produit pression \times distance) lorsque la température augmente.

1.6.3.4 Champ électrique dans une cavité

Le champ électrique dans une cavité dépend de sa forme (plate ou sphérique) et de la constante diélectrique de l'isolant solide qui l'entourne.

1.6.3.4.1 Cas d'une cavité perpendiculaire au champ [49]

Dans le cas d'une couche d'air perpendiculaire au champ (Figure I-31), l'amplitude du champ peut être calculée. Cette cavité, d'épaisseur x_{air} , sera considérée à l'intérieur d'un matériau diélectrique solide d'épaisseur d.

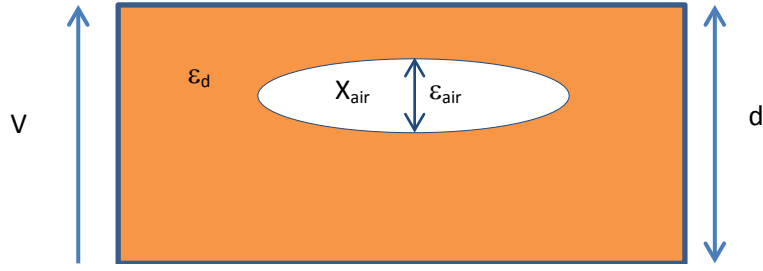


Figure I-31 : Modèle d'une cavité perpendiculaire au champ

La définition du potentiel électrique et l'équation de Maxwell-Gauss permettent d'écrire :

$$V = E_{air}x_{air} + E_d X_d$$

$$\varepsilon_{air}E_{air} = \varepsilon_d E_d$$

Avec $x_{air} + x_d = d$ et ε_{air} et ε_d les permittivités relatives de l'air et du diélectrique solide

On en déduit :

$$V = E_{air}X_{air} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d} E_{air}(d - x_{air})$$

D'où le champ dans la cavité :

Équation I.1

$$E_{air} = \frac{V}{x_{air} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(d - x_{air})} = \frac{V}{x_{air}(1 + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(\frac{d}{x_{air}} - 1))}$$

A partir de ce champ, il est alors possible d'estimer si les conditions d'une décharge sont réunies ou non. Il est aussi possible de raisonner sur la tension en comparant la tension calculée aux bornes de la cavité (Équation I.1) et la courbe de Paschen de la Figure I-28.

$$V_{air} = \frac{V}{1 + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(\frac{d}{x_{air}} - 1)}$$

Dans le cas où la cavité est de faible épaisseur par rapport au solide en série, un ordre de grandeur du champ dans la cavité peut être obtenu.

L'Équation I.1 conduit à :

$$E_{air} = \frac{V}{x_{air} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(d - x_{air})} = \frac{V}{d(\frac{x_{air}}{d} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(1 - \frac{x_{air}}{d}))} = \frac{V/d}{(\frac{x_{air}}{d} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}(1 - \frac{x_{air}}{d}))}$$

Dans le cas où $x_{air} \ll d$, on a:

$$E_{air} \approx \frac{V/d}{\frac{x_{air}}{d} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}}$$

Et si $\frac{x_{air}}{d} \ll \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}$, alors:

$$E_{air} \approx \frac{V/d}{\frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{air}} \frac{V}{d} = \varepsilon_d \frac{V}{d}$$

$$E_{air} \approx \frac{V/d}{\frac{x_{air}}{d} + \frac{\varepsilon_{air}}{\varepsilon_d}} = \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_{air}} \frac{V}{d} = \varepsilon_d \frac{V}{d} = \varepsilon_d E$$

Avec $E = \frac{V}{d}$ le champ moyen dans le solide.

Le champ dans la cavité gazeuse est donc renforcé d'un facteur égal à la permittivité du diélectrique solide.

I.6.3.4.2 *Cas d'une cavité parallèle au champ*

Ici est décrit le cas schématique d'une cavité d'air parallèle au champ électrique appliqué aux bornes du diélectrique.

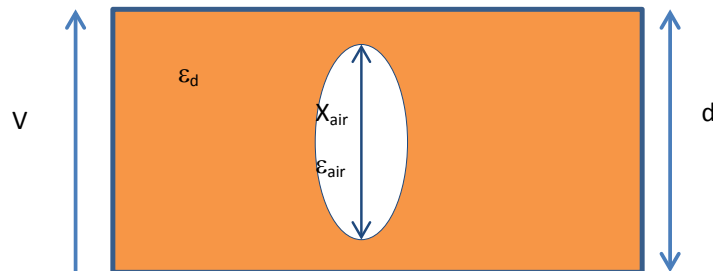


Figure I-32 : Cas d'une cavité parallèle au champ

D'après la loi de conservation de la composante tangentielle du champ électrique, le champ dans la cavité est égal au champ dans le matériau diélectrique :

$$E_{air} = E_d$$

D'où la relation entre la tension V_{air} aux bornes de la cavité et la tension appliquée V :

$$\frac{V}{L} = \frac{V_{air}}{x_{air}}$$

Et donc

$$V_{air} = \frac{Vx_{air}}{d}$$

Comme dans le premier exemple, les résultats de l'équation peuvent ensuite être comparées aux valeurs théoriques issues des courbes de Paschen et voir ainsi si les conditions des décharges partielles sont réunies.

I.6.4 Détection des décharges partielles

I.6.4.1 Objectifs

La détection consiste à déceler la présence d'éventuels défauts dans un système d'isolation électrique (SIE) conduisant au phénomène de décharge électrique. Quatre étapes doivent être effectuées pour atteindre cet objectif :

- La détection qui consiste à déceler la présence d'une décharge ;
- La mesure qui doit permettre de quantifier l'intensité de la décharge en utilisant des grandeurs judicieusement choisies ;
- La localisation ;
- L'évaluation qui permet de déterminer le degré de nuisance des décharges dans le but de prévoir leur effet sur la durée de vie du système.

I.6.4.2 Différentes techniques

Les décharges partielles dissipant de l'énergie, elles sont souvent accompagnées d'une émission acoustique, d'une émission lumineuse et de réactions chimiques. Il est donc possible de détecter ces décharges partielles de plusieurs manières.

La principale technique est celle qui consiste à mesurer le courant ou la charge d'une décharge c'est la méthode électrique. Elle sera détaillée dans cette partie après avoir présenté les autres méthodes de détection.

I.6.4.2.1 Détection optique

Cette méthode consiste à localiser la lumière émise par les décharges, à l'aide d'une caméra, pour obtenir une image. La lumière émise par les décharges se situe dans le domaine du visible

ou de l'ultraviolet. Elle est souvent de faible intensité, ce qui nécessite de travailler dans une chambre noire. Il est difficile d'établir une corrélation entre l'amplitude de la décharge et l'intensité lumineuse. Ainsi, un photomultiplicateur est utilisé afin d'obtenir cette corrélation et de détecter des impulsions isolées.

Les décharges partielles détectables par cette méthode sont les décharges couronnes et les décharges surfaciques.

I.6.4.2.2 *Détection acoustique*

La méthode acoustique consiste à mesurer les émissions d'ondes acoustiques des décharges (qui sont comparées à des « explosions »). Ces ondes, qui se situent soit dans le domaine audible (par voie aérienne) soit ultrasonore (par voie solide), se propagent à travers le matériau isolant et sont captées par un détecteur, en général un microphone ultrason. Les signaux sont ensuite convertis en son audible [50], [51], [52], [53].

Cette méthode peut dans certains cas permettre de localiser les DP et de mesurer leur énergie qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés. Elle a l'avantage d'être non intrusive.

I.6.4.2.3 *Détection radio*

Cette méthode permet de capter les ondes électromagnétiques générées par des décharges, à l'aide d'une antenne. Cependant, elle ne permet ni de localiser ni de mesurer la décharge.

Dans ce type de détection, il existe des techniques dites ultra hautes fréquences (UHF) utilisées principalement dans le cas de postes blindés isolés au gaz [54], [55]. Chaque série d'impulsions produite par les décharges est d'une durée inférieure à 1 ns. Chaque impulsion engendre une onde électromagnétique qui se propage dans le domaine UHF (300 MHz à 3 GHz).

Des travaux récents ont montré qu'il était possible, par un filtrage du signal, de détecter des décharges partielles sur des enroulements de machines électriques alimentés par des convertisseurs à modulation de largeur d'impulsion [56].

I.6.4.2.4 *Détection chimique*

Cette méthode permet, dans le cas de systèmes où sont présentes des décharges de surface et/ou décharges couronne (bobinages haute tension, transformateur sec MT/BT, cellule de

distribution MT), de détecter un risque de rupture diélectrique ou de contournement par identification d'espèces gazeuses émises par des décharges dont la température augmente. La cinétique chimique résultant de cette montée en température se traduit par la production d'espèces gazeuses stables telles que le NO_2 , le NO ou encore en présence d'un isolant solide organique, le CO [52], [57].

I.6.4.2.5 *Détection électrique*

La méthode électrique consiste à mesurer des impulsions rapides de courant (ou la charges associée) engendrées dans le circuit extérieur lorsqu'une DP se produit. De nombreux travaux ont été réalisés sur cette technique de détection et de mesure de DP par Kreuger [36], Bartnikas [58], [59] et Natrass [60].

Il existe deux montages classiques pour la mesure des DP (Figure I-33) mettant en œuvre une impédance de mesure :

- Une mesure directe (montage élémentaire) : l'impédance de mesure est en série avec l'échantillon sous test.
- Une mesure indirecte (montage en pont) : l'impédance de mesure Z est en parallèle avec l'échantillon sous test

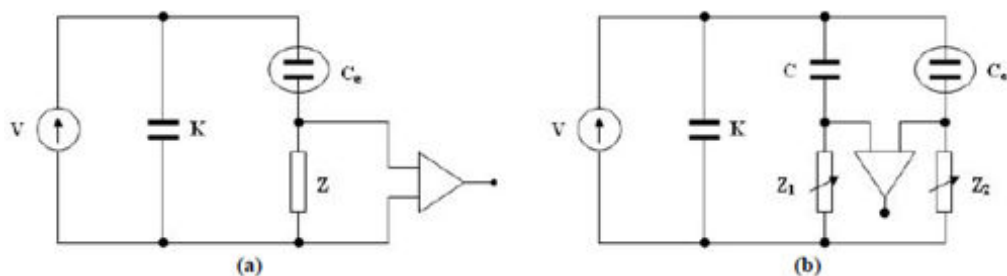


Figure I-33 : Schéma de principe d'un système de détection a) élémentaire et b) en pont

Le système de détection par mesure directe est le plus couramment utilisé.

Montage élémentaire :

V est la tension délivrée par la source, C_e est l'échantillon sous test, K est le condensateur de couplage, c 'est un condensateur haute tension exempt de décharges qui va fournir la tension de manière transitoire au système testé, Z est l'impédance de mesure.

Un des paramètres essentiels d'un tel montage est sa bande passante [58] :

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

La sortie de l'impédance de mesure est reliée à un boîtier d'acquisition et de numérisation des signaux (par exemple l'ICM system) ou à un oscilloscope.

Lorsqu'une décharge se produit, une impulsion rapide de courant circule dans le circuit extérieur, correspondant à une quantité de charges appelée « charge apparente ». Cette charge peut être obtenue par intégration du courant de décharge dans un condensateur.

Deux réponses se distinguent l'une de l'autre :

- Si Z est une résistance en parallèle avec un condensateur, la réponse du circuit RC (tension aux bornes de Z) à cette décharge est une impulsion exponentielle décroissante ;
- Si Z se compose d'un circuit RLC parallèle, la réponse du circuit RLC est oscillatoire et amortie. L'inductance L atténue fortement les composantes basses fréquences du signal mesuré, la capacité C intègre les impulsions rapides de DP, et la résistance R amortit les oscillations de tension à ses bornes. Après calibration, ce circuit permet de mesurer un signal proportionnel à la charge apparente des DP.

Dans ces deux situations, la hauteur de l'impulsion est proportionnelle à la charge q .

La mesure directe est la plus simple à mettre en œuvre mais comporte l'inconvénient majeur d'être sensible aux perturbations électriques hautes fréquences provenant aussi bien du réseau d'alimentation que de l'environnement (éclairage à tube fluorescent, émetteur radiophonique, etc.). Par ailleurs, ce système ne fonctionne qu'avec une tension d'alimentation sinusoïdale basse fréquence.

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

Montage en pont :

La cellule de test C_e est placée dans une des branches d'un pont (Figure I-14b). En absence de DP, le pont est équilibré en réglant les valeurs des impédances Z_1 et Z_2 . Lorsqu'une décharge apparaît, la tension entre les deux branches du pont n'est plus nulle car un courant de DP parcourt la branche $C_e - Z_2$. En mesurant la tension de déséquilibre du pont, nous pouvons déterminer la charge apparente correspondante aux DP. Ce type de montage permet en principe la mesure de DP dans le cas de formes complexes de tensions appliquées, et possède une très bonne immunité au bruit.

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

1.6.4.3 Différents diagrammes associés aux décharges partielles

Les diagrammes de décharges partielles sont communément utilisés pour détecter et discriminer les différentes décharges partielles. Ces diagrammes peuvent être complexes à interpréter mais ils permettent d'obtenir de nombreuses informations.

En AC :

Les diagrammes ϕ -q-n sont un des moyens les plus utilisés pour caractériser l'activité des décharges partielles dans un système alimenté en courant alternatif. Ces diagrammes permettent de comptabiliser les décharges en fonction de leur amplitude et de leur occurrence par rapport à la phase de la tension appliquée.

- ϕ est l'angle de la phase de la tension appliquée (compris entre 0 et 360°)
- q est l'amplitude de la décharge autrement dit la charge apparente associée (en pC ou nC)
- n représente le nombre de décharges détectées pour un angle de phase et une amplitude donnée

Pour réaliser ces diagrammes on effectue une mesure sur un grand nombre de périodes et on visualise tous les événements de décharges détectés sur une seule période. Ces diagrammes peuvent être représentés en 2D ou en 3D ; néanmoins les diagrammes 2D sont les plus communs.

En abscisse, on reporte la phase de la tension appliquée, et en ordonnée, l'amplitude de la charge apparente. L'échelle de couleur (logarithmique) sert à quantifier le nombre de décharge. Par exemple, pour la Figure I-34, les points noirs représentent un événement unitaire alors que les points rouges représentent 10 événements.

Une analyse des mécanismes de décharges peut permettre, à partir de ce type de diagramme, d'identifier le type de décharge ainsi que la position et la taille du défaut.

Il est reporté [61] dans la Figure I-34 les différents types de diagrammes des décharges internes, dans la Figure I-35 les diagrammes des décharges couronnes et dans la Figure I-36 les diagrammes associés aux décharges surfaciques.

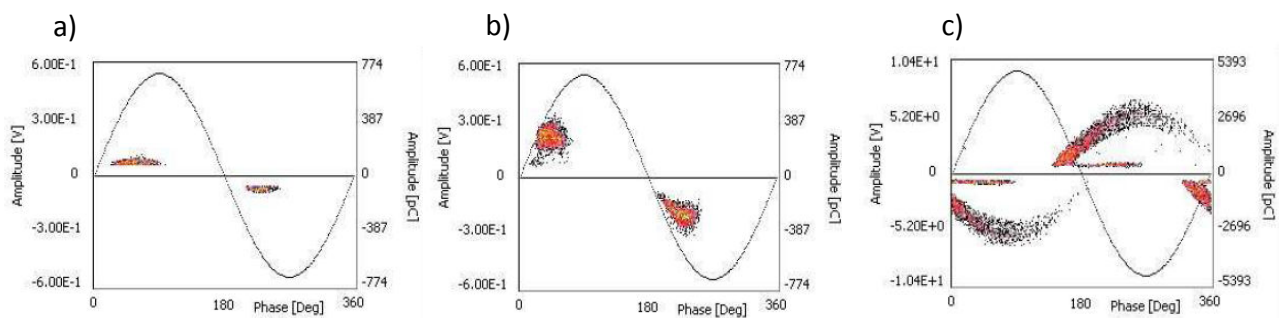


Figure I-34 : DP interne dans a) un défaut artificiel dans une résine époxyde ; b) un défaut cylindrique et c) un défaut interne d'un transformateur

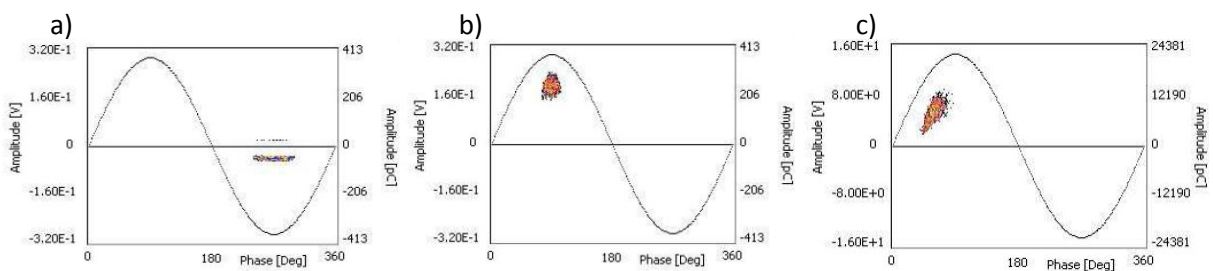


Figure I-35 : sur ces diagrammes, seules les impulsions de Trichel ont été détectées - DP couronnes en configuration pointe-plan a) avec le plan à la masse ; b) avec la pointe à la masse et c) avec la pointe à la masse et un écran isolant sur le plan à la haute tension-

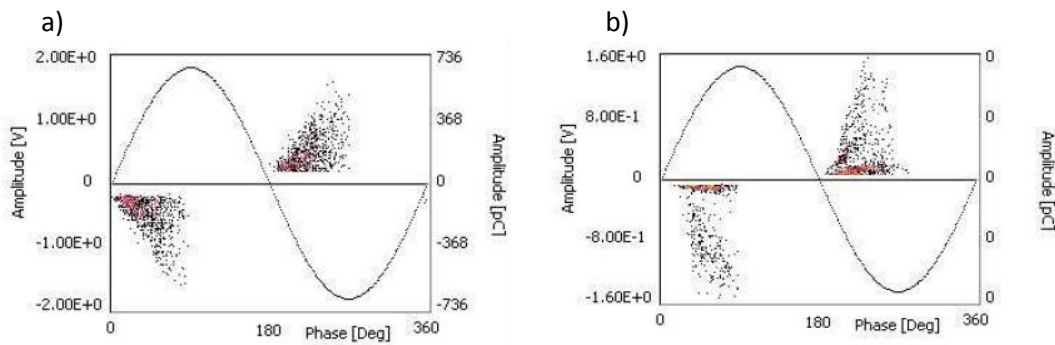


Figure I-36 : DP surfaciques sur a) les terminaisons d'un câble et b) les barres de stator

On peut observer certaines caractéristiques permettant de reconnaître une décharge interne :

- Symétrie des groupes d'événements ;
- Un profil des décharges pseudo-sinusoïdal pour des défauts ayant une forme régulière et compacte ;
- Des décharges en avance de phase par rapport au changement de polarité (effet mémoire dû aux charges déposées sur les isolants lors de la décharge précédente qui provoquent un déphasage du champ dans la cavité).

Les caractéristiques d'une décharge surfacique sont sensiblement similaires à celle d'une décharge interne :

- Dispersion importante de l'amplitude des décharges ;
- Symétrie des groupes de décharges sans qu'elles suivent un profil sinusoïdal ;
- Effet mémoire présent mais beaucoup moins flagrant que dans le cas des décharges internes.

Les décharges couronnes sont facilement reconnaissables car on observe, une forte dissymétrie sur les alternances :

- pour les faibles activités, une distribution d'événements sur une seule demi-période correspondant aux impulsions de Trichel (pointe négative) ;
- pour des activités plus intenses, distribution asymétrique entre les événements correspondant aux impulsions de Trichel (pointe négative) et ceux correspondant aux streamers (pointe positive) de plus forte amplitude ;
- Il y a très peu de dispersion d'amplitude des événements correspondant aux impulsions de Trichel (pointe négative) ;
- Les décharges apparaissent pour le maximum de la tension appliquée en absence d'un isolant.

En DC :

La détection des décharges partielles sous tension continue se fait de la même façon que lorsqu'une tension alternative est appliquée ; seuls les paramètres étudiés sont différents. Dans le cas AC, les paramètres intéressants sont (q_i, ϕ_i) , alors que dans le cas DC les paramètres sont (q_i, t_i) ou $(q_i, \Delta t_i)$ (Figure I-37) où q_i est l'amplitude de la charge, ϕ_i l'angle de phase et t_i le temps d'occurrence (ou Δt_i le temps entre des événements successifs).

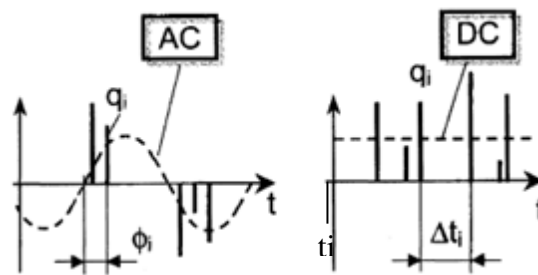


Figure I-37 : Paramètres basiques en AC (à gauche) et en DC (à droite) [62]

Un diagramme typique pour l'observation des DP est l'histogramme de densité des DP (ou diagramme q_n) représenté Figure I-38 pour différents types de DP. Les décharges surfaciques sont caractérisées par un grand dispersément dans l'amplitude, alors que les décharges couronnes montrent une distribution étroite.

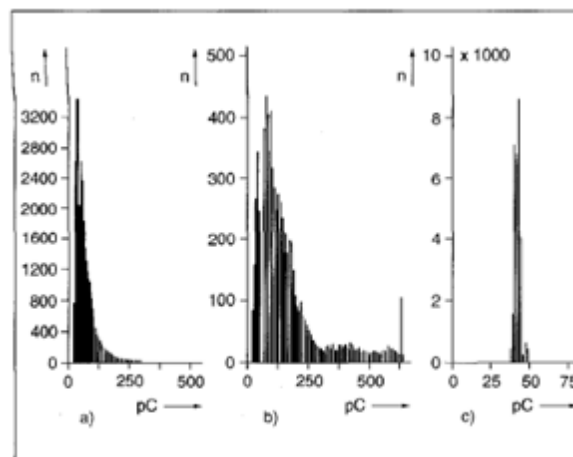


Figure I-38 : Diagramme $q-n$ des décharges a) dans une cavité b) de surface dans l'air et c) couronnes [41]

Une autre représentation simple des DP est le diagramme $q-q_{suc}$ (Figure I-39) qui montre l'amplitude moyenne de décharge q_{suc} à la suite d'une décharge d'amplitude q . Pour un certain nombre de types de défauts, la relation entre ces deux paramètres peut être prévue et est basée sur

la connaissance des processus physiques des décharges. Pour les décharges dans une cavité et pour les décharges couronnes, q_{suc} est indépendant de q .

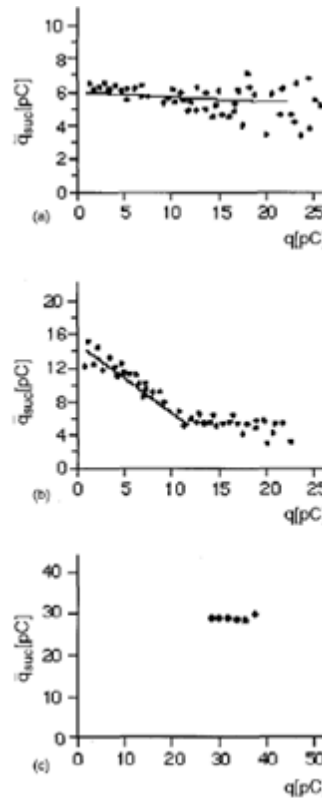


Figure I-39 : Diagramme de la moyenne de l'amplitude des décharges q_{suc} en fonction de l'amplitude q des décharges a) dans une cavité ; b) de surface et c) couronnes [41]

Fromm a développé un modèle mathématique [63] pour la récurrence des DP en DC, qui aide à connaître le processus physique des DP. Ce modèle prévoit deux paramètres indépendants Δt_{pre} et Δt_{suc} pour une décharge dans une cavité, qui sont respectivement la durée d'impulsion de la décharge précédente et la durée d'impulsion de la décharge suivante. La théorie prévoit un lien entre, d'une part, l'amplitude de décharge q et Δt_{pre} et d'autre part, q et Δt_{suc} .

Klueter et ses collaborateurs [64] ont permis de différencier les décharges couronnes dans l'air des décharges de surface dans l'air. La différence des formes d'impulsion des deux configurations (Figure I-40) est liée aux mécanismes physiques formant les impulsions. Ces impulsions sont formées par des processus de génération et de recombinaison/collecte des charges libres qui dépendent des conditions environnantes. Une décharge produite dans le gaz seul (décharge couronne) ou dans un gaz borné par un isolant solide (décharge de surface) aura donc des processus de génération/extinction différents et par conséquent donnera lieu à des formes d'impulsion significativement différentes.

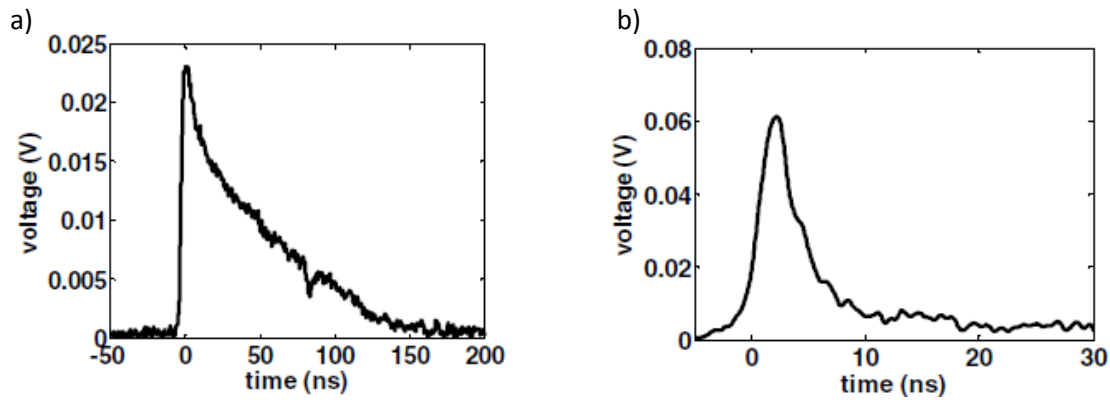


Figure I-40 : Impulsion a) d'une décharge couronne dans l'air et b) d'une décharge surfacique dans l'air [64]

I.6.5 Décharges partielles dans les systèmes aéronautiques

L'étude des décharges partielles dans les systèmes aéronautiques commence à être étudiée.

Cella et ses collaborateurs [65] ont étudié l'apparition de DP sur un convertisseur électronique de puissance pour l'aérospatiale. Ils utilisent une méthode simple où un câble coaxial simple et dénudé est capable de détecter les DP en AC. En ajoutant le filtrage, les événements de DP peuvent être dissociés des bruits de commutation sous une tension de type PWM (ou MLI – modulation de largeur d'impulsion). L'efficacité de la détection de DP sous courant continu n'a pas été démontrée car les décharges électriques sont difficiles à déclencher.

Les moteurs électriques à fils magnétiques classiques ont été étudiés par Billard et ses collaborateurs [66]. Ces moteurs pourraient ne pas résister à une augmentation de tension, dans le pire des cas à basse pression, même avec des fils neufs. Il est observé que l'amplitude de la décharge partielle à basse pression est largement supérieure à l'amplitude de DP à la pression atmosphérique. Des études complémentaires sont nécessaires pour étudier les mécanismes de dégradation à basse pression par rapport à la pression atmosphérique.

Boukadoum et ses collaborateurs [67] se sont intéressés aux connecteurs de puissance en environnement aéronautique. Parmi les divers tests expérimentaux menés sur ces connecteurs, il a été constaté que le vieillissement thermique à 200 °C pendant 1500 heures influait sur les valeurs de PDIV. Une combinaison de vieillissement électrique (due aux tests de PDIV successifs) et de vieillissement thermique (200°C pendant 1000 h) a également été observée. De plus, il a été observé que le vieillissement sous décharges partielles pendant quelques minutes était aussi

efficace qu'un vieillissement thermique de plusieurs milliers d'heures en termes de diminution de la PDIV.

L'étude des circuits imprimés sous décharges partielles pendant 140 h a été réalisée par Emersic *et al* [68]. Il est observé de très faibles changements d'épaisseur du revêtement après vieillissement. De plus, une croissance progressive des lignes de claquage horizontales peu profondes apparaît avec une attraction électrophorétique de particules de pollution. Néanmoins, il n'est pas observé de défaillance électrique après 140 h de vieillissement sous DP.

L'ampleur des PDIV a été mesurée sur quatre configurations différentes d'échantillons de câbles aérospatiaux par Christou et Cotton [69] : câble enroulé sur un cylindre métallique relié à la masse, câble dans une tresse métallique à la masse maintenue par un isolant rétractable thermiquement, câble en contact avec un plan métallique à la masse et fil métallique à la masse enroulé sur le câble. Ces configurations pourraient reproduire la manière dont les câbles sont installés dans un avion. Il a été observé que le cas du câble enroulé sur un cylindre métallique relié à la masse est plus reproductible à des pressions élevées (1000 mbar) en termes de résultats de mesure. Néanmoins, le cas du câble dans une tresse métallique à la masse, montre des écarts-types plus faibles.

À basse pression (116 mbar), l'apparition d'un diagramme de DP stable était plus rapide qu'à 1000 mbar. Dans cette situation, les résultats du cas du câble en contact avec un plan métallique à la masse ont montré une reproductibilité plus élevée ainsi que des écarts-types relativement faibles.

De plus, les diagrammes de DP en fonction de la phase de tension d'alimentation (PRPD) suggèrent que différents mécanismes de DP existent dans chaque configuration. Il est nécessaire de réaliser plus d'essais sur plus d'échantillons de câbles afin de vérifier et quantifier les différentes observations. Ces analyses permettront de déterminer la configuration la plus appropriée pour reproduire les harnais des câbles dans les aéronefs.

I.6.6 Vieillissement sous décharges partielles

L'effet des décharges partielles sur un film de PI a été étudié par Luo *et al.* [70]. Plus précisément, l'effet des décharges surfaciques créées par une tension bipolaire à impulsion carrée de 1 kV (sachant que la PDIV était de 0,8 kV) avec une fréquence de 1 kHz a été analysé pendant le vieillissement et après le vieillissement par des analyses à microscope électronique à balayage (MEB) et spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. L'amplitude moyenne et le nombre moyen de décharges durant le vieillissement sont donnés dans la Figure I-41, où il est montré

qu'après une diminution initiale, le nombre d'événements de décharge et leur amplitude augmentent avec le degré de vieillissement.

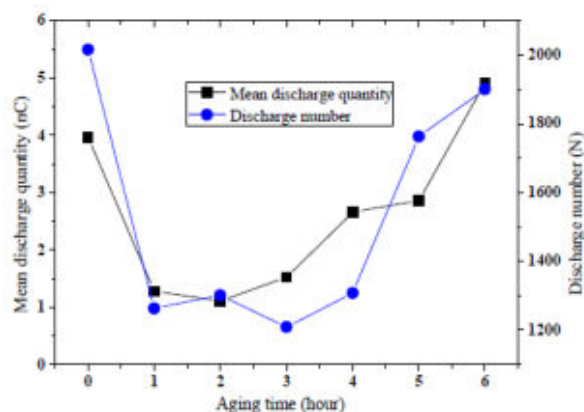


Figure I-41 : Caractéristiques de la quantité moyenne de décharges et du nombre de décharge au fur et à mesure d'un vieillissement sous décharges [70]

Les analyses au MEB montrent que les défauts dans lesquels apparaissent des DP s'agrandissent au cours du temps par des mécanismes d'érosion physiques et chimiques, cette dégradation étant plus importante à la surface de l'échantillon. La modification chimique est confirmée par les spectres FTIR du film après vieillissement (diminution des pics initiaux avec apparition de nouveaux pics).

Sur des plaques de résine époxyde, des travaux antérieurs [71] ont montré qu'une exposition de 25 minutes à une décharge de surface ponctuelle (pointe métallique en contact de la plaque) conduisait à une dégradation de surface locale, mais également à distance (jusqu'à 3 cm de la pointe) ; cette dégradation a été mise en évidence par dosage d'acide oxalique ($C_2H_2O_4$) résultant de la fragmentation des chaîne de polymère.

Les décharges couronne peuvent provoquer une accumulation de charges d'espace (CE) dans le matériau [72]. On peut voir dans la Figure I-42 que des charges positives s'accumulent près de l'anode, contrairement à l'échantillon non traité par les décharges couronne. Ainsi, il peut être considéré que la surface, ayant reçu des décharges couronne, a été dégradée et que la barrière d'injection de charge a été réduite par ces décharges.

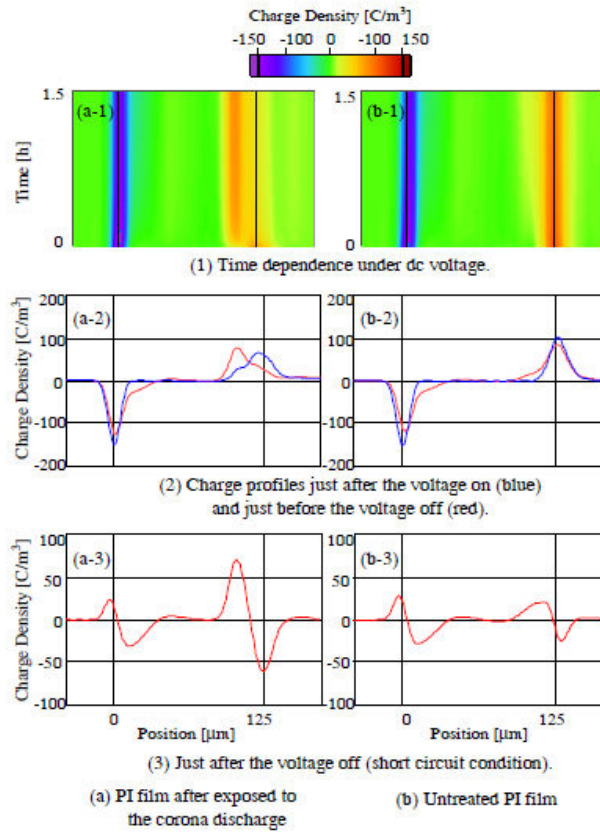


Figure I-42 : Influence des décharges couronnes sur l'accumulation des CE [72]

Dans le but d'évaluer la durée de vie d'une isolation, des essais à long terme ont été mis en œuvre : la tension V a été fixée à des valeurs bien supérieures à la tension d'apparition des décharges sous tension alternative ($1,5 \cdot PDIV$), et pour chacune d'entre elles, les valeurs de l'énergie dissipée mesurées ont été relevées toutes les 30 secondes tout le long de la durée de vie du matériau, ainsi que le temps au bout duquel la rupture s'est manifestée : ainsi (en quelques heures ou jours) une courbe de durée de vie en fonction des différents paramètres a été obtenue. Des essais en températures, pression et humidité ont été réalisés dans [73]. Une augmentation de la température de 50°C entraîne une diminution de la durée de vie d'environ 70% (Figure I-43). Lorsque la pression est augmentée une diminution de l'énergie apparaît, diminution liée à la formation d'une couche de nature conductrice sur la surface vieillie sous DP. La présence des acides oxaliques sur la région affectée par les décharges fournit une certaine protection de courte durée à cause de leur nature conductrice renforçant ainsi la durée de vie [39]. Ainsi, en augmentant la pression, à température ambiante, la durée de vie du PI augmente. Néanmoins, lorsque la température est supérieure à 40°C , l'augmentation de la pression induit des décharges plus énergétiques et par conséquent, une augmentation du taux de dégradation du matériau et une durée de vie plus courte (Figure I-43).

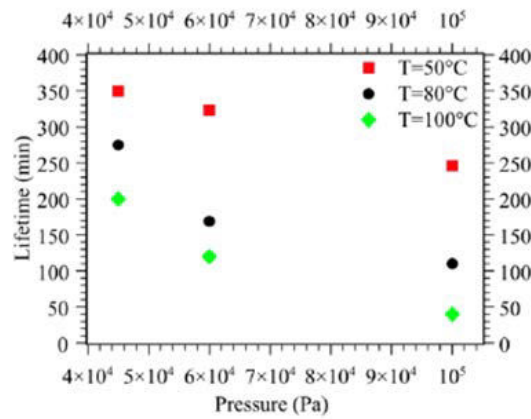


Figure I-43 : Durées de vie en fonction de la température et de la pression sous une tension alternative [73]

L'augmentation du taux d'humidité relative se traduit par une augmentation de la durée de vie bien que les décharges soient plus énergétiques (Figure I-44). Comme précédemment, ce résultat a été interprété par le développement sur la surface vieillie d'une couche conductrice qui diminue l'activité des décharges.

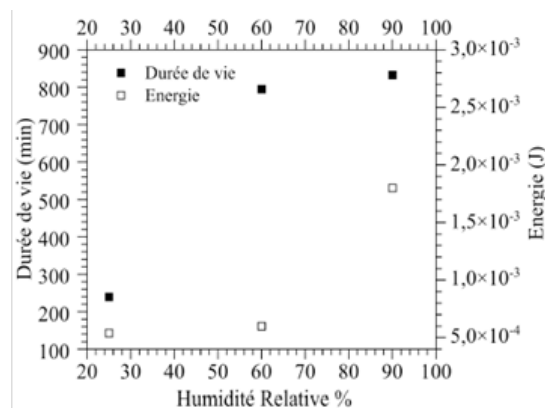


Figure I-44: Durée de vie et énergie moyenne en fonction de l'humidité (HR = 25%, V = 3,5 kV ; HR = 90%, V = 4,1 kV) [39]

I.7 Charges d'espace

I.7.1 Définition

Les matériaux isolants utilisés en électronique sont susceptibles de se charger électriquement. C'est pourquoi lorsqu'un diélectrique est soumis à des contraintes électrique, thermique ou mécanique, il est observé un excès de charges électriques dans certaines régions du matériau. Ces excès de charges peuvent être positifs ou négatifs, en volume ou en surface.

La charge volumique (ou charge d'espace) est un facteur majeur dans le comportement diélectrique des isolants (la fiabilité à haute tension, le facteur de dissipation diélectrique en

fonction de la température et la fréquence). Le rôle de la charge d'espace dans le vieillissement diélectrique des isolants fait l'objet d'études approfondies depuis plus de soixante-dix ans [74], [75].

Il est nécessaire de définir plusieurs termes qui seront utilisés par la suite :

Charges induites : Ces charges sont localisées sur les électrodes et sont dues à la présence de charges dans l'isolant, ou résultent de la polarisation du matériau.

Charges intrinsèques : Charges qui sont présentes dans le matériau avant toutes contraintes. Elles sont issues des composés de base, additifs ou impuretés.

Charges extrinsèques : Charges qui ont été introduites dans le matériau par les contraintes appliquées (traitements ou essais).

Homocharges : Charges d'espace situées à proximité d'une électrode, de même signe que cette électrode (c'est-à-dire charges positives à l'anode, charges négatives à la cathode).

Hétérocharges : Charges d'espace situées à proximité d'une électrode, de signe opposé à cette électrode (c'est-à-dire charges positives à la cathode, charges négatives à l'anode).

I.7.2 Origine

Les charges peuvent avoir plusieurs origines qui sont schématiquement représentées dans la Figure I-45 :

- La génération de charges dans le diélectrique : polarisation des dipôles, porteurs ioniques intrinsèques ou extrinsèques, électro-dissociation d'espèces neutres ;
- La génération de charges aux interfaces : injection de trous à l'anode et d'électrons à la cathode, états de surface, réactions chimiques.

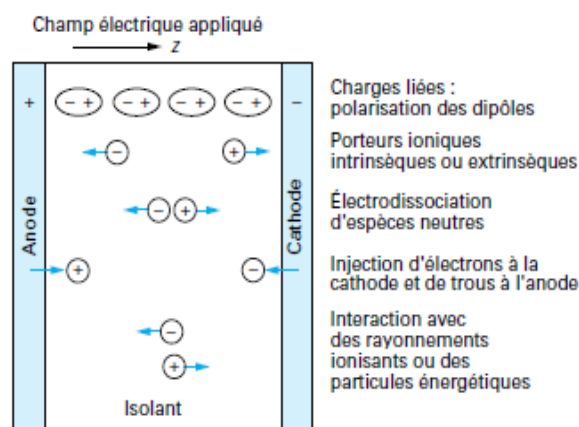


Figure I-45 : Mécanismes de génération des charges électriques dans un isolant entre électrodes [76]

Mis à part les dipôles, la charge intrinsèque ou extrinsèque, peut se déplacer dans le diélectrique. Le déplacement de charges provoque des accumulations de charges et une intensification locale du champ électrique qui peuvent être nuisibles pour les matériaux et les équipements. La formation de charges dans un diélectrique, soumis à une contrainte électrique, peut se décomposer selon trois processus différents :

- 1) La polarisation des dipôles électriques sous l'effet du champ électrique ;
- 2) La migration des charges pour former des hétérocharges aux électrodes ;
- 3) L'injection de charges aux interfaces qui conduit à la formation d'homocharges dans le diélectrique.

D'une manière générale, la présence de charges intrinsèques génère des hétérocharges lorsqu'un champ électrique est appliqué. Les espèces chargées dans le matériau migrent vers l'électrode de signe opposé lorsqu'une tension est appliquée.

Ceci a été mis en évidence à plusieurs reprises dans les nombreux travaux réalisés sur des polymères tels que le polyéthylène et les résines époxydes :

- ✓ Hozumi [77] a détecté des hétérocharges stables à des champs inférieurs à 20 kV/mm qui sont attribuées à la dissociation d'antioxydants ;
- ✓ Ezoe [78] a également montré que des hétérocharges dans une résine époxyde sont issues des groupements acides du matériau et leur formation est favorisée par la présence d'eau dans le matériau. Les charges positives sont alors attribuées aux protons (H^+) et les charges négatives aux espèces conjuguées ($-COO^-$) ;
- ✓ Li [79] n'a pas observé d'hétérocharges dans un polyéthylène réticulé après dégazage, alors qu'il en a observé sur le matériau non traité. Les charges ont été attribuées dans ce cas aux sous-produits résiduels de la réaction de réticulation.

Le phénomène d'injection de charge (sous champ électrique élevé) génère, dans un premier temps, des homocharges, donc localisées à proximité de l'électrode dont elles proviennent.

Des études sur ce phénomène ont également été réalisées :

- ✓ Li a également observé, dans son étude [79], des homocharges injectées à partir des électrodes dans le polyéthylène réticulé après un traitement sous vide.
- ✓ Hozumi [77], [80] a mis en évidence que l'injection de charges aux électrodes peut être favorisée par la présence au préalable d'hétérocharges.

I.7.3 Effets des charges sur le comportement des isolants

La conséquence majeure de la présence de charges d'espace dans le volume d'un diélectrique est la modification de la distribution interne du champ électrique. Quelques exemples qualitatifs des modifications du profil de champ sont représentés par Laurent [76].

Les renforcements locaux de champ électrique peuvent être à l'origine de mécanismes néfastes pour l'isolation, en particulier à l'origine des défauts responsables de la dégradation rapide de l'isolant telles que les DP et les arborescences.

Zhang et ses collaborateurs ont observé que le champ local peut être multiplié par un facteur 5 à 8 au voisinage des électrodes (pour respectivement les interfaces en dehors du diélectrique du câble et à l'intérieur du diélectrique) après de longues polarisations sous contrainte continue [81]. Or un champ électrique renforcé signifie une plus grande énergie des porteurs mobiles qui peuvent donc endommager la structure chimique de l'isolant.

I.7.4 Techniques de mesure

Plusieurs méthodes non destructives de mesure des charges d'espace dans un matériau isolant sont développées depuis 35 ans environ. Ces techniques d'analyse sont toutes basées sur la perturbation de l'équilibre existant entre les forces élastiques et électrostatiques dans le matériau. A la suite de cette perturbation, une réponse du matériau ou du système électrode/matériau pour rétablir cet équilibre est observée.

Ces techniques sont classées selon 3 catégories [82] :

- Les méthodes utilisant la diffusion thermique ;
- Celles utilisant une perturbation mécanique ;
- Et celles utilisant une perturbation électrique.

Holé et ses collaborateurs [82] ont conclu que les informations électriques obtenues à partir des différentes méthodes de mesure sont similaires, et que le choix d'une technique par rapport à une autre dépend essentiellement des propriétés physiques de réponse des matériaux à la contrainte appliquée. Les caractéristiques de ces différentes techniques sont présentées et comparées par Ahmed et Srinivas [83] et par Laurent [76].

Cependant, il existe d'autres techniques de laboratoires non destructives permettant la caractérisation des matériaux. La mesure du potentiel de surface est un outil pratique pour étudier l'injection de charges sur les surfaces isolantes, ainsi que la conduction de surface, la polarisation des échantillons et la neutralisation atmosphérique. Son intérêt principal est qu'une mesure sans

contact peut être réalisée par dépôt de charge (par contact ou au moyen d'une décharge couronne DC) suivi d'une mesure de potentiel à l'aide d'une sonde sans contact. Néanmoins, la limite de cette technique est le manque d'information sur la distribution de la charge en profondeur [84]. La Figure I-46 représente une courbe de principe de déclin (après dépôt de charge) et de retour de potentiel (après neutralisation de la charge de surface résiduelle) obtenue par la mesure du potentiel de surface.

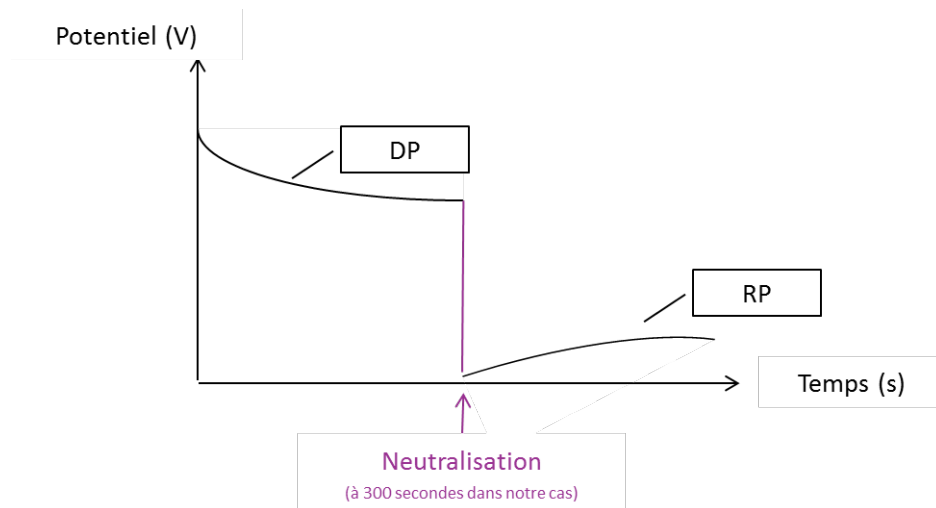


Figure I-46 : Courbe de déclin et retour de potentiel obtenue

I.7.5 Potentiel de surface

I.7.5.1 Les sondes de mesure de potentiel

Il existe plusieurs façons de mesurer le potentiel de surface [85] :

- Sonde de type capacitif, formée d'une plaque sur laquelle on mesure les variations de la charge produite par la charge de surface à étudier. L'influence dépend de la distance à la surface. Le potentiel de la sonde restant proche de zéro, un champ est produit sur la surface de l'échantillon qui dépend de l'éloignement de la sonde et peut donc perturber le phénomène de déclin de potentiel de façon peu reproductible.
- Sonde de type Kelvin, sonde électrostatique fondée sur le principe du condensateur vibrant, permettant l'asservissement de la sonde au potentiel de la surface. L'avantage de cette sonde est la mesure absolue du potentiel en perturbant le moins possible la surface.
- Faisceau d'électrons d'un microscope électronique à balayage, qui permet la mesure du potentiel dans un isolant après l'implantation de charges.

1.7.5.2 Mécanismes de charges de l'isolant

Il existe plusieurs procédés de charge d'un isolant [85] :

- Le contact (liquide ou solide), qui permet de déposer une charge sur la surface du matériau ;
- La décharge couronne, permettant de déposer des ions négatifs ou positifs, qui vont être transférés par des mécanismes décrit par Vance sur le sélénium. L'ion positif transféré va extraire un électron du matériau et va laisser un trou à la surface de l'isolant, ce qui peut impliquer des mécanismes Auger (et créer une paire d'électron trou supplémentaire) si l'énergie d'activation est suffisante [86].
- Le faisceau d'électron, qui permet d'injecter une charge directement dans le volume du diélectrique, avec une certaine énergie. Le parcours de la charge dépendra des propriétés de piégeage du matériau.

1.7.5.3 Le déclin de potentiel

Un isolant chargé présente un certain potentiel, qui, au cours du temps, décroît. Cette décroissance, appelé déclin de potentiel, représente l'aptitude du matériau à évacuer par plusieurs mécanismes cette charge déposée. Les phénomènes physiques intervenant dans ce déclin sont nombreux [83].

Le champ appliqué par les charges déposées en surface oriente les dipôles déjà existants ou crée des dipôles dans le volume qui provoquent la migration des charges opposées vers les interfaces (polarisation interfaciale). La charge déposée en surface peut être neutralisée par les porteurs libres provenant de l'atmosphère entourant le matériau. La charge peut aussi traverser l'interface et pénétrer dans le volume, c'est l'injection de charge. Cette injection dépend de l'électrode utilisée et du champ électrique appliqué. La conduction surfacique est une autre cause du déclin de potentiel. Enfin les phénomènes piézo-électriques peuvent aussi participer à l'évolution du potentiel de surface d'un matériau. La charge déposée exerce une force sur le matériau qui subit une contraction de son volume pouvant générer une charge par effet piézoélectrique [87].

1.7.5.3.1 Polarisation dipolaire

La plupart des matériaux isolants présentent une composante lente de la polarisation dipolaire, qui peut être liée à des restructurations moléculaires internes (comme des réorientations des chaînes polymères) sous l'influence du champ électrique et des phénomènes de polarisation

interfaciale complexes. Ces phénomènes peuvent être caractérisés par une fonction de réponse diélectrique $f(t)$, de telle sorte qu'il existe une relation de convolution entre le potentiel et la charge de l'isolant à un instant donné [85] :

$$q(t) = \frac{S}{e} \int_{-\infty}^t V(\tau) f(t - \tau) d\tau$$

Avec S la surface de l'échantillon et e son épaisseur.

Cette relation montre que le matériau ne réagit pas instantanément aux variations de champ électrique. Si une charge est déposée sur la surface à un instant donné, un créneau de potentiel produit par les processus instantanés de polarisation aura lieu, puis le potentiel diminuera sous l'influence de la polarisation lente (phénomène calculable numériquement par inversion de l'équation).

I.7.5.3.2 *Conduction*

Un isolant de permittivité ϵ , qui présente une conductivité σ , subit un déclin de potentiel dont une composante est dépendante de ces paramètres. Cette composante s'exprime par $\frac{dV}{Vdt} = \frac{\sigma}{\epsilon}$ et sera une exponentielle décroissante de constante de temps σ/ϵ si la conductivité ne dépend pas du champ. A champ élevé, des mécanismes de type Poole-Frenkel pourront conduire à une conductivité dépendant du champ. Adamec et ses collaborateurs donnent une modélisation du déclin selon ces mécanismes [88] .

Les matériaux désordonnés, tels que les polymères, présentent une conduction qui se manifeste surtout sous forme de conduction de surface, en dehors de conditions particulières d'activation (température, champ, rayonnement) [85].

I.7.5.3.3 *Transport de charge dans le matériau*

Plusieurs modèles existent et reposent sur l'hypothèse d'une charge injectée dans le matériau.

1.1.1.1.1. Modèles de type électrostatique

Ces modèles ne considèrent le transport dans le matériau que par le biais d'une mobilité μ (le piégeage et le dépiégeage ne sont pas pris en compte). Le calcul détaillé des équations du déclin, dans le cas général, a été établi par Batra et al [89]. L'idée principale est que, dans le cas d'un champ nul à l'extérieur de l'isolant, la charge s'injecte sous forme de plans successifs qui voient un champ constant pendant toute leur traversée du matériau à vitesse constante [85]. Ainsi, si

l'injection de surface est instantanée, ce modèle prévoit une baisse du potentiel de façon linéaire tant que le front de charge n'a pas atteint la contre-électrode. De plus, il existe une dépendance quadratique de la vitesse de décroissance initiale du potentiel en fonction du potentiel initial. Après le temps de transit du front de charge, la courbe du potentiel en fonction du temps doit présenter un coude, puisque les plans de charge s'injectent de plus en plus lentement. Le dernier plan, à champ nul (par exemple mesure de potentiel de surface avec une sonde Monroe), s'injecte à vitesse nulle, et reste donc sur l'électrode supérieure.

Malgré l'intérêt de plusieurs modèles, leur domaine d'application semble restreint. En effet, aucune publication ne montre un comportement correspondant à ces calculs sur des matériaux isolants réels [85].

1.1.1.1.2. Modèles de type électrostatique avec rétention de surface et émission dépendant du champ

Les phénomènes de cross-over (c'est-à-dire le croisement des courbes de déclin de potentiel observé pour deux matériaux identiques chargés à deux potentiels différents) obtenus sur des courbes de déclin de potentiel ne peuvent pas être expliqués par les modèles précédents. Ainsi, il existe deux régimes successifs [85], l'un à champ élevé, limité par la charge interne (qui peut donner lieu au cross over) et l'autre, lorsque le champ a suffisamment diminué, limité par l'émission de surface. Les modèles de déclin de potentiel peuvent être décrits en ajoutant les concepts de barrière énergétique de surface et de saut de cette barrière assisté par le champ.

1.1.1.1.3. Modèles combinant électrostatique et thermodynamique

La modélisation du déclin de potentiel dans un matériau désordonné nécessite la prise en compte de l'effet du piégeage durant la traversée de la charge, qui va avoir une influence sur l'allure du déclin de potentiel. Plusieurs modèles ont été proposés [85] :

- Premièrement, existence d'une mobilité effective des porteurs de charge mais déterminée par le transport par sauts des niveaux de pièges peu profonds. Le déclin de potentiel associé va tendre vers une valeur constante non nulle (plus proche de la réalité mesurée).
- Ensuite, ajout d'un paramètre d'émission de la charge des niveaux de pièges et ajout du dépiégeage de surface de la charge assistée par le champ suivant le modèle de la section précédente (mobilité effective dépendant du temps).
- Enfin, les modèles plus récents du transport de la charge dans un milieu désordonné se réfèrent au cadre plus général qu'est le transport dispersif, en supposant une distribution énergétique continue des niveaux de piégeage. Une approche simplifiée introduit le

concept d'énergie de démarcation, définie comme $E_d(t) = kT \ln\left(\frac{N_c}{N_t} \frac{t}{\tau_0}\right)$, avec N_c la densité des états de conduction, N_t celle des pièges et τ_0 la durée de vie d'un porteur dans les états de conduction. A un instant t , l'émission des pièges d'énergie inférieure à E_d pourra être négligée et les états d'énergie supérieure pourront être considérés comme en équilibre avec les états de transport. Arkhipov a effectué un calcul analytique du déclin de potentiel suivant cette approche [90]. Il a montré que la représentation $\log\left(\frac{dV}{dt}\right) = f(\log(t))$ tendait vers deux droites de pentes différentes de part et d'autre d'un temps de transit, en considérant une forme exponentielle de la distribution des pièges.

1.1.1.1.4. Modèles purement thermodynamiques : dynamique entièrement contrôlée par le dépiégeage

Dans le cas limite où le temps de transit des porteurs est faible devant leur temps caractéristique de piégeage/dépiégeage, le facteur géométrique dans les modèles peut être complètement retiré : c'est la cinétique du dépiégeage de la charge qui est alors le facteur imposant la forme du déclin de potentiel, et non son déplacement. La stabilité de la charge piégée est proportionnelle à l'exponentielle de la profondeur énergétique des pièges, de sorte que la forme de la courbe de déclin de potentiel peut être considérée comme la conséquence d'une augmentation progressive de la profondeur énergétique moyenne de piégeage des charges. L'énergie de démarcation définie ci-dessus peut ainsi être considérée comme la limite entre les niveaux de pièges profonds remplis et les niveaux peu profonds, vidés depuis le début du déclin de potentiel. En utilisant cette approximation, formulée par Simmons [91], le courant d'émission des pièges dépend de la densité des pièges $N(E_d)$ au niveau $E_d(t)$:

$$I(t) \propto N(E_d(t)) \frac{dE_d}{dt} = N(E_d(t)) \frac{kT}{t} \frac{N_t}{N_c} \tau_0$$

Cette équation permet de déduire que le tracé de $I(t)$, ou de $t dV/dt$, en fonction de $\ln(t)$ permettra d'avoir une image semi logarithmique de la densité $N(E_d)$ de pièges dans le matériau.

1.7.5.4 Le retour de potentiel

Après une neutralisation de la charge encore présente sur le diélectrique, un retour de potentiel (RP) est mesuré entre les deux électrodes. Les deux principales causes physiques expliquant ce retour sont d'une part la relaxation de la polarisation lente de l'échantillon réalisée pendant la charge, et d'autre part, le retour vers les électrodes d'une charge injectée de manière dissymétrique aux interfaces [92].

I.7.5.4.1 *Polarisation dipolaire*

Il existe sur la plupart des matériaux isolants une composante lente des phénomènes de relaxation dipolaire. Gross démontre que cette composante donne naissance à un retour de potentiel [93]. Si un isolant est neutralisé pendant un temps plus court que le temps pendant lequel il a subi une polarisation continue, les phénomènes dipolaires ne seront pas entièrement relaxés. Ainsi, la poursuite de cette relaxation va faire évoluer le potentiel de l'isolant après l'ouverture du court-circuit. Molinié et Llovera [92] montrent le caractère linéaire et symétrique du retour de potentiel lié à la polarisation dipolaire sur les films époxydes.

I.7.5.4.2 *Injection de charge*

Le principal apport théorique dans le domaine de la modélisation du retour de potentiel par la charge injectée est proposé par Coelho [87]. Une manière simple de considérer le phénomène est de supposer que la charge s'injecte dans le matériau sous forme de plans parallèles à la surface. Si un plan de charge unique est injecté à une profondeur λ_0 (σ_{inj}) lors de l'application de la tension, ce plan aura tendance, après neutralisation, à retourner vers l'électrode injectrice sous l'influence de son propre champ, à condition qu'il n'ait pas dépassé le milieu isolant. Le retour de potentiel sera proportionnel à la distance parcourue par le plan de charge ($\lambda_0 \lambda$), lors de son retour vers la surface, selon $V = - \frac{\sigma_{inj}}{\epsilon} (\lambda_0 - \lambda)$. Le retour de potentiel après un temps infini (plan de charge retourné à la surface) est alors proportionnel au produit de la charge injectée par la profondeur d'injection. La dérivée à l'origine du potentiel donne accès à la mobilité.

Ce modèle peut être étendu au cas d'une charge distribuée dans le volume. En effet, les équations décrivant le mouvement de la charge sont toujours utilisables à condition de considérer son centroïde. Cependant, cette approche n'est souvent pas applicable dans la pratique.

Plusieurs compléments peuvent être apportés à ce modèle de plan de charge unique [92] :

- L'injection est partielle puisqu'il existe une barrière énergétique entre les niveaux de surface de l'isolant et les niveaux où la charge y possède une certaine mobilité. Seule une partie de la charge pourra franchir cette barrière et le coefficient d'injection variera avec le champ appliqué.
- Le matériau possède une certaine conductivité qui va introduire un écrantage progressif de la charge.
- Une combinaison des phénomènes d'injection de charge et de relaxation dipolaire.
- La distribution de charge injectée aura une certaine épaisseur, quelle que soit la durée d'injection, qui peut être modélisée par une succession de plans de charge.

- Lors de la neutralisation du matériau, un plan de champ nul va apparaître dans le volume de l'échantillon. Les charges injectées qui auront franchi ce plan continueront leur injection, les autres reviendront. Ce plan nul sépare la distribution des charges, ainsi, un plan de charge unique ne peut être utilisé.

I.8 Conclusion

Ce chapitre bibliographique est organisé en trois parties principales :

- Les matériels et matériaux concernés par l'étude
- Les décharges partielles
- La charge d'espace

La première partie décrit les contraintes électriques actuelles et futures imposés aux systèmes électriques aéronautiques embarqués, les contraintes environnementales et d'exploitation subies par les matériels à bord des avions (et en particulier à bord des hélicoptères). Les principaux matériaux mis en œuvre au niveau des câbles sont décrits, en particulier le PTFE et le PI. Leurs propriétés physicochimiques et mécanismes de dégradation thermique sont rappelés. L'influence de paramètres extérieurs imposés tels que le champ électrique, la température et l'humidité sur leurs propriétés diélectriques est détaillée. Enfin, l'évolution de leurs propriétés lors de leur vieillissement sous contrainte thermique seule ou sous contraintes multiples est également exposée.

On retiendra que :

- La température et l'humidité augmentent tous deux la permittivité et les pertes diélectriques du PTFE ;
- La température augmente la permittivité, les pertes diélectriques et la conductivité et diminue la rigidité diélectrique du PI. L'humidité augmente la conductivité du PI ;
- Le vieillissement thermique du PTFE conduit à une diminution de la permittivité. La conductivité et les PDIV restent stables ;
- Le vieillissement thermique du PI conduit à une diminution de la conductivité et de la rigidité diélectrique sous air et à une augmentation de la permittivité et du facteur de perte.

La deuxième partie est consacrée aux rappels théoriques et pratiques sur les décharges électriques, en particulier sur les décharges partielles. Les principes physiques régissant leur

amorçage et leur développement est rapidement décrit. Dans le cas de décharges produites sous champ homogène, la loi de Paschen est présentée, illustrée, et l'influence de la température sur sa courbe caractéristique est discutée. Une classification des différents types de décharges partielles est proposée. Les principales méthodes de détection de décharges partielles sont rappelées. Enfin, des exemples de résultats de vieillissement de matériaux polymères sous décharge partielles sont présentés.

La dernière partie porte spécifiquement sur la charge d'espace. Son origine et son effet sur le comportement des isolants est rappelé. Des apports théoriques sur les potentiels de surface et leur interprétation physique sont proposés. Enfin, les techniques de mesure, en particulier de déclin et de retour de potentiel de surface, sont présentées.

CHAPITRE II : Matériel et méthodes

II.1 Introduction

Dans le but de simuler l'exposition prolongée des câbles à un environnement aéronautique dans un laps de temps court, plusieurs vieillissements accélérés ont été réalisés. Il s'agit de vieillissements thermiques, avec ou sans humidité et avec ou sans application d'un champ électrique. Pour caractériser l'effet des vieillissements, un certain nombre de mesures ont été effectuées :

- des mesures physicochimiques sur les matériaux d'isolation,
- de l'imagerie radiographique des câbles,
- des mesures de décharges partielles sur les câbles,
- des mesures de potentiel de surface aux bornes du système d'isolation électrique des câbles.

Afin de tester l'endurance des câbles aéronautiques aux hautes tensions, plusieurs câbles ont été étudiés. Ils sont décrits dans une première partie. Les vieillissements et les méthodes d'analyse sont détaillés dans la suite de ce chapitre.

La principale contrainte limitant le choix des techniques de caractérisation s'est révélée être la géométrie des échantillons. Ainsi, la courbure des échantillons n'a pas permis de mettre en œuvre l'analyse thermomécanique (TMA) qui permet de mesurer aisément et rapidement le changement de dimension de l'échantillon (expansion, retrait, le mouvement, etc.) en fonction de la température, du temps et de la force appliquée. Cette technique est donc souvent utilisée pour confirmer la température de transition vitreuse et mesurer les coefficients de dilatation thermique. De même, la microscopie acoustique à balayage (Scanning Acoustic microscopy - SAM) est utilisée pour caractériser la structure interne d'une pièce et notamment ses interfaces à l'aide d'ultrasons. Elle permet de détecter des initiations de décollement ou la présence de délaminations, à des épaisseurs inférieures au micron [94]. Cependant, le microscope disponible ne permettait la mesure que sur des échantillons plans en raison des positions relatives du détecteur et de l'émetteur.

Les tentatives d'aplanissement sous une contrainte mécanique lente et d'enrobage (technique utilisée pour les coupes micrographiques) des échantillons n'ont pas permis d'obtenir des mesures pertinentes par la mise en œuvre de ces deux techniques.

II.2 Câbles étudiés

Différents câbles ont été analysés lors de cette étude. Il s'agit de câbles unipolaires, avec une âme au potentiel, recouverte d'un ou plusieurs isolants, sans blindage externe :

- Les câbles, dénommés DR par les industriels, sont des câbles hybrides Polyimide (PI)/Polytétrafluoroéthylène (PTFE) avec une âme en cuivre (ou cuivre nickel plaqué). D'après les normes aéronautiques ([1] et [2]), ils sont utilisés dans les systèmes électriques avec une tension de 115 V dans une gamme de températures d'utilisation de -55°C à +260°C.
- Les câbles, dénommés AD par les industriels, sont des câbles hybrides PI/PTFE avec une âme en alliage d'Al plaqué Ni ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni. D'après les normes aéronautiques ([95], [96]), ils sont utilisés dans les systèmes électroniques fonctionnant à 115 V AC et 230 V AC en zone pressurisée dans une gamme de températures allant de -65°C à +230°C.
- Les câbles, dénommés DZ par les industriels, sont des câbles hybrides PI/PTFE avec cuivre ou alliage de cuivre plaqué nickel. D'après les normes aéronautiques ([2] et [97]), ils sont utilisés dans les systèmes électroniques fonctionnant jusqu'à 230 V AC dans une gamme de températures allant de -65°C à +260°C.
- Les câbles, dénommés AZ par les industriels, sont des câbles hybrides PI/PTFE avec une âme en alliage d'Al plaqué Ni ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni. Selon la norme [98] avec une tension de 115 V AC et des températures d'utilisation allant de -65°C à 180°C.
- Câble TE pour lequel nous n'avons pas pu obtenir d'informations.

Le Tableau I-1 résume les câbles concernés par l'étude et leurs spécificités.

Tableau II. 1 : Câbles concernés par l'étude et leurs spécificités

Dénomination	Isolation	Âme	Tension spécifiée (normes)	Gamme de température
DR	PI/PTFE*	Cuivre (ou cuivre nickel plaqué)	115 V AC	-55°C à 260°C
AD	PI/PTFE*	Alliage d'Al plaqué Ni (ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni)	115 V AC 230 V AC en zone pressurisée	-65°C à 230°C
DZ	PI/PTFE*	Cuivre (ou alliage de cuivre avec Ni plaqué)	230 V AC	-65°C à 260°C
AZ	PI/PTFE*	Alliage d'Al plaqué Ni (ou Cu recouvert d'Al plaqué Ni)	115 V AC	-65°C à 180°C
TE	-	Cuivre plaqué Ni	-	-

*Données fournisseur

Le câble DR16 (16 correspondant à la taille de la gauge soit le diamètre de l'âme du câble) a été étudié de façon plus approfondie ; aussi une description plus complète est donnée. Il est constitué de deux rubans de polymères (Figure II- 1) : un ruban PTFE à l'extérieur du câble d'une épaisseur de 195 μm et d'une couche en PI, située entre le PTFE et l'âme du câble, en sandwich entre deux couches de polymères fluorés de type FEP. L'épaisseur de cette dernière couche est de 30 μm . Le FEP sert de colle entre les deux couches de polymères (PTFE et PI) qui sont chacune leur tour rubanée et frittée sur une âme multibrins (chaque brin mesure 290 μm de diamètre) en cuivre plaqué nickel. L'épaisseur totale du système est de 225 μm et le diamètre externe du câble est de 1,95 mm.

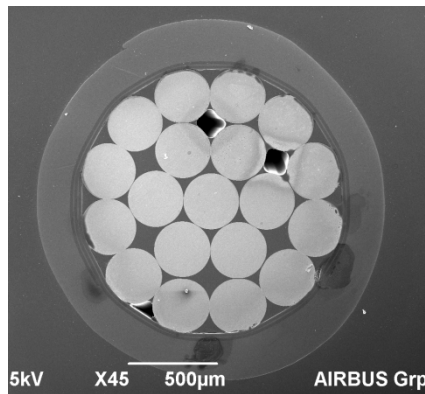


Figure II- 1: Photo MEB d'une coupe du câble étudié

Les tensions spécifiées par les fournisseurs sur le câble DR16 sont :

- 115 V AC RMS (phase-neutre) ou 200 V AC RMS (phase-phase) dans les zones non pressurisées,
- 230 V AC RMS (phase-neutre) / 400 V AC RMS (phase-phase) dans les zones pressurisées.

Nous étudions des câbles monophasés en nous intéressant aux valeurs crêtes. Ainsi les valeurs de tension de fonctionnement sont 160 V crête dans les zones non pressurisées et 325 V crête pour les zones pressurisées.

II.3 Les vieillissements

II.3.1 Les conditions

3 types de vieillissements thermiques ont été engagés : vieillissement en chaleur sèche, vieillissement en chaleur humide et vieillissement en cycles de température.

Les vieillissements en chaleur sèche ont été effectués dans des fours portés à 240°C, température maximale à laquelle pourraient être soumis les câbles à proximité des tuyaux chauds situés dans la zone mécanique (indication Airbus Helicopters). Ils ont été réalisés avec ou sans tension appliquée : 0 V, 540 V DC (tension envisagée dans un futur proche) et 1000 V DC (tension maximale envisagée).

Les vieillissements en chaleur humide ont été lancés selon un protocole utilisé classiquement en aéronautique dans des enceintes climatiques à 85°C / 85 % HR (nommée VH pour vieillissement humide). De plus, ce vieillissement a été effectué avec et sans tension appliquée (0 V et 1000 V DC).

Enfin, les vieillissements en cycles de température, nommés VRT (pour Variation Rapide de Température), ont été effectués dans des enceintes permettant de cycliser entre -55°C et $+175^{\circ}\text{C}$ avec une rampe de $20^{\circ}\text{C}/\text{min}$ de -20°C à $+125^{\circ}\text{C}$; un cycle de température est représenté en Figure II- 2. Ces cycles ont été imposés avec et sans tension appliquée (0 V et 1000 V DC).

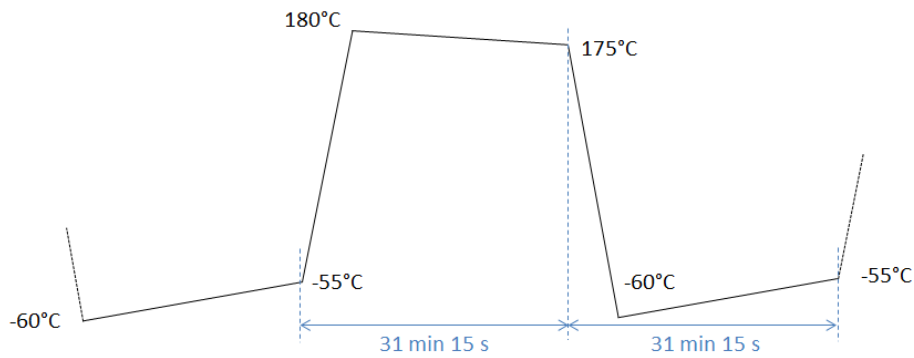


Figure II- 2: Courbe du cyclage thermique

II.3.2 Mise en place des vieillissements

Le câble est enroulé sur un support métallique (Figure II- 3) permettant d'obtenir une contrainte mécanique, telle qu'elle peut être rencontrée sur une installation réelle embarquée dans l'hélicoptère. La contrainte mécanique maximale est définie par le rayon de courbure minimum égal à trois fois le diamètre du câble (soit 5,85 mm pour un câble DR16). Les câbles enroulés sur chaque support mesurent environ 2,5 m. Le câble enroulé sur son support est introduit en enceinte (chaleur sèche, chaleur humide ou VRT) pour les vieillissements. Périodiquement, le support est extrait de l'enceinte et utilisé pour appliquer un champ électrique lors des mesures de décharges partielles : l'âme du câble est alors alimentée électriquement alors que le support est connecté à la terre.

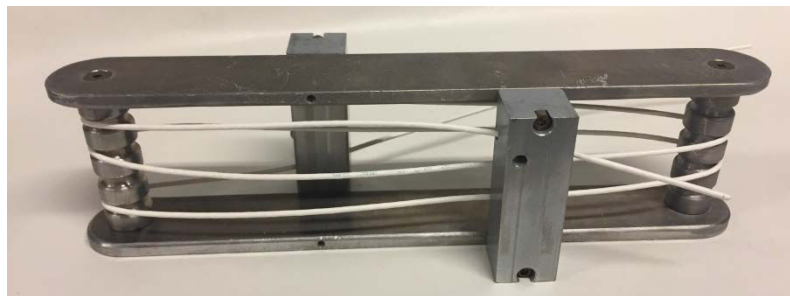


Figure II- 3: Câble sur support métallique

Lorsque les essais de vieillissement accéléré sont réalisés sous tension, la quasi-totalité du câble (excepté les extrémités) est insérée dans une tresse métallique ; l'ensemble est enroulé sur le support métallique. La tension est appliquée sur l'âme du câble ; la tresse métallique et le support sont connectés à la terre (Figure II- 4). L'objectif est d'appliquer un champ électrique le plus homogène possible sur toute la longueur du câble. Hors enceinte de vieillissement, cette configuration est conservée pour les mesures de décharges partielles.



Figure II- 4: Câble sous vieillissement électrique

II.4 Mesures physicochimiques

Des analyses physicochimiques ont été réalisées afin de vérifier la tenue de l'isolant en fonction du temps de vieillissement et d'y observer ou non des modifications structurales ou des propriétés physicochimiques.

II.4.1 FTIR

La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (ou FTIR pour son acronyme en anglais), est une technique qui permet d'étudier la structure chimique d'un composé par les vibrations des liaisons chimiques. Le spectromètre utilisé est un Nicolet iS50, qui utilise une technique de réflectance totale atténuée (ATR - Attenuated Total Reflectance) avec un cristal germanium.

Parmi les techniques de la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier, la technique ATR est l'une des plus utilisées. L'ATR est l'une des techniques qui a subi la plus forte évolution ces dernières années. Elle permet d'analyser spécifiquement la surface des matériaux. Le principe consiste à mettre en contact un cristal (ZnSe, Si ou Ge dans notre cas) avec l'échantillon à

analyser. Le faisceau infra-rouge circule dans le cristal. Si l'indice de réfraction du cristal est supérieur à celui de l'échantillon, alors le faisceau subit des réflexions totales au-delà d'un certain angle d'incidence à l'interface échantillon/cristal.

En réalité une onde, dite onde évanescente, émerge du cristal et est absorbée par l'échantillon. Ce système permet d'amplifier l'intensité du signal transmis et d'obtenir des spectres d'absorption de la surface sur une profondeur qui dépend du cristal, de l'angle d'incidence et du matériau. L'exemple du spectre FTIR du polypropylène est donné en Figure II- 5.

La profondeur analysée par l'ATR est de l'ordre de 1 à 2 μm . Notons toutefois que l'ATR nécessite un contact intime entre le matériau analysé et le cristal. Des modifications de la rugosité et/ou de la structure du polymère induisent une variation de l'épaisseur analysée, et donc de l'intensité du signal. C'est pourquoi la sensibilité des spectres obtenus par l'ATR est généralement plus faible que celle des spectres obtenus par transmission classique.

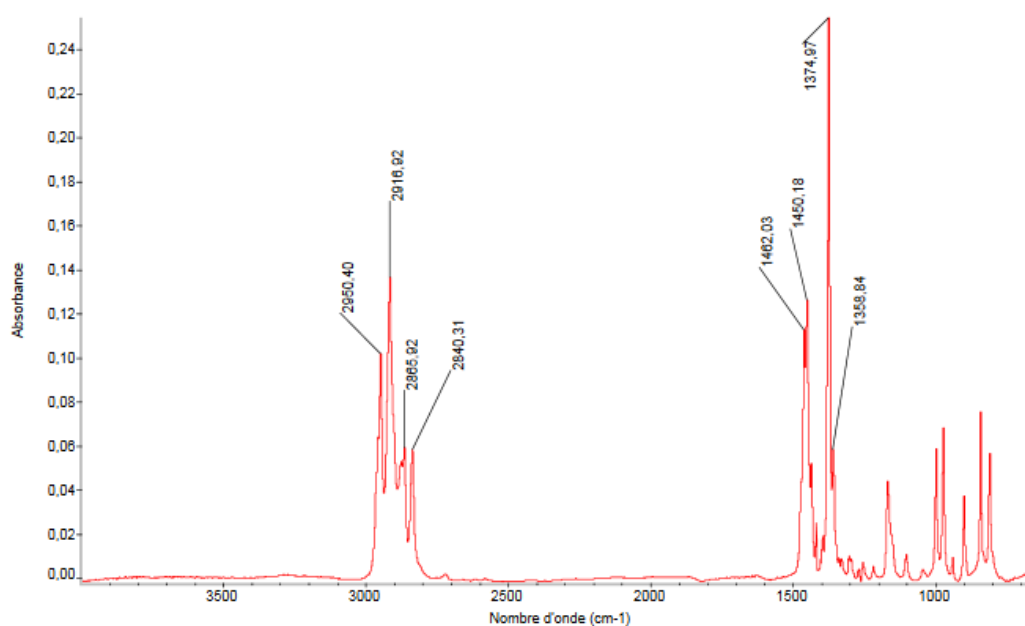


Figure II- 5 : exemple de spectre FTIR-ATR du polypropylène [99]

Dans notre cas, les câbles sont dénudés et l'isolant est scindé en deux parties pour pouvoir serrer chaque face une à une horizontalement contre le cristal.

II.4.2 DSC

La calorimétrie différentielle à balayage (DSC - Differential Scanning Calorimetry) est une technique d'analyse thermique. Elle mesure les différences des échanges de chaleur entre un

échantillon à analyser et une référence (l'indium dans notre cas) [100]. Cette technique permet de déterminer les transitions de phase à l'aide de la température de transition vitreuse, les températures de fusion et de cristallisation et les enthalpies de réaction (pour connaître les taux de réticulation de certains polymères). Deux équipements ont été utilisés : Q2000 et Q200 de TA Instruments.

Les essais ont été réalisés sous azote avec 3 cycles de la façon suivante :

- Pente de 10°C/min de 25°C à 380°C puis de 380°C à 25°C avec la même pente ;
- Isotherme de 5 min à 25°C ;
- Pente de 10°C/min de 25°C à 380°C puis de 380°C à 25°C avec la même pente ;
- Isotherme de 5 min à 25°C ;
- Pente de 10°C/min de 25°C à 380°C puis de 380°C à 25°C avec la même pente.

Ceci permettant d'obtenir de meilleures informations (meilleure définition des pics), notamment en le libérant des différentes contraintes que le matériau a vécu (découpe, conditionnement...).

II.4.3 ATG

L'analyse thermogravimétrique (ATG) est une technique d'analyse thermique qui consiste à mesurer la variation de masse d'un échantillon en fonction du temps, pour une température ou un profil de température donné. Cette technique permet d'obtenir la température de dégradation et d'étudier la cinétique d'oxydation. L'appareil utilisé est un Q500 de TA Instruments.

Il existe différentes formes de profils masse / température comme l'illustre la Figure II- 6 [101]. Le profil :

- 1 ne présente pas de variation de masse (fusion ou autre changement qui a pu avoir lieu mais mis en évidence par d'autres techniques type DSC) ;
- 2 présente une perte de masse rapide à basse température. Souvent caractéristique d'une évaporation ou déshydratation ;
- 3 présente une décomposition de l'échantillon en une seule étape. On peut définir la limite de stabilité en fonction de la température et en déduire des paramètres cinétiques pour la réaction de décomposition ;
- 4 présente une décomposition en plusieurs étapes. Un ensemble de températures de limite de stabilité peut être défini pour chaque étape ;

- 5 présente une prise de masse liée à la réaction de l'échantillon avec l'atmosphère (exemple d'un métal qui s'oxyde avec formation d'une couche d'oxyde à la surface) ;
- 6 présente un ensemble de réactions donnant lieu à une prise de masse, puis à une perte de masse (exemple : oxydation suivie de la décomposition de l'oxyde à plus haute température).

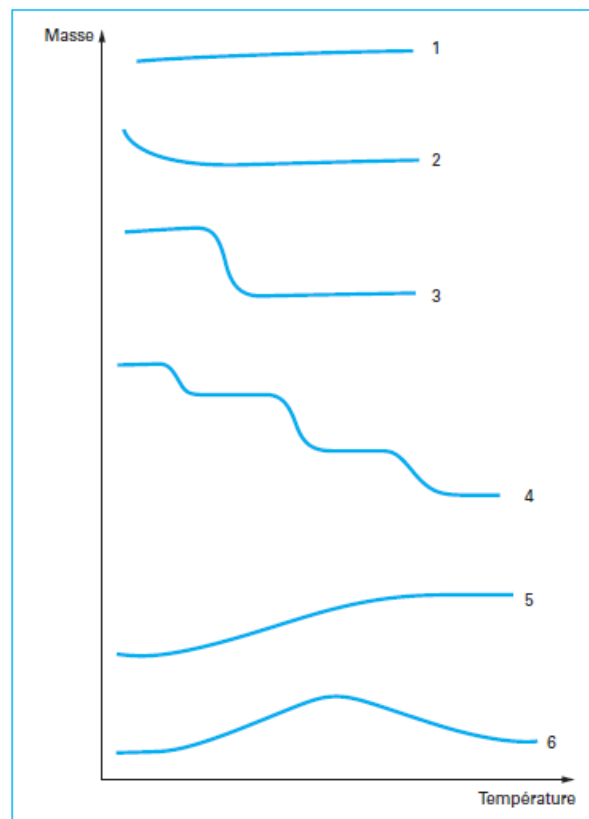


Figure II- 6 : Différentes familles de profils observés en thermogravimétrie [101]

Les essais ont été réalisés sous azote avec une pente de 10°C/min jusqu'à 900°C.

II.4.4 Radiographie à rayon X

La radiographie à rayon X est une technique non destructive, utilisée pour obtenir une image d'un échantillon par transmission des rayons X (exemple en Figure II- 7). Elle consiste à faire traverser le matériau par un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde (rayon X dans notre cas) et à recueillir les modulations d'intensité du faisceau incident sous forme d'une image sur un récepteur surfacique de type film photographique argentique ou capteur électronique de type amplificateur de brillance ou autre (détecteur numérique dans ce cas)

[102]. Les câbles sont placés tels quels dans l'enceinte du Yxlon Y. Cheetah afin d'obtenir des images en 2D.

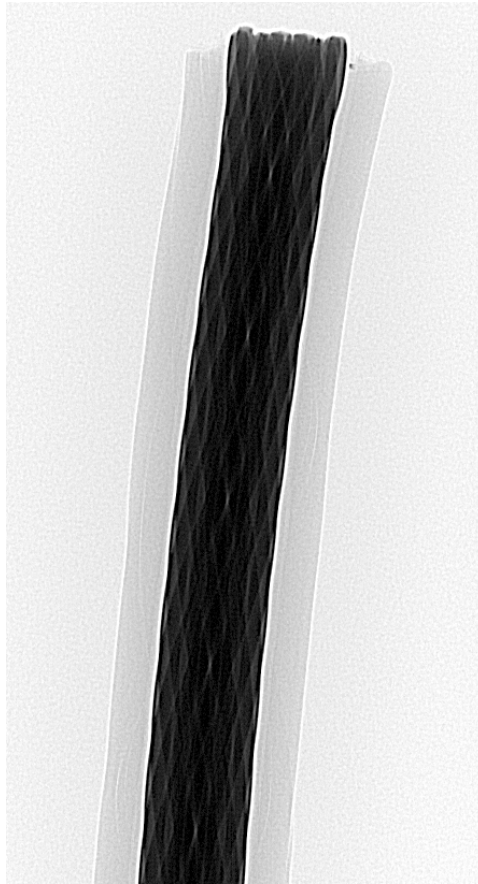


Figure II- 7 : image d'un câble DZ16 par radiographie X

II.5 Banc de mesure décharges partielles

II.5.1 Méthode générale

Le principe de mesure de décharges partielles consiste à imposer au système d'isolation électrique (SIE) du câble un champ électrique en appliquant à son âme une tension et en imposant à sa périphérie sur une section déterminée un potentiel nul au moyen d'une électrode de masse connectée à la terre.

L'ensemble a été introduit dans une enceinte étanche munie de traversées haute tension dans laquelle, à partir d'air ambiant, la pression pouvait être ajustée entre 10 mbar et la pression atmosphérique.

Il a été choisi d'imposer à l'âme du câble une tension alternative sinusoïdale 50 Hz au moyen d'un ensemble constitué par un générateur de fonction Fluke PM5136 et un amplificateur haute tension Trek modèle 20/20C HS.

La tension appliquée a été relevée à l'aide d'une sonde Tektronix P6015A (75 MHz de bande passante - rapport 1 V : 1000 V) et le courant de décharge a été mesuré au niveau du connecteur de mise à la terre de l'électrode de masse à l'aide d'un transformateur de courant rapide Tektronix CT1 (1 GHz de bande passante – 350 ps de temps de montée – rapport 5 mV : 1 mA – muni d'un adaptateur 50 Ω). Le choix du capteur de courant a été motivé par le fait que dans cette gamme de pression, des impulsions de courant de faible durée (de l'ordre de 10 ns à 1 μ s) sont associées au développement des décharges. L'acquisition des signaux de tension et de courant a été effectuée au moyen d'un oscilloscope numérique rapide Tektronix MDO 3054 (500 MHz de bande passante et 2,5 GS/s). La détection de la première impulsion de courant a été utilisée pour relever la tension d'apparition des décharges (*partial discharge inception voltage* - PDIV) correspondant à la valeur instantanée du signal sinusoïdal appliqué. En régime de décharge établi (*repetitive partial discharge inception voltage* - RPDIV), c'est la valeur crête de la tension appliquée qui a été retenue (Figure II- 8).

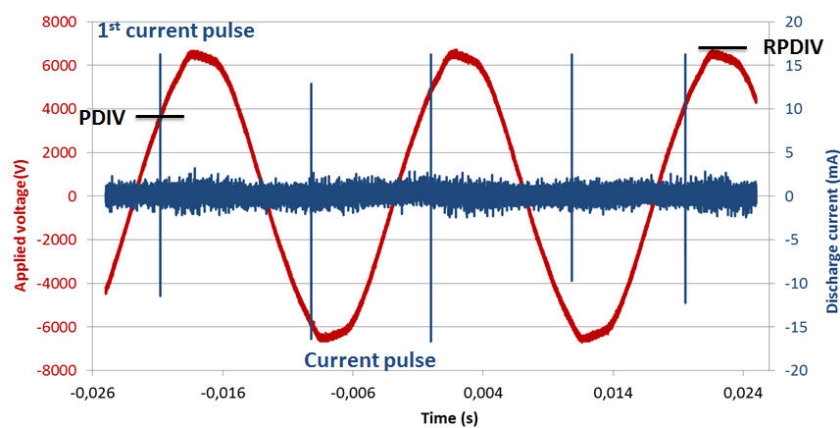


Figure II- 8: Oscillogramme présentant les signaux de tension appliquée, de courant de décharge (impulsions) et illustrant les mesures de tension PDIV et RPDIV.

Un dispositif analyseur de décharges partielles Omicron MPD 600 a également été utilisé, mettant en œuvre un coupleur capacitif d'une valeur de 1,1 nF dans un montage parallèle par rapport à l'objet sous test. Des diagrammes « $\phi/Q/N$ » (phase par rapport à la tension / charge apparente / occurrence des événements de décharge) ont ainsi été obtenus, permettant d'identifier le type de décharge.

II.5.2 Méthode sur support

Au cours des vieillissements, des mesures de décharges partielles ont été régulièrement réalisées sur l'ensemble constitué par le câble enroulé sur son support. Dans le cas de

vieillissements réalisés sans contrainte électrique, seules les parties de câble en contact directe avec le support métallique étaient testées. En revanche, dans le cas de vieillissements réalisés avec contrainte électrique, et donc avec un câble muni d'une tresse métallique externe, le câble était testé sur (quasiment) toute sa longueur. Les mesures ont été réalisées dans l'air en enceinte étanche contrôlée en pression (Figure II- 9).

Périodiquement, une éprouvette de câble de 60 cm de longueur a été prélevée pour effectuer des mesures physicochimiques, des mesures électrostatiques, ou encore des mesures complémentaires de décharges partielles.



Figure II- 9: Support de vieillissement portant le câble introduit dans l'enceinte étanche pour mesures de décharges partielles

Périodiquement, un échantillon de câble de 60 cm de longueur a été prélevé pour effectuer des mesures physicochimiques, des mesures électrostatiques, ou encore des mesures complémentaires de décharges partielles. C'est ce dernier type de mesure qui est décrit dans la section suivante.

II.5.3 Méthode avec électrode de masse tubulaire

Cette méthode vise à effectuer des mesures identiques sur les câbles quel que soit le type de vieillissement. Un échantillon de câble (36 cm de longueur) neuf ou vieilli est inséré dans un tube métallique (5 cm de longueur - 2,4 mm de diamètre interne pour les câbles DR16) dont les arêtes ont été arrondies (Figure II- 10).

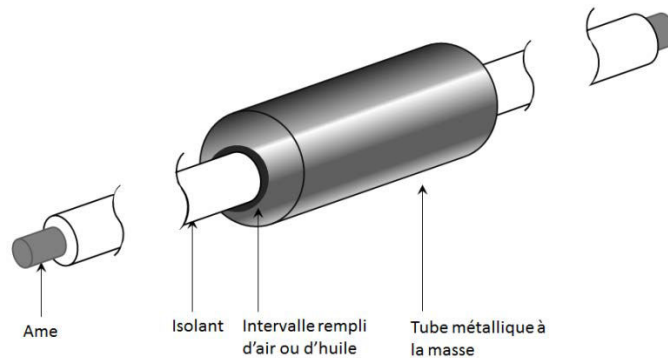


Figure II- 10: Modèle câble dans le tube

Une tension sinusoïdale 50 Hz est imposée à l'âme du câble, alors que le tube métallique est connecté à la terre. Le champ électrique est donc appliqué au système d'isolation sur la fraction de câble insérée dans le tube (soit sur une longueur de 5 cm). Comme pour la méthode sur support, l'ensemble constitué par le câble inséré dans le tube de masse est introduit dans l'enceinte étanche permettant d'ajuster la pression. Les mesures électriques sont identiques.

Pour certaines mesures, la section de câble insérée dans le tube et le tube ont été immergés dans de l'huile isolante (huile synthétique Panolin Transfosynth 2 - tension disruptive (IEC 2.5 mm) : 60 kV). L'huile a été préalablement dégazée par mise sous basse pression (10 mbar) pendant une durée supérieure à 1 heure. L'immersion dans l'huile a pour but d'éliminer les décharges externes, susceptibles de se produire entre la face externe du système d'isolation et la face interne du tube (électrode de masse) et ainsi de mettre en évidence des décharges internes dans le câble.

Un premier dispositif expérimental a été réalisé, dans lequel le câble était inséré dans le tube de masse préalablement plongé dans l'huile. Cette procédure était rendue nécessaire par le fait d'éviter la présence de toute bulle de gaz entre la face externe du câble et la face interne du tube. Un cliché du dispositif et le schéma de principe associé sont présentés en Figure II- 11.

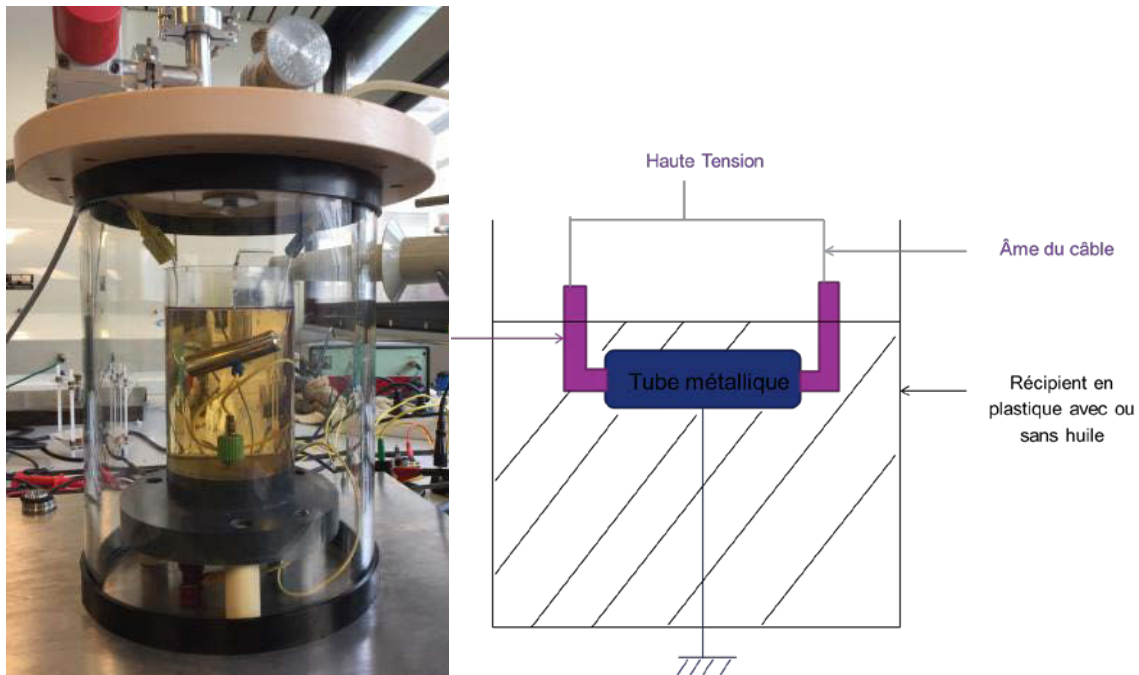


Figure II- 11 : Photo à gauche et schéma à droite du premier dispositif expérimental

Toutefois, cette procédure conduisait à mettre en contact l'huile isolante et une des extrémités du câble. Ce contact risque de produire une infiltration et une migration par capillarité de l'huile dans la zone d'étude. Ce risque a été mis en évidence par des mesures de valeurs de PDIV et RPDIV anormalement élevées. Un autre système a donc été réalisé, permettant la même fonction de prévention des décharges externes, d'élimination des bulles de gaz dans la zone d'étude, sans toutefois risquer de souiller l'âme du câble avec de l'huile. Ce système est décrit en Figure II- 12.

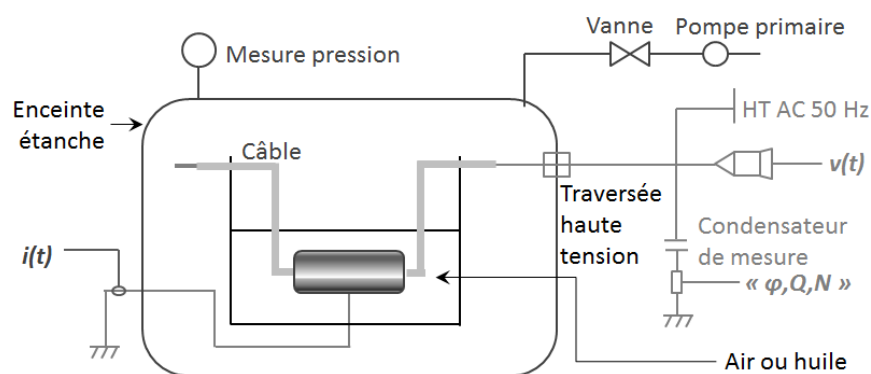


Figure II- 12: Dispositif expérimental global

A noter que dans ces deux dispositifs, les extrémités du câble émergent de l'huile et sont donc soumises aux variations de pression imposées dans l'enceinte étanche.

II.5.4 Modèle fil/plan

Dans l'objectif d'identifier les types de décharges, et en particulier les décharges internes susceptibles de se produire au niveau des fils de l'âme du câble, un dispositif expérimental annexe a également été utilisé. Il s'agit d'un modèle plan du câble constitué par un fil d'acier inox de 100 μm de diamètre disposé en regard d'une plaque isolante (résine époxyde armée de fibres de verre de 1,55 mm d'épaisseur) dont une partie de la face opposée est métallisée pour connexion à la terre. Des mesures mettant en œuvre l'analyseur de décharges partielles ont ainsi été effectuées sur toute la gamme de pression explorée en appliquant la tension alternative au niveau du fil. Un schéma du modèle est donné en Figure II- 13. Un exemple de diagramme $q/Q/N$ de décharge obtenu sur ce système à 300 mbar est donné en Figure II- 14

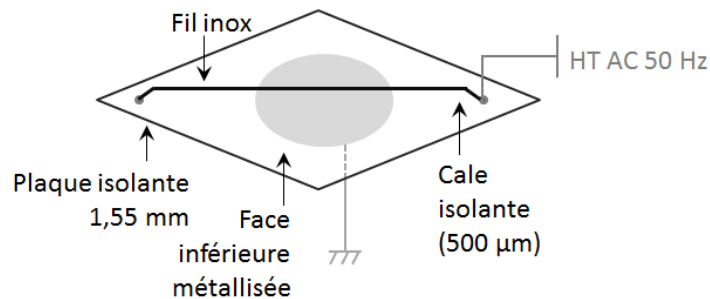


Figure II- 13: Modèle Fil/plan

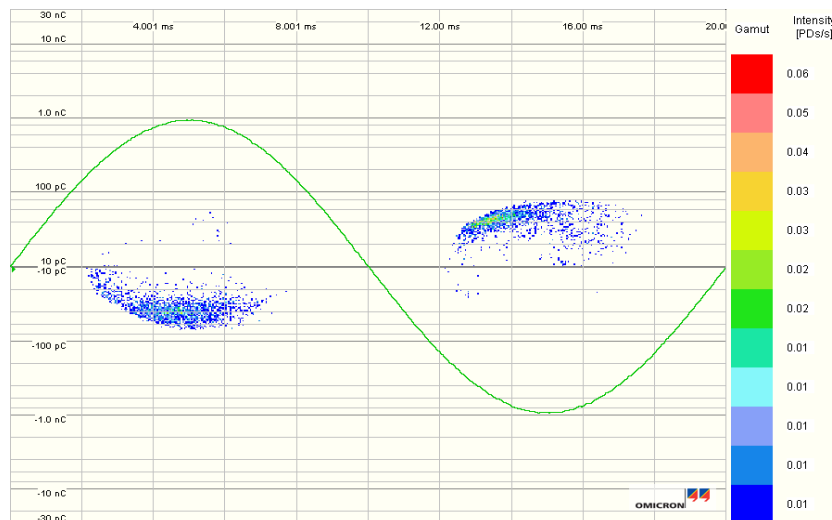


Figure II- 14 : Diagramme $q/Q/N$ de décharge en géométrie plane fil/plan (300 mbar-1,2 kV crête)

II.6 Banc de mesure de potentiel de surface

Des éprouvettes ont été réalisées à partir d'échantillons de câbles d'une vingtaine de centimètres de long, équipés d'une gaine externe tressée et connectée à la masse, comme le représente la Figure II- 15. L'âme du câble est connectée à une électrode rectangulaire horizontale, en prenant soin de maintenir l'ensemble de cette électrode centrale le plus loin possible de toute autre surface métallique pour réduire les influences électrostatiques externes. La capacité parasite entre l'âme du câble et la terre est alors inférieure à 0,5 pF.

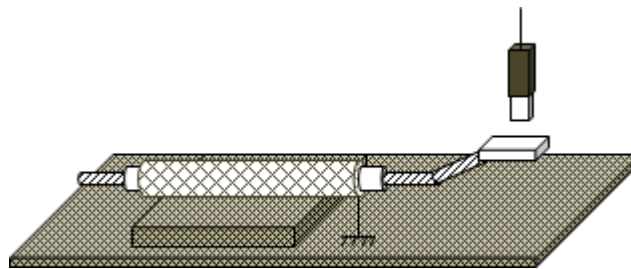


Figure II- 15: Schéma du câble en mesure

La capacité du câble ainsi préparé est de l'ordre de 50 pF. Elle est chargée sans contact à un potentiel connu (ici ± 450 V ou ± 2000 V) au moyen d'un système à décharge corona placé en regard de l'électrode horizontale, puis transférée sous la sonde de potentiel raccordée au voltmètre électrostatique, réglée pour être positionnée face à cette électrode. Le déclin de potentiel est ensuite mesuré pendant 300 s, avant une neutralisation rapide (1 s) par corona de signe opposé. Une mesure de retour de potentiel est alors effectuée durant 300 s. Une photo du dispositif expérimental est donné Figure II- 16.

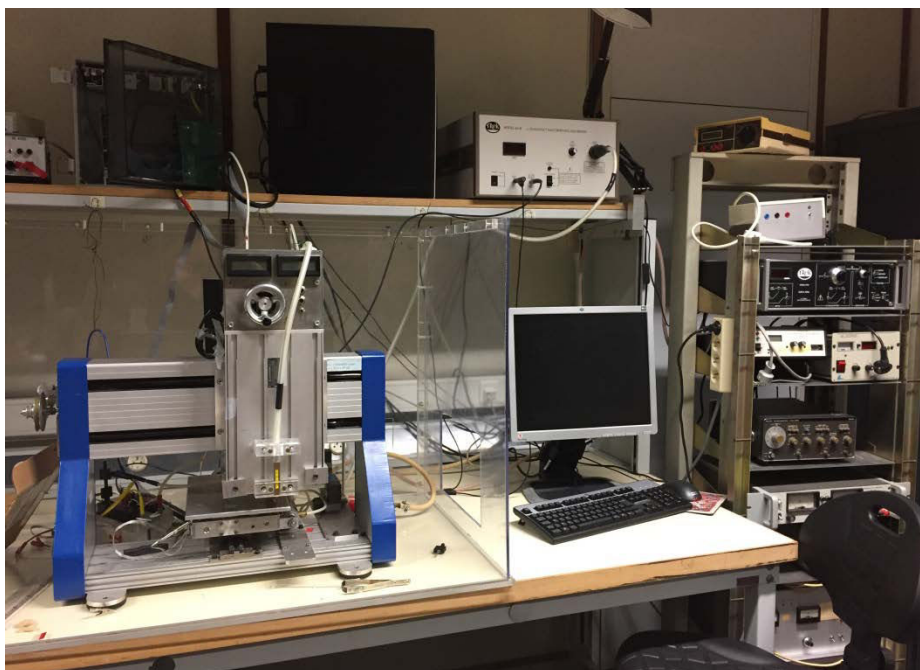


Figure II- 16: Cliché du dispositif expérimental

II.7 Conclusion

Ce chapitre présente tous les câbles qui ont été soumis à différents vieillissements (thermiques et humide avec ou sans tension). Le câble DR16 est décrit plus précisément car il a été étudié de façon plus approfondie en termes de caractérisation en DP et en Potentiel de surface. Les différentes méthodes d'analyse utilisées (physicochimiques, DP, potentiel de surface) sont aussi décrites. Les chapitres suivants vont décrire les résultats obtenus.

**CHAPITRE III : CARACTERISATION
PHYSICOCHIMIQUE ET ETUDE DU COMPORTEMENT
VIS-A-VIS DES DECHARGES PARTIELLES DES CABLES
NEUFS ET VIEILLIS**

III.1 Introduction

Le câble étudié a été présenté dans le chapitre précédent, de même que les techniques et les différents moyens d'essai mis en œuvre pour la caractérisation du câble neuf ou vieilli. Les résultats de cette caractérisation vont être exposés dans ce chapitre.

Il s'agira de différentes propriétés physico-chimiques du système d'isolation électrique du câble, ainsi que de mesures de DP obtenues sur le support et avec le dispositif à électrode de masse tubulaire. Une modélisation électrostatique sera proposée afin d'interpréter les résultats obtenus et de valider les différentes hypothèses concernant la localisation des décharges.

Dans un premier temps, cette caractérisation portera sur le câble neuf. Puis, les résultats obtenus sur les DP seront présentés au cours et après différents vieillissements :

- vieillissements thermiques statiques (240°C) avec ou sans champ électrique imposé,
- vieillissements thermiques dynamiques (VRT) sans champ électrique.

De plus les propriétés physicochimiques seront analysées au cours et après les vieillissements. L'influence des vieillissements sur la structure de l'isolation, ainsi que sur ses différentes propriétés sera alors discutée.

III.2 Propriétés du câble DR16 à t0

III.2.1 Propriétés physicochimiques

Afin d'évaluer l'impact des différents types de vieillissement accéléré sur le système d'isolation électrique des câbles, il est nécessaire d'avoir une caractérisation initiale la plus complète possible. Pour ce faire, différentes techniques présentées dans le chapitre précédent ont été mises en œuvre.

III.2.1.1 FTIR

L'isolant est composé de deux couches de polymères (PTFE + PI en « sandwich » entre du polymère fluoré PFA et FEP) quasiment impossible à séparer (Figure III - 1). Ainsi les deux faces de l'isolant ont été analysées par spectroscopie infra-rouge. La face en contact avec l'âme conductrice (PI + polymère fluoré) est nommée couche interne et un spectre FTIR est donné en Figure III - 2. La couche en contact avec l'extérieur (PTFE) est nommée couche externe et un spectre FTIR est représenté en Figure III - 3.

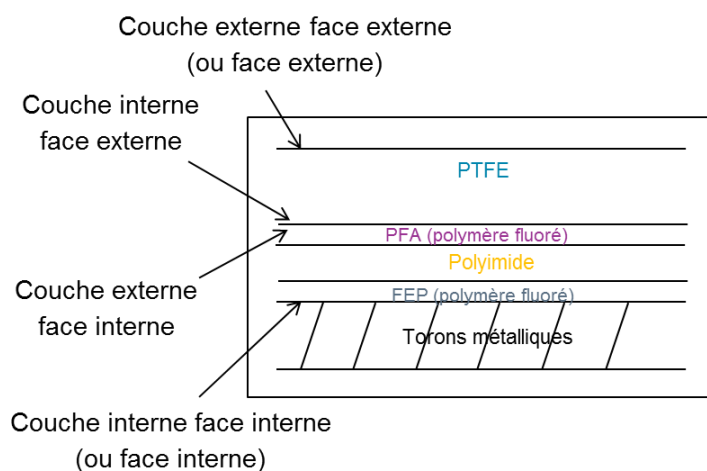


Figure III - 1 : Schéma des différentes couches étudiées en FTIR

Pour les deux faces (interne et externe), on constate la présence des deux pics caractéristiques du fluor (C-F à 1205 cm^{-1} et 1150 cm^{-1}), de même que pour le spectre de référence du Téflon® (un des noms commerciaux du PTFE) (Figure III - 4). Pour le cas de la face interne, 3 bandes supplémentaires sont observées à 1708 cm^{-1} , 1495 cm^{-1} et 1340 cm^{-1} , qui sont respectivement attribuées aux liaisons C=O, C=C et CH₃. Ce sont des bandes caractéristiques du PI (Figure III - 5).

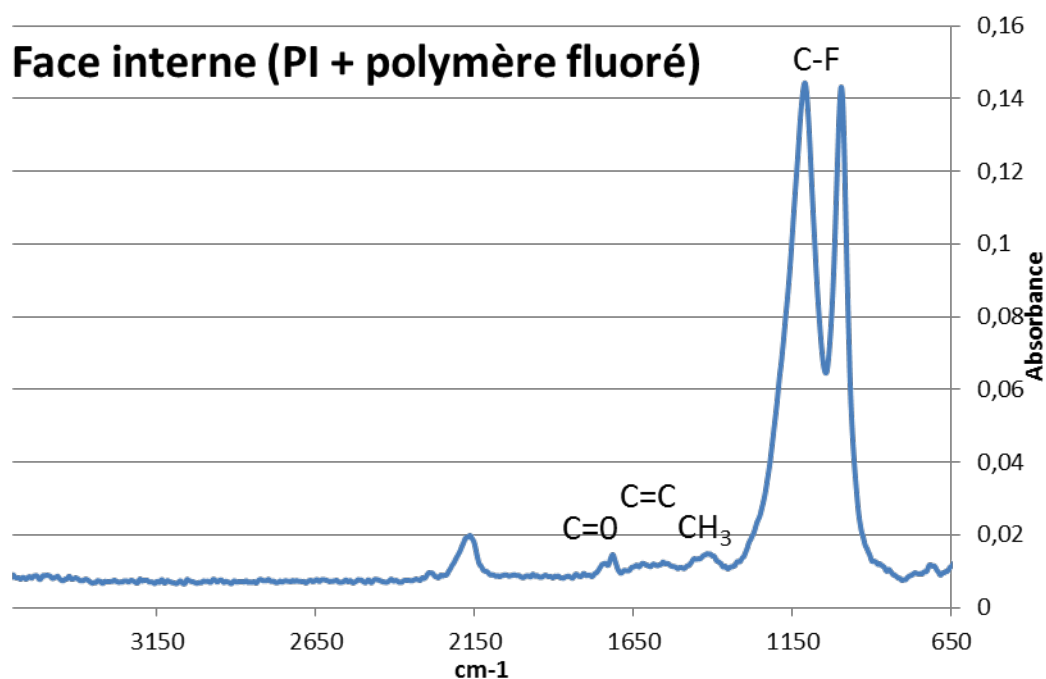


Figure III - 2 : Spectre FTIR de la face interne de l'isolation du câble DR16

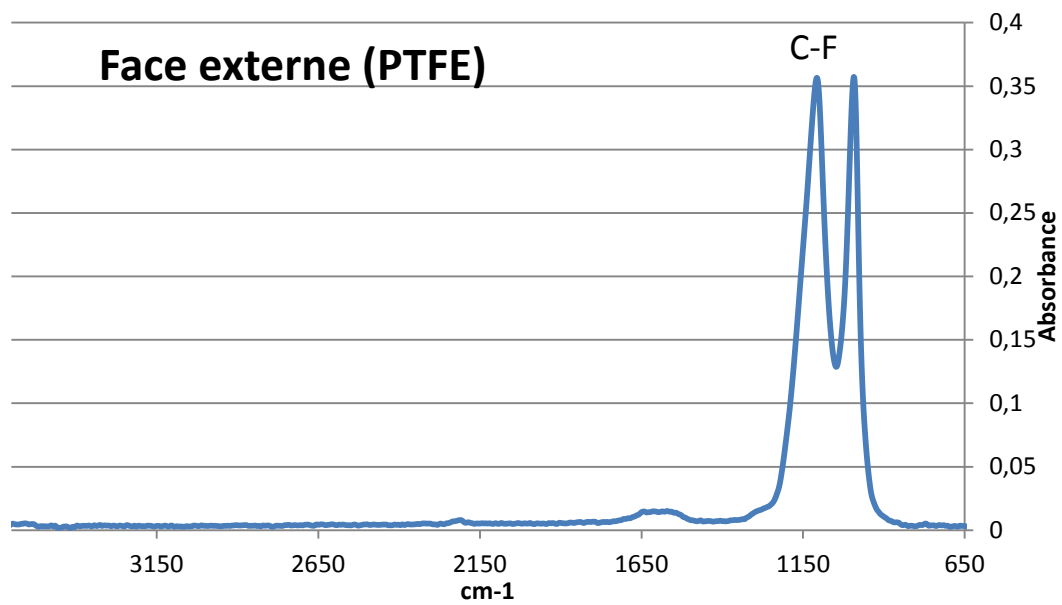


Figure III - 3 : Spectre FTIR de la face externe de l'isolation du câble DR16

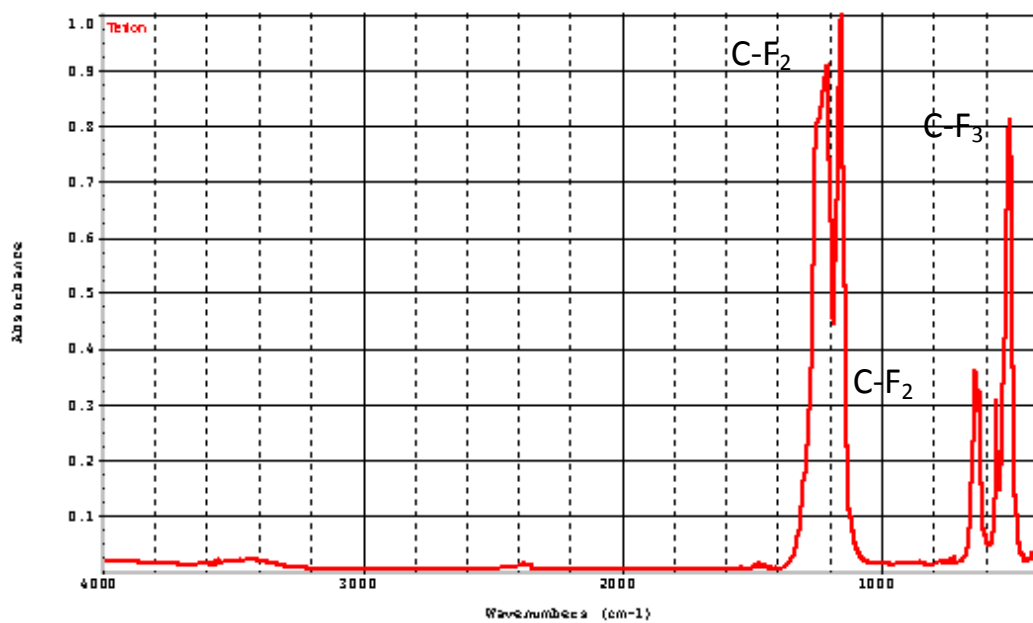


Figure III - 4 : Spectre de référence du Téflon [103], [104]

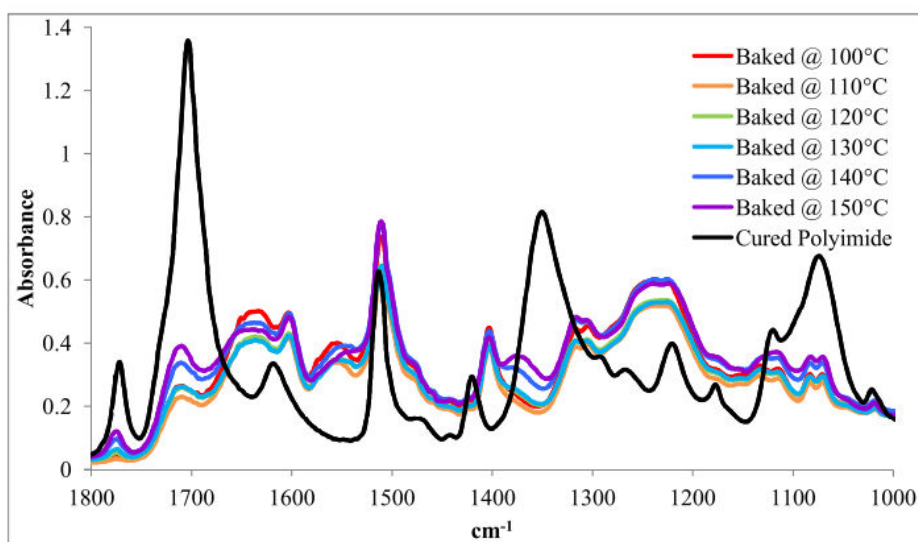


Figure III - 5 : Spectre FTIR d'un PI [105]

III.2.1.2 DSC

L'isolation complète du câble a été prélevée et insérée dans un creuset afin de réaliser une calorimétrie différentielle à balayage. La Figure III - 6 présente la courbe de différence d'échange de chaleur entre l'échantillon examiné et la référence (indium). Elle permet d'obtenir la température de fusion (T_f) et la température de transition vitreuse (T_g) de l'isolant (c'est-à-dire des deux couches comprenant le PTFE et le PI). Une moyenne a été effectuée sur au moins deux essais et les températures retenues sont

$$T_f = 326^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$$

$$T_g = 261^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$$

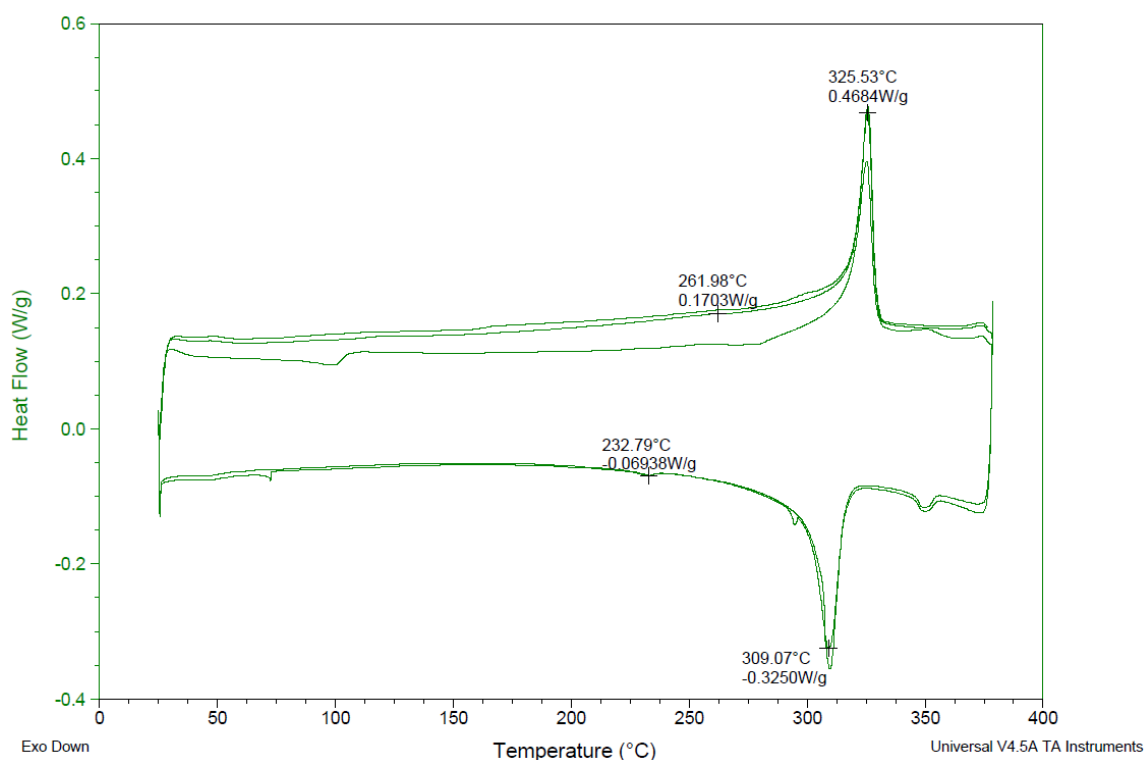


Figure III - 6 : Courbe de DSC de l'isolation du DR16 à l'état initial

III.2.1.3 ATG

L'analyse thermogravimétrique a été réalisée sur l'isolation complète. La Figure III - 7 donne une courbe représentant le résultat de cette analyse. Elle permet d'obtenir la température de dégradation (T_d , qui correspond à une perte de masse de 5%) et le pourcentage de perte de masse en fonction de la température. Une valeur moyenne de ces deux valeurs a été obtenue en réalisant au moins deux fois l'essai. La T_d est environ égale à $529^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ et la perte de masse est de 100% à environ 850°C . On note qu'un seul palier apparaît à l'analyse alors que deux matériaux sont majoritairement présents dans le système d'isolation : le PI et le PTFE. Les valeurs disponibles dans la littérature sont :

PTFE : $T_d = 445^{\circ}\text{C}$ [14]

PI : $T_d = 608^{\circ}\text{C}$ [106]

On notera que sur une section d'isolation, le PTFE et le PI représentent respectivement 90% et 10% de la masse totale de l'échantillon (en négligeant le PFA et le FEP). Ainsi, on peut supposer qu'il y a soit la première dégradation masque la seconde (fort peu probable), soit des réarrangements thermiques de l'échantillon qui font cette évolution ou soit la référence obtenue n'est pas complètement représentative de par les conditions de polymérisation et réticulation avec une influence de l'épaisseur.

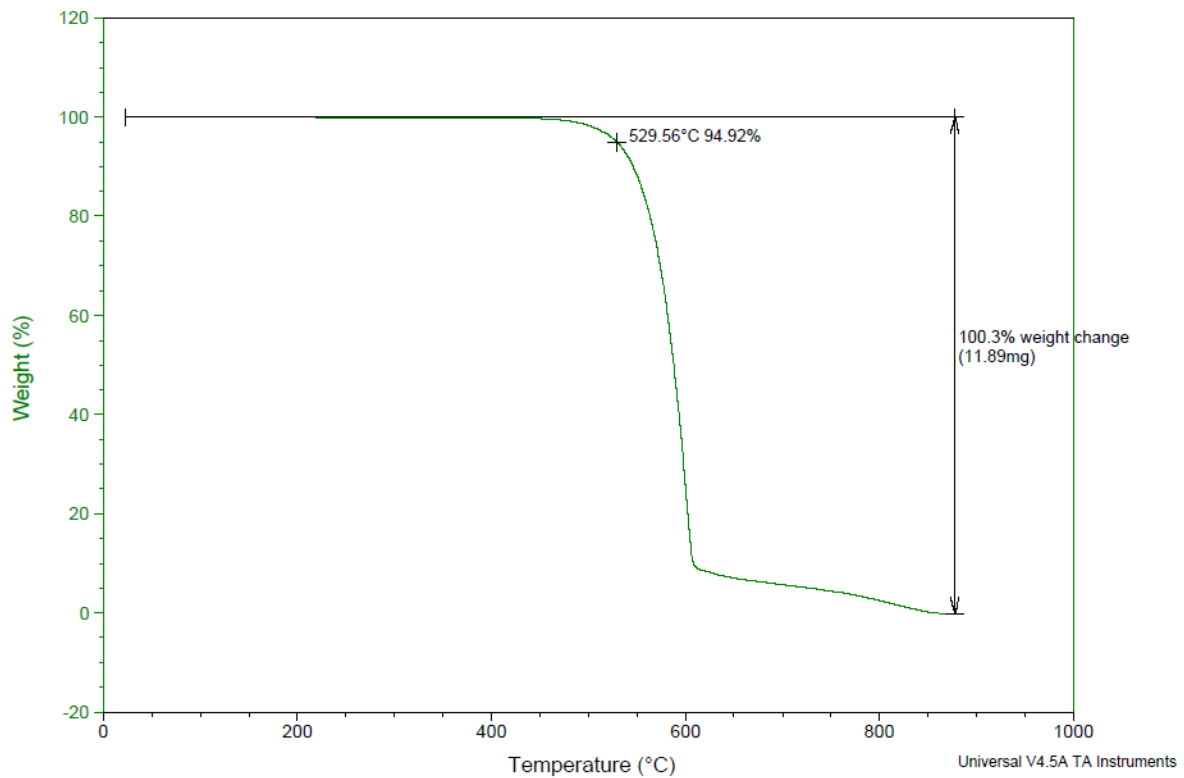


Figure III - 7 : Courbe ATG(10°C/min sous azote) de l'isolation du DR16 à l'état initial

III.2.2 Décharges partielles

Des mesures de DP ont été réalisées sur le câble DR16 à l'état initial, d'une part sur le support avant la mise en vieillissement et d'autre part en utilisant le dispositif à électrode de masse tubulaire. Ces mesures avaient pour but de fournir des données de référence. Le second dispositif a de plus été utilisé pour caractériser et localiser les décharges dans le câble.

III.2.2.1 Dans l'air

Les courbes de la Figure III - 8 représentent les valeurs de PDIV (tension instantanée) et RPDIV (tension de régime établi) du câble DR16 alimenté sur le support à la masse à l'état initial dans l'air. On constate comme attendu que les valeurs de tensions augmentent avec la pression.

Ces tensions ont été mesurées avant chaque vieillissement et un intervalle a été considéré, correspondant à l'enveloppe de dispersion des mesures obtenues sur les câbles à l'état initial. Ainsi, au cours des vieillissements, lorsque les valeurs de PDIV et RPDIV se trouvaient dans cet intervalle (que l'on qualifiera par abus de langage d'« intervalle de confiance » par la suite), il n'était pas possible de conclure quant à un effet sur le comportement du câble vis-à-vis des DP.

La comparaison des valeurs de PDIV et de RPDIV obtenues avec le support dans l'air avec celles obtenues avec le tube à la masse dans l'air (Figure III - 9), montre que ces dernières se situent à la limite supérieure de l'intervalle de confiance.

A ce stade, aucune hypothèse n'a été formulée quant au type et à la localisation des décharges dont l'amorçage (et l'obtention d'un régime établi) a été détecté. Ce sont les mesures effectuées dans l'huile isolante qui permettront de discuter la localisation des événements.

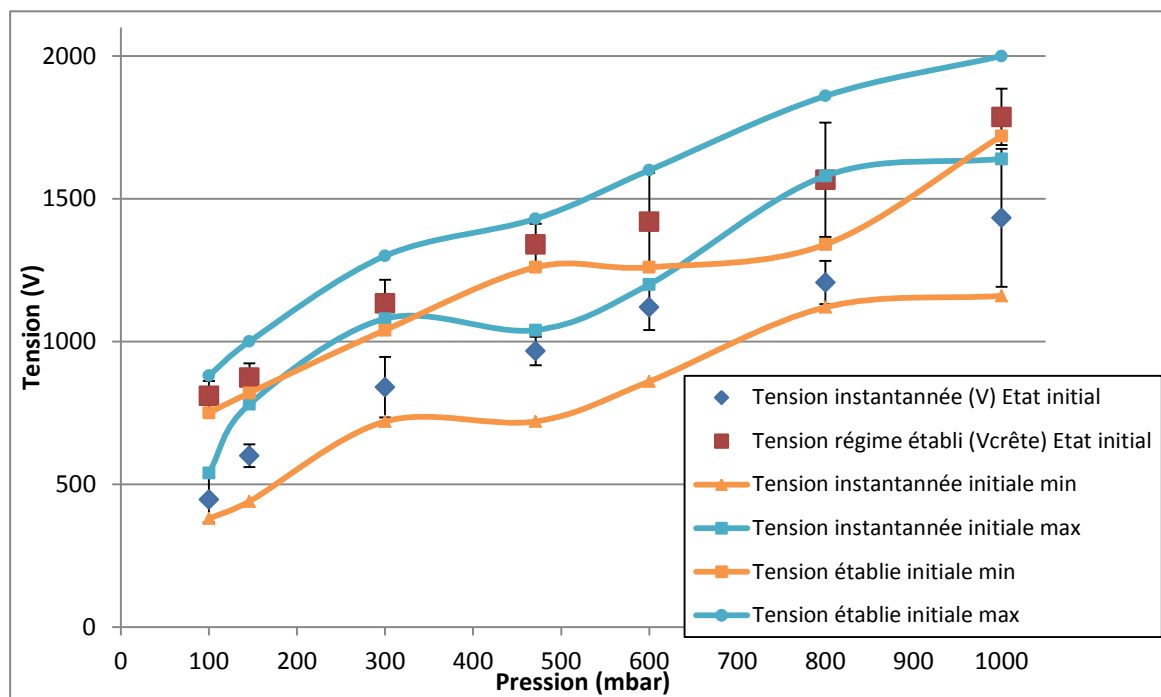


Figure III - 8 : PDIV et RPDIV du DR16 à l'état initial dans l'air sur support

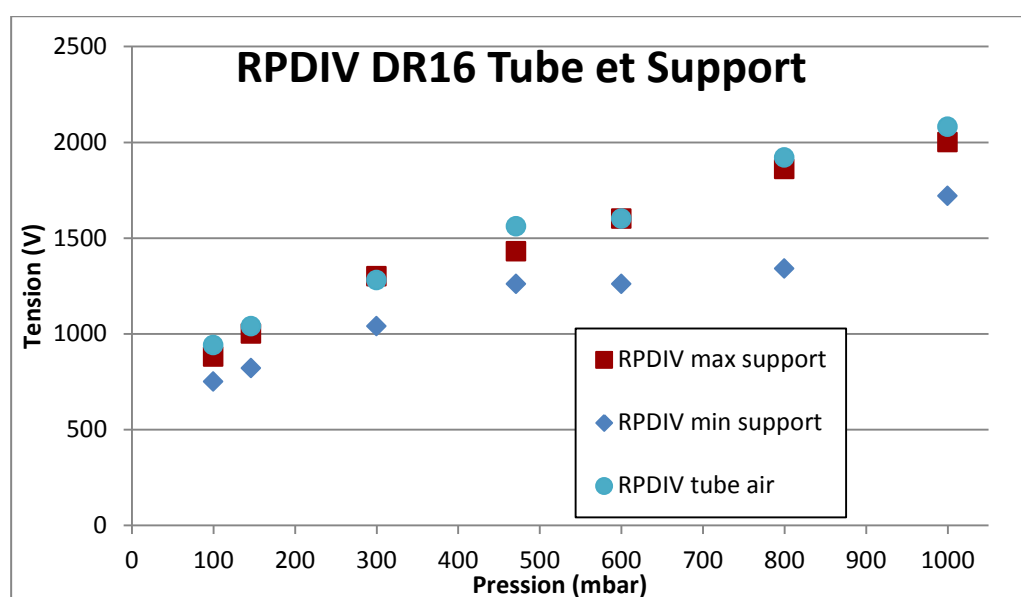


Figure III - 9 : Comparaison des RPDIV du câble à l'état initial dans l'air avec tube et support

III.2.2.2 Dans l'huile

Des mesures ont été réalisées avec le câble inséré dans le tube de masse immergé dans l'huile isolante (comme décrit dans le chapitre Figure II- 12) afin de prévenir l'apparition de décharges dans l'interstice d'air présent entre la face externe de l'isolation du câble et la face interne du tube métallique. Les valeurs de PDIV et RPDIV mesurées sont représentées en Figure III - 10. Cette figure présente aussi les valeurs de RPDIV et PDIV mesurées dans l'air.

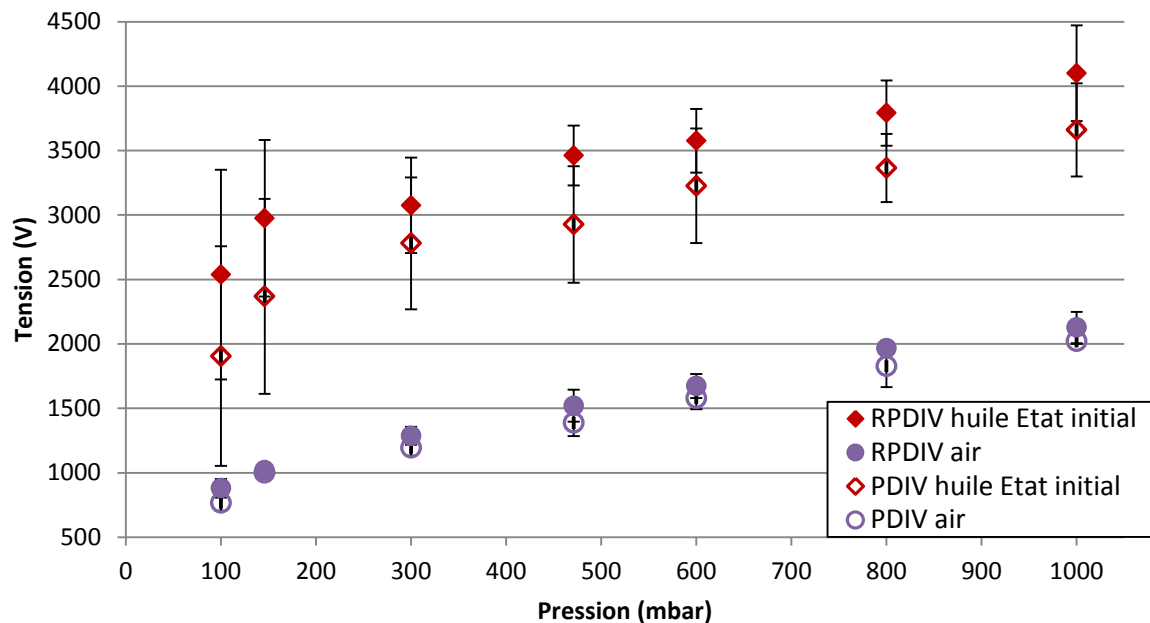


Figure III - 10 : PDIV/RPDIV avec tube dans l'huile et l'air

Une première observation est que dans le cas du dispositif immergé dans l'huile, les valeurs de PDIV et RPDIV sont bien plus élevées. On peut alors conclure que les décharges détectées dans l'air aussi bien sur support de vieillissement que sur dispositif à électrode de masse tubulaire sont bien des décharges externes qui ont lieu à la surface extérieure de l'isolant, certainement amorcées sur les zones de contact avec la partie métallique (champ électrique le plus intense au point tripe métal/isolant/gaz).

On constate également que, comparativement au cas de l'air, l'écart entre les PDIV et RPDIV est plus important et que la dispersion est plus grande.

Enfin, les valeurs de PDIV et RPDIV dans l'huile restent dépendantes de la pression. Ainsi, les décharges internes ont lieu dans un volume gazeux ouvert sur l'extérieur. Il ne peut donc pas s'agir de vacuoles étanches dans le volume de l'isolant. L'hypothèse la plus probable est qu'il s'agit de décharges localisées dans l'intervalle d'air présent entre des brins de l'âme et l'isolant du câble. En effet, l'isolant étant rubané autour des torons torsadés de l'âme, il existe plusieurs interstices (triangulaires) entre les brins conducteurs de l'âme et la face interne de l'isolant dans

lesquels pourront avoir lieu des décharges partielles (Figure III - 11). Les extrémités du câble n'étant pas immergées dans l'huile isolante, la dépendance en pression devient alors explicable.

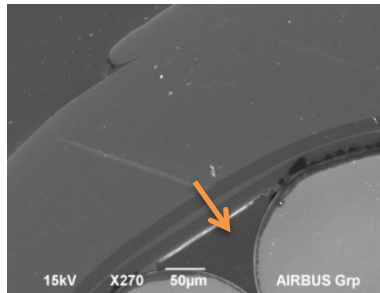


Figure III - 11 : Image MEB du câble DR16

Des diagrammes $\phi/Q/N$ ont été relevés à l'aide du système tubulaire dans l'air sous une pression de 300 mbar et à une tension proche de la RPDIV. Les mesures ont été effectuées sans et avec immersion dans l'huile isolante.

Dans l'air (Figure III - 12), la figure présente une activité intense de décharge partielle avec une forte distribution en charge, symétrique sur les deux alternances. Il n'est pas possible de distinguer les décharges internes des décharges externes. Dans l'huile (Figure III - 13), les décharges externes sont éliminées, et seules les décharges internes sont visualisées. On constate également une symétrie sur les deux alternances, mais avec une bien plus faible dispersion en charge.

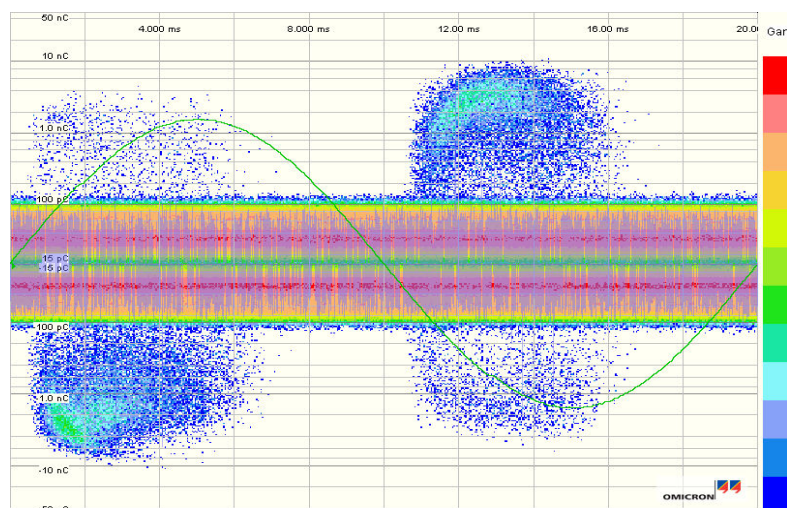


Figure III - 12 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharges dans l'air (300 mbar-1,3 kVcrête)

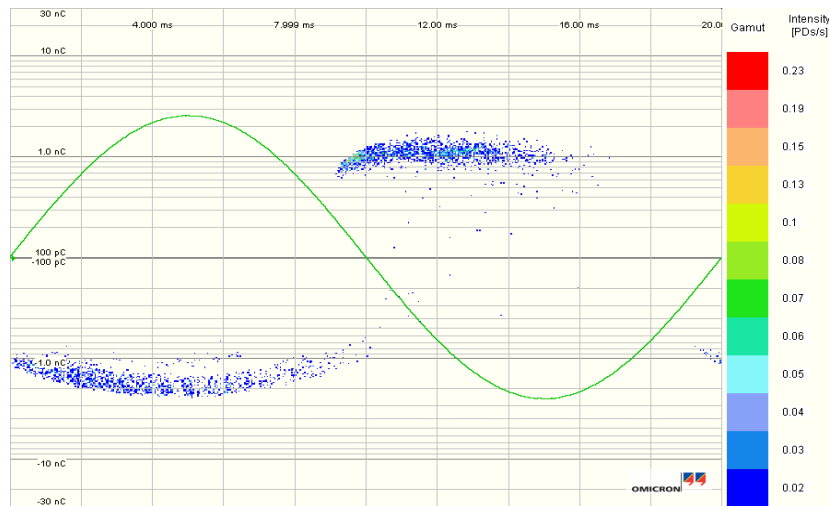


Figure III - 13 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharges dans l'huile (300 mbar-2,4 kVcrête)

Décharges interne et externe présentent donc des signatures différentes. Afin de valider le fait que cette dernière figure de diagramme $\phi/Q/N$ est bien caractéristique d'une décharge interne produite entre un brin conducteur du toron et l'isolant, le même type de mesure a été mis en place avec le dispositif fil-plan isolé figurant un modèle plan du câble (avec un intervalle gazeux de 500 μm ménagé entre le fil et l'isolant). Le diagramme présenté en Figure III - 14 a été obtenu pour la même pression (300 mbar). Même si le facteur d'échelle n'est pas conservé (diamètre du fil, épaisseur et matériau d'isolant, dimensions de l'intervalle gazeux), on constate une similitude qualitative quant à la distribution et à la symétrie des charges sur chaque alternance avec ce qui avait été obtenu avec le câble immergé dans l'huile. Il s'agit donc ici d'un premier élément de confirmation de la localisation des décharges internes. Reste à vérifier que les valeurs de tension imposées aux bornes des intervalles gazeux sont compatibles avec un amorçage de décharges. C'est l'objet de la discussion développée dans le paragraphe suivant.

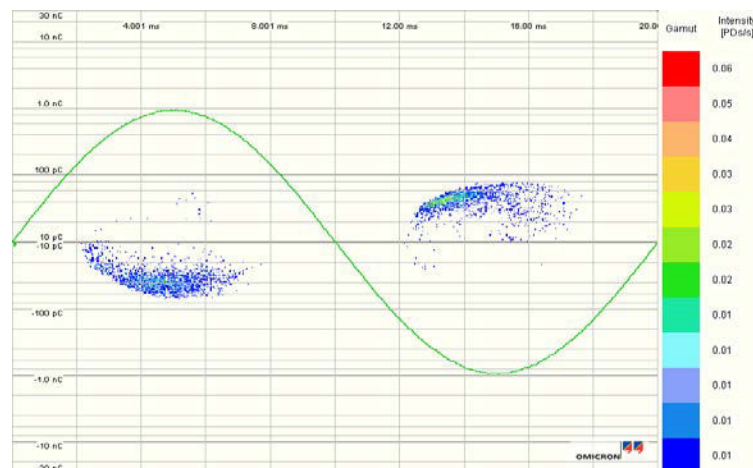


Figure III - 14 : Diagramme $\phi/Q/N$ de décharges en géométrie fil/plan(300 mbar-1,2 kVcrête)

III.2.3 Modélisation électrostatique

Afin de valider la localisation des décharges internes et externes dans le dispositif constitué par le câble alimenté inséré dans un tube de masse, un modèle numérique électrostatique du système a été réalisé. Ce modèle tient compte de la géométrie et des matériaux mis en œuvre. À noter que la distribution des brins conducteurs de l'âme est ici théorique et que celle-ci peut varier d'un câble à un autre. Le tableau ci-dessous donne les principales caractéristiques du système d'isolation prises en compte dans le modèle.

Tableau III - 1 : Principales caractéristiques des éléments du système

Matériau	Dimensions (μm)	Permittivité relative ϵ_r
PTFE	195 (épaisseur)	2,1
PI	30 (épaisseur)	3,4
Huile isolante synthétique	250 (épaisseur)	2,1
Fils conducteurs du toron (19 fils)	290 (diamètre)	-

Une première représentation du système modélisé est donnée en Figure III - 15, où la cartographie de potentiels est indiquée ainsi qu'un certain nombre de lignes de champ électrique. Les lignes de champ surlignées en blanc et indicées (i) et (ii) sont celles pour lesquelles la condition de champ homogène a été considérée comme valide. La tension imposée à l'intervalle gazeux séparant le conducteur et la face interne de l'isolant a été calculée selon la ligne de champ (i). Il s'agira donc du critère d'apparition de décharges partielles internes. En absence d'huile isolante, la tension imposée à l'intervalle gazeux séparant la face externe du système d'isolation et la face interne du tube de masse a été calculée selon la ligne de champ (ii). Il s'agira alors du critère d'apparition de décharges partielles externes. Pour l'ensemble « tube/câble » immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar (à laquelle sont exposées les extrémités du câble), la tension de 2170 V à l'âme du câble correspond à la valeur de PDIV mesurée. Dans la situation de mesures réalisées sans huile isolante (c'est-à-dire dans l'air), pour la même pression de 300 mbar, la PDIV est de 1190 V.

Dans le cas de la Figure III - 15, le câble est centré dans le tube métallique.

Lorsque le système est dans l'air, et dans les conditions de PDIV (1190 V imposés à l'âme du câble), le potentiel obtenu aux bornes de l'intervalle gazeux interne de 80 μm (i) est de 255 V. Dans l'intervalle gazeux externe, qui mesure 250 μm (ii), le potentiel obtenu est de 700 V.

Lorsque le système est immergé dans l'huile, et dans les conditions de PDIV (2170 V imposés à l'âme du câble), le potentiel obtenu pour (i) est de 650 V ; le volume dans lequel la

ligne de champ (ii) est présente est rempli d'huile (*a priori* absence de gaz, et impossibilité de produire une décharge).

En se référant à la courbe de Paschen, les potentiels obtenus dans l'air par cette modélisation par imposition d'une tension de 1190 V sont inférieurs à la tension d'amorçage. Aucune décharge ne devrait avoir lieu. Or, dans les expériences, des décharges sont détectées dans ces conditions de pression et de tension. Ainsi, un deuxième modèle a été réalisé, dans lequel le câble est décentré dans le tube.

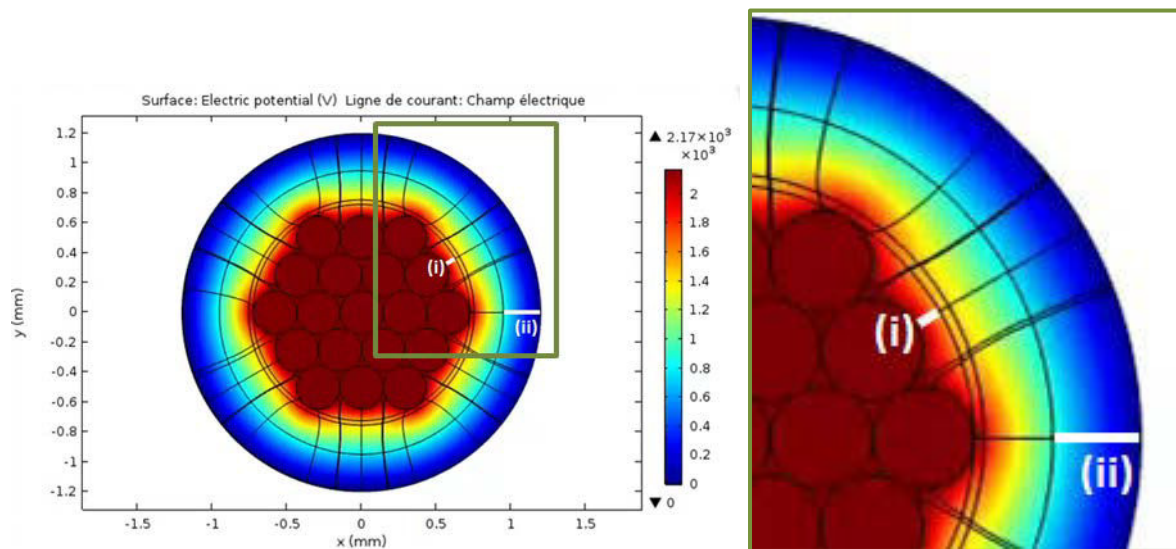


Figure III - 15: Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». Câble centré dans le tube. Valeurs de tension pour l'immersion dans l'huile isolante (2,17 kV). A droite, détail des lignes de champ considérées pour les calculs.

Ce deuxième modèle (Figure III - 16) représente le cas d'un câble en contact avec le tube, situation qui correspond mieux à la réalité expérimentale. Deux situations A et B sont considérées suivant l'orientation du point de contact du câble isolé par rapport à la géométrie du toron conducteur. De la même façon que précédemment, le potentiel imposé correspond à la valeur de PDIV mesurée pour l'ensemble tube/câble dans l'air ou immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar. Les lignes de champ surlignées en blanc et indicées (iii), (iv), (v), (vi), (vii) et (viii) sont celles pour lesquelles la condition de champ homogène a été considérée comme valide. Les valeurs obtenues dans chaque cas sont présentées dans le Tableau III - 2 pour les calculs relatifs aux expériences réalisées dans l'air et dans le Tableau III - 3 pour les calculs relatifs aux expériences réalisées avec le système câble/tube immergé dans l'huile.

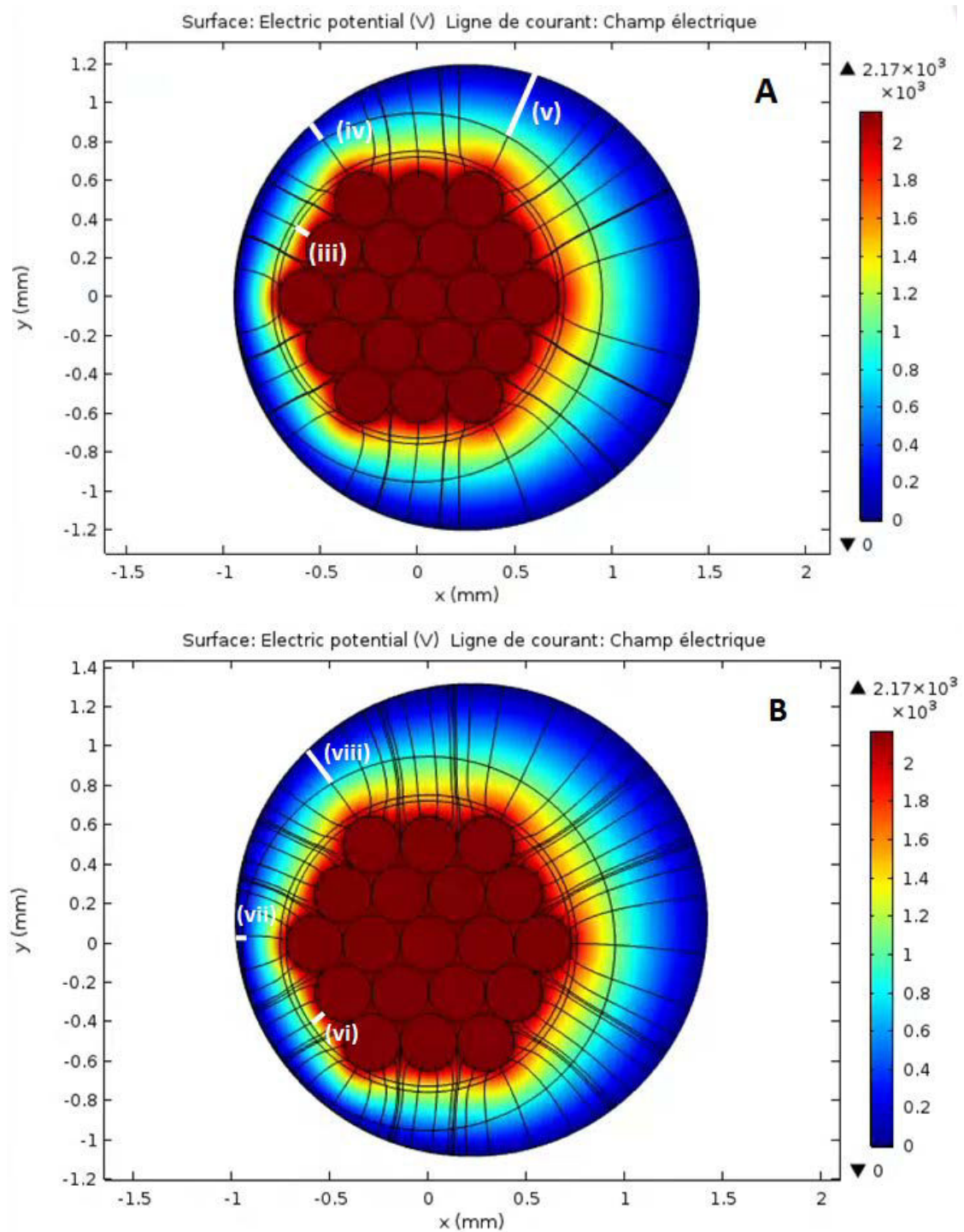


Figure III - 16 : Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». A : décentré en contact 1 – B : décentré en contact 2. Valeurs de tension pour l'immersion dans l'huile isolante (2,17 kV)

Tableau III - 2 : Câble dans l'air sous une pression de 300 mbar. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes et externes le long des lignes de champ identifiées (Figure III - 15 et Figure III - 16) pour une tension appliquée de 1190 V

	Centré	Décentré, en contact 1	Décentré, en contact 2
Interne (80 μm)	255 V (i) (a)	505 V (iii) (b)	550 V (vi) (c)
Externe	700 V (ii) (250 μm) (d)	515 V (iv) (108 μm) (e) 785 V (v) (264 μm) (f)	250 V (vii) (27 μm) (g) 660 V (viii) (222 μm) (h)

Tableau III - 3 : Câble immergé dans l'huile en présence d'une pression de 300 mbar imposée à ses extrémités. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes le long des lignes de champ identifiées (Figure III - 15 et Figure III - 16) pour une tension appliquée de 2170 V

	Centré	Décentré, en contact 1	Décentré, en contact 2
Interne (80 μm)	655 V (i) (1)	970 V (iii) (2)	1020 V (vi) (3)

Les potentiels calculés le long des lignes de champ électrique dans :

- les intervalles gazeux internes sont repérés par les lettres de (a) à (c) dans l'air et les chiffres de (1) à (3) dans l'huile ;
- les intervalles gazeux externes sont repérés par les lettres de (d) à (h) dans l'air.

En conservant l'hypothèse d'un champ électrique homogène (compte-tenu des lignes de champ choisies), ces valeurs de tension peuvent alors être confrontées à la courbe de Paschen.

La loi de Paschen peut *a priori* être calculée en situation de champ électrique homogène en tenant compte de la nature du gaz, de sa pression P , des dimensions de l'intervalle gazeux et des mécanismes d'émission secondaire, la tension-seuil de claquage du gaz (ou d'apparition de décharges partielles). Une expression analytique est proposée comme suit [107] :

Équation (2)

$$V = \frac{\varepsilon_i \times \sigma}{e \times k_B \times T} \times P \times d \times \frac{1}{\ln(P \times d) + \ln\left(\frac{\sigma}{k_B \times T}\right) - \ln\left[\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)\right]}$$

avec ε_i le potentiel d'ionisation du gaz considéré, σ sa section efficace de collision ionisante, T sa température, γ le coefficient d'émission secondaire (dépendant de l'état de surface et de la nature

du conducteur – seule l'émission par impact ionique sur la cathode est ici considérée), k_B la constante de Boltzmann, et d la distance sur laquelle le champ électrique est imposé dans le volume de gaz considéré.

La Figure suivante présente cette courbe tracée suivant l'Équation (2) et comparée à une moyenne des valeurs expérimentales de la littérature [46]. On constate que, pour le câble centré (cf. Figure III - 15) sous une tension de 1190 V, les tensions imposées dans les intervalles gazeux interne et externe (respectivement repérés par les lettres (a) et (d)) se situent clairement sous la courbe de Paschen. En revanche, si le câble est décentré, et suivant l'orientation du toron par rapport au point de contact avec le tube, les tensions aux bornes de l'intervalle gazeux interne seront bien au-dessus de la courbe (points (b) et (c)) ; dans l'intervalle gazeux externe, seul le point (e) sera sur la courbe. Ainsi, des décharges peuvent être détectées, aussi bien internes qu'externes, dans certaines configurations géométriques. Le positionnement du câble dans le tube de masse ne pouvant être contrôlé, il est alors logique d'observer une dispersion des valeurs de tension imposée aux bornes du gaz. Ainsi, en se concentrant sur les décharges internes, c'est-à-dire amorcées dans un intervalle gazeux de dimension fixée ici à 80 μm , une dispersion d'une amplitude de presque 300 V est constatée dans l'air sous 1190 V ; en immersion dans l'huile, cette dispersion a une amplitude de 360 V sous 2170 V. Ce facteur géométrique explique donc, au moins en partie, les amplitudes des barres d'erreurs de la Figure III - 10.

Enfin, la distribution des brins conducteurs de l'âme doit également être prise en compte. Une seconde distribution est proposée dans les cas du câble centré et excentré, comme illustré par la Figure III - 18. On notera que cette distribution est plus proche de celle du cliché présenté en Figure III - 11. En se concentrant sur les décharges partielles internes : les lignes de champ surlignées en blanc (indiquées (ix) et (x)) définissent la distance d (ici $d = 135 \mu\text{m}$) et sont utilisées pour calculer le potentiel dans l'intervalle gazeux. Ce potentiel correspond à l'application d'une tension de PDIV de 1190 V pour un système dans l'air à 300 mbar et d'une tension de PDIV de 2170 V pour l'ensemble tube/câble immergé dans l'huile avec une pression environnante de 300 mbar. Les valeurs obtenues pour différents cas sont présentées dans le Tableau III - 4 et reportés en Figure III - 17 (points (i), (j), (4) et (5)).

Tableau III - 4 : Câble dans l'air sous une pression de 300 mbar ou immergé dans l'huile. Tensions imposées aux intervalles gazeux internes le long des lignes de champ identifiées (Figure III - 18)

	Centré	Décentré
Interne (135 μm) Tube dans l'air PDIV = 1190 V	135 V (ix) (i)	320 V (x) (j)
Interne (135 μm) Tube immergé dans l'huile PDIV = 2170 V	365 V (ix) (4)	610 V (x) (5)

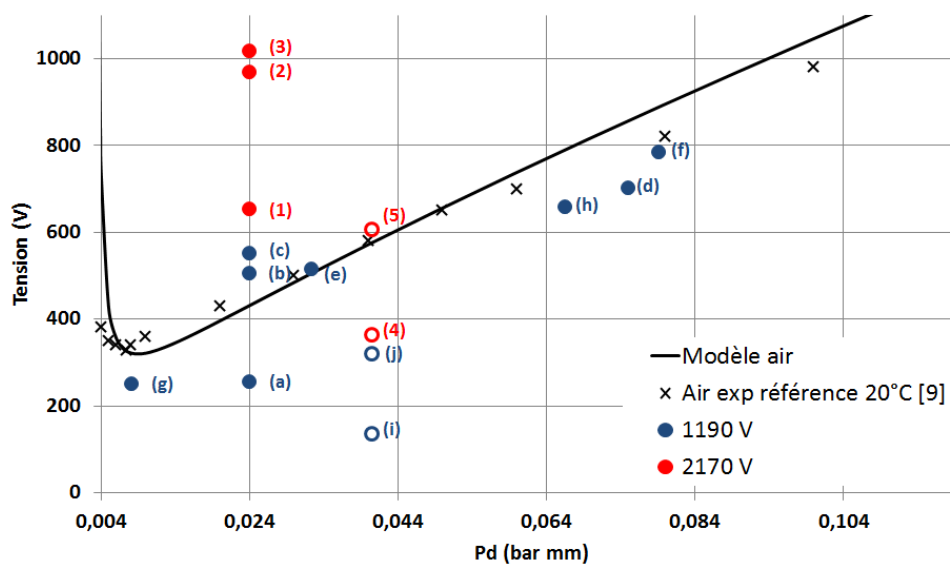


Figure III - 17 : Valeurs de tension imposée aux intervalles gazeux internes et externes dans l'air comparés à la courbe de Pashen. En bleu : ensemble câble/tube dans l'air. En rouge : ensemble câble/tube immergé dans l'huile isolante. Distribution de conducteurs dans l'âme correspondant à la modélisation des Figure III - 15 et Figure III - 16 en symboles pleins, et de la Figure III - 18 en symboles vides

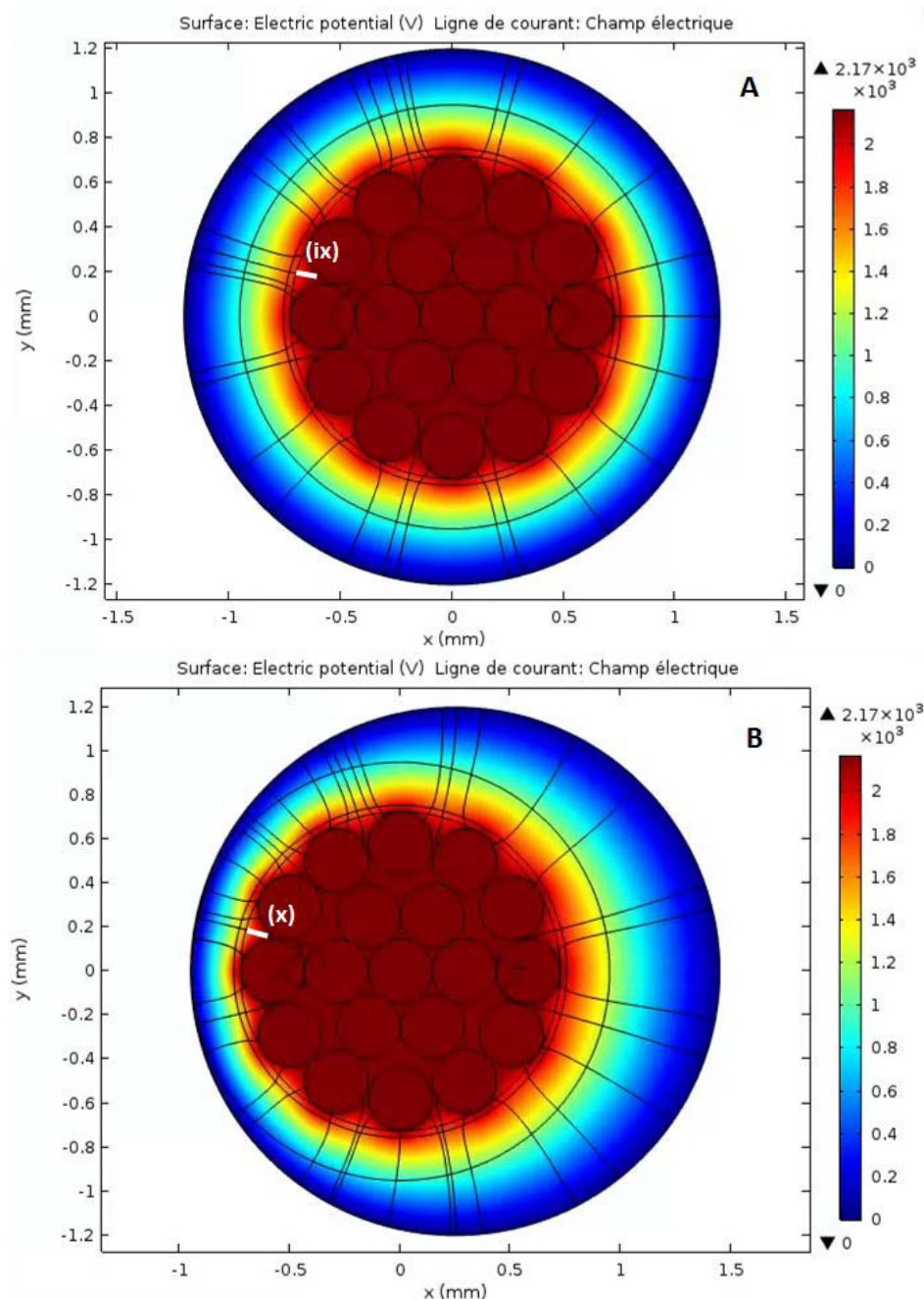


Figure III - 18 : Cartographie de potentiels du système « câble inséré dans le tube de masse ». A : centré – B : décentré. Valeurs de tension pour l’immersion dans l’huile isolante (2,17 kV)

Il apparaît tout d’abord que sous 1190 V, aucune décharge interne n’est possible (points (i) et (j) sous la courbe de Paschen), que le câble soit centré ou décentré dans le tube. Sous 2170 V, le potentiel dans le gaz est trop faible dans le cas du câble centré (point (4) sous la courbe de Paschen) ; en revanche, pour le câble décentré, le potentiel est suffisamment élevé (point (5) quasiment « sur » la courbe de Paschen) pour amorcer des décharges internes. Ce résultat justifie le fait que les décharges internes ne sont amorcées que pour des tensions plus élevées que celles constatées pour les décharges externes comme illustré par la Figure III - 10. Ainsi, la

confrontation entre les résultats expérimentaux et ceux obtenus grâce aux différents modèles électrostatiques confirme la localisation des décharges dans le câble.

III.3 Vieillissements thermiques statiques

Cette section présente les résultats obtenus au cours et après les vieillissements accélérés sous contrainte thermique seule à 240°C, et sous contrainte combinée thermique/électrique 240°C/540 VDC et 240°C/1000 VDC. Dans cette partie les effets du vieillissement sur les décharges externes (mesurées sur support), les décharges internes (mesurées sur dispositif à électrode de masse tubulaire immergée dans l'huile isolante) et sur la caractérisation physicochimique du système d'isolation électrique sont présentés.

III.3.1 Vieillissement sous contrainte thermique seule (240°C)

III.3.1.1 Effet du vieillissement sur les décharges partielles

III.3.1.1.1 Décharges partielles sur support

Les tensions d'apparition des décharges partielles ont été mesurées au cours du vieillissement à différentes pressions en alimentant électriquement le câble et en connectant le support à la masse. La Figure III - 19 présente les valeurs de PDIV et RPDIV en fonction du temps de vieillissement à 300 mbar. Les lignes horizontales représentent les valeurs extrêmes qui ont été mesurées sur 3 échantillons de câbles neufs, issus du même rouleau de câble, enroulés sur 3 supports identiques (même fournisseur). Ces deux lignes permettent de visualiser l'intervalle de dispersion des mesures à l'état initial.

En ce qui concerne les mesures effectuées sur support, on constate que jusque 9072 heures de vieillissement (soit une année et 13 jours, durée maximale de vieillissement accéléré dans ce travail), les valeurs de PDIV et RPDIV des décharges externes demeurent dans l'intervalle de dispersion défini précédemment. Ainsi, le vieillissement thermique seul ici subi par le câble n'a pas d'effet sur le comportement des décharges (en termes de tension d'apparition) qui ont lieu au niveau de sa surface externe.

Par ailleurs, en début de vieillissement (jusqu'à 1500 heures), des mesures complémentaires réalisées dans l'air avec le dispositif à électrode de masse tubulaire ont également été effectuées. On observe que les valeurs obtenues sont légèrement supérieures à celles mesurées sur support, et que la même tendance est constatée (jusqu'à 1500 heures de vieillissement accéléré).

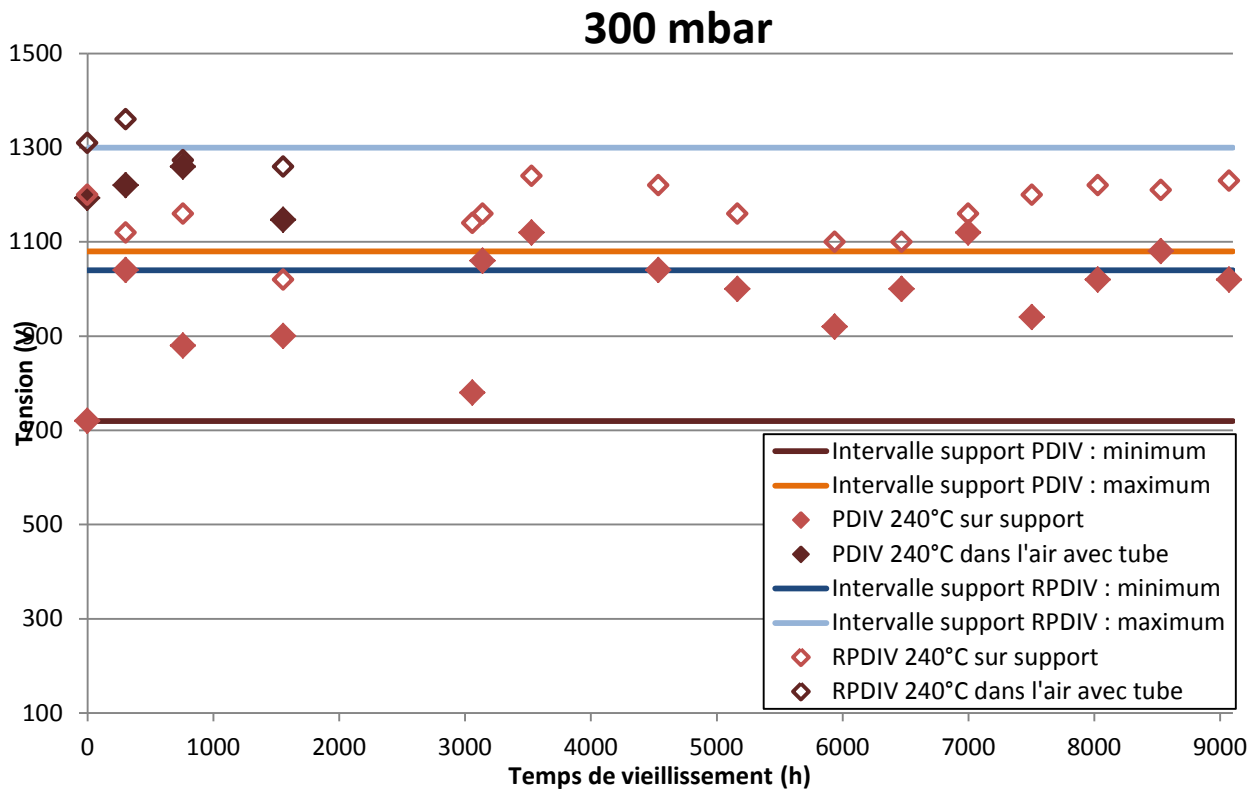


Figure III - 19 : PDIV et RPDIV en fonction du nombre d'heures de vieillissement à 300 mbar

III.3.1.1.2 Décharges partielles dans l'huile

Des essais complémentaires ont été conduits afin d'étudier l'effet du vieillissement sur les décharges internes. Des échantillons (d'environ 60 cm) ont été prélevés à différents temps de vieillissement (304 h, 760 h, 1557 h et 9072 h) après avoir réalisé les mesures de PDIV et RPDIV sur support. Des mesures de DP ont alors été réalisées à l'aide du dispositif à électrode de masse tubulaire immergée dans l'huile isolante.

Les résultats de mesure de RPDIV sont présentés en Figure III - 20 en fonction de la pression pour différentes durées de vieillissement. Après 9072 h de vieillissement, les valeurs de RPDIV sont systématiquement plus faibles que celles mesurées après 1557 h de vieillissement entre 300 mbar et la pression atmosphérique. Ainsi, à 300 mbar, les valeurs de tension diminuent de 1000 V entre 1557 h et 9072 h. De plus, après 9072 h de vieillissement, les valeurs de tension sont plus faibles que pour le câble neuf sur toute la gamme de pression. Ainsi, contrairement aux décharges externes, le vieillissement thermique (au moins 9000 h de vieillissement) mène à une modification significative du comportement des décharges internes.

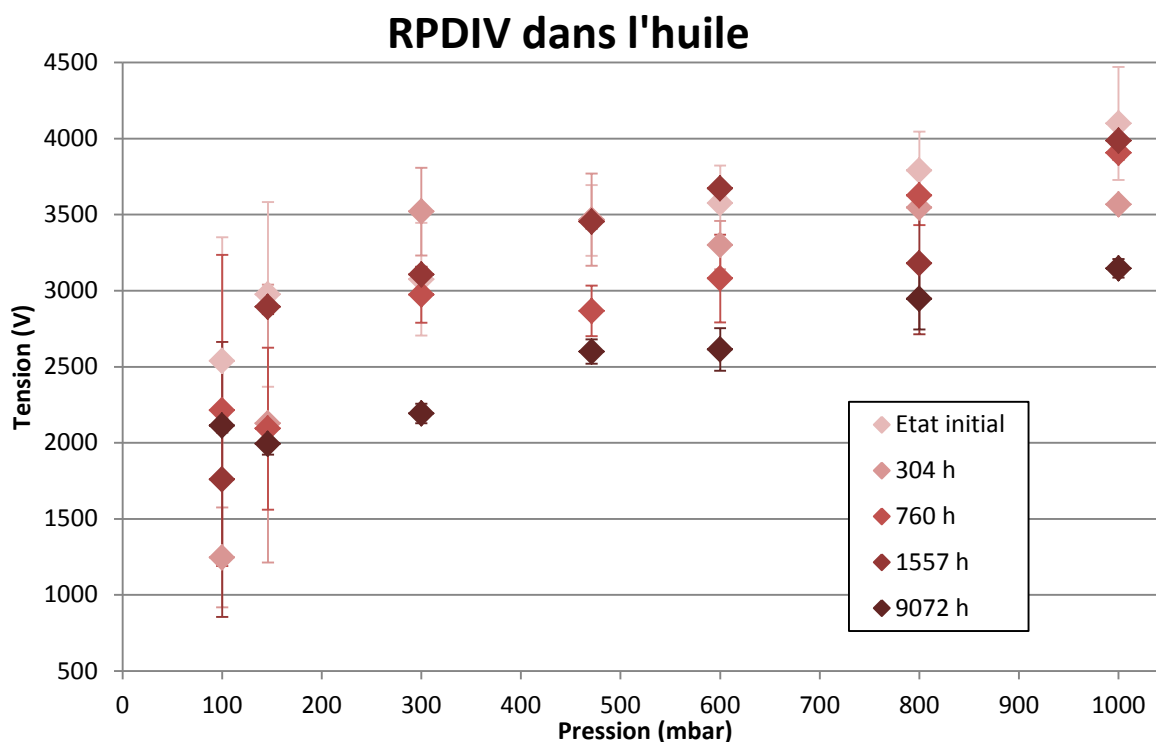


Figure III - 20 : RPDIV sur les câbles neufs et vieillis (240°C) en fonction de la pression mesurée avec le tube de masse immergé dans l'huile isolante (décharges internes).

Durant ces mesures, des diagrammes de DP (diagramme $\phi/Q/N$) ont aussi été enregistrés pour tenter d'examiner l'évolution de l'activité des DP en fonction de la pression mais aussi en fonction de l'avancée du vieillissement.

Les diagrammes présentés dans le Tableau III - 5 ont été obtenus pour des tensions de valeur constante supérieure ou égale à la RPDIV pour une pression donnée, quel que soit l'état de vieillissement. Sur certains diagrammes obtenus à pression réduite (100 et 146 mbar), une barre de dispersion apparaît, résultant d'un échec de synchronisation des événements avec le signal de tension imposée et traduisant une saturation de l'analyseur de décharges partielles. Dans ces conditions, aucune valeur de charge traduisant l'activité de DP ne peut être acquise ; cependant, cette situation atteste qualitativement d'une forte activité. Dans les autres cas, une valeur de charge a pu être calculée et les résultats obtenus sont reportés en Figure III - 21 en fonction de la durée de vieillissement. A l'état initial, on constate une forte dispersion de la charge (10-300 pC) suivant les pressions (100 mbar-1000 mbar) et donc les valeurs de tension appliquées (2,8 kV – 4,1 kV respectivement). A 300 h de vieillissement, la même amplitude de dispersion est obtenue, mais avec des valeurs 10 fois plus élevées. On notera que pour ce vieillissement, la chute de RPDIV n'est pas significative. Au-delà de 300 h, la charge diminue progressivement jusqu'à 9072 h. L'évolution de la charge mesurée à tension constante avec la durée du vieillissement

passe donc par un maximum dont la valeur n'a pu être estimée faute de données expérimentales intermédiaires. Toutefois, la tendance montre que l'amplitude du maximum est d'autant plus grande que la pression est faible. Enfin on constate que pour le vieillissement le plus avancé, la dispersion des valeurs de charge se réduit considérablement, soit entre 20 et 30 pC, pour les mêmes conditions de pression (100 mbar-1000 mbar) et de tension (2,8 kV – 4,1 kV respectivement). Ces mesures et observations peuvent témoigner de l'effet du vieillissement thermique sur la géométrie et les dimensions des interstices dans lesquels s'établissent les décharges internes.

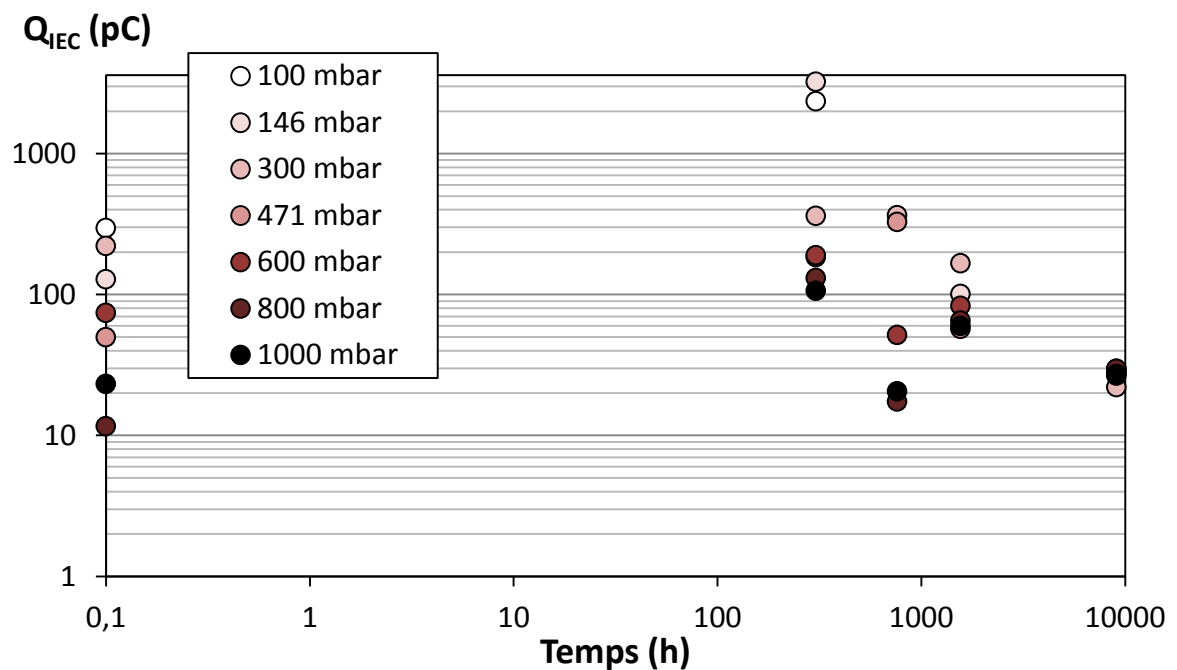
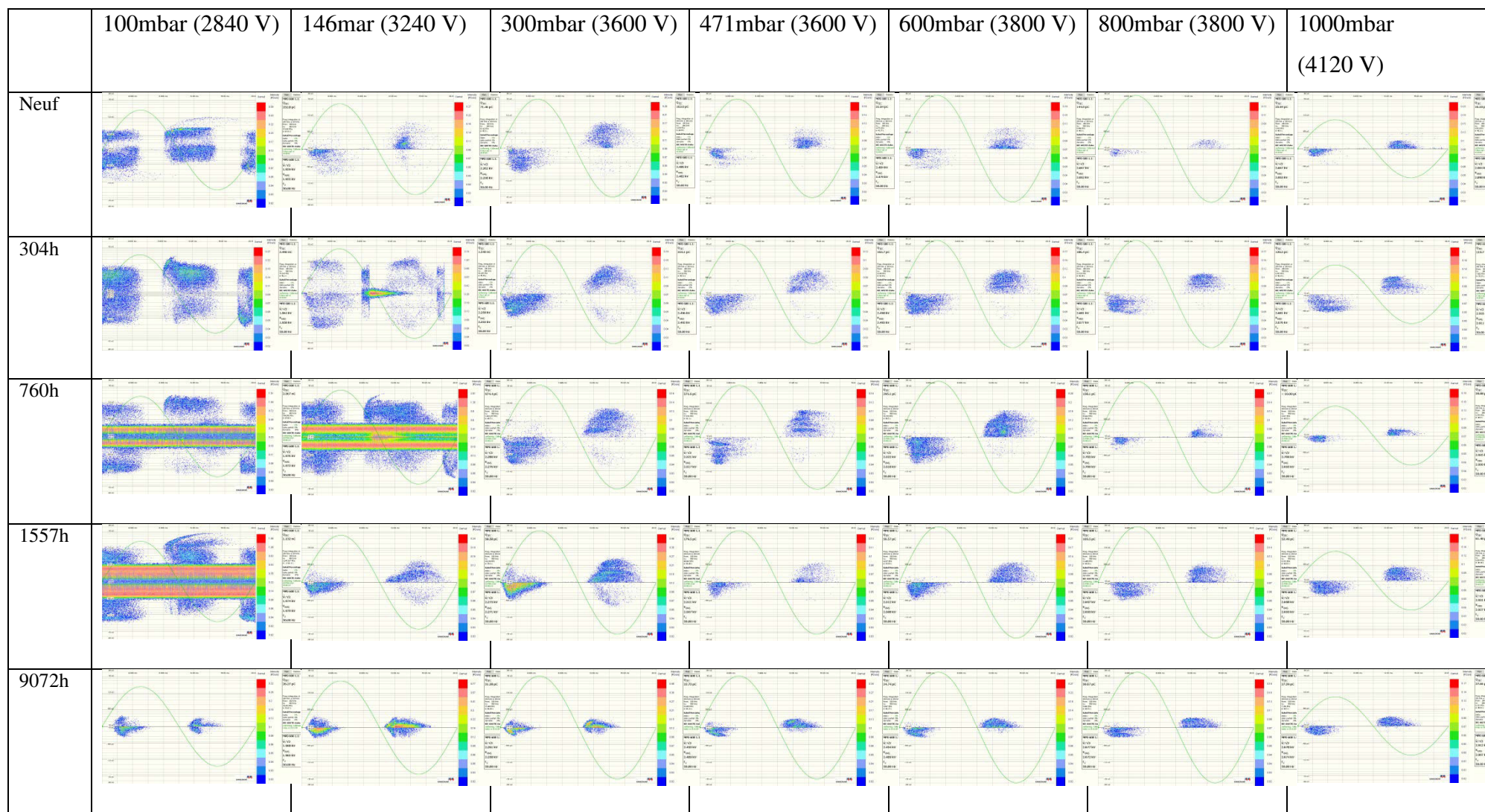


Figure III - 21 : Charge moyenne calculée sur une période complète obtenue à tension constante (supérieure à la RPDIV) au cours du vieillissement. La valeur de tension imposée dépend de la pression ; les valeurs sont précisées dans le Tableau III - 5

Tableau III - 5 : Diagramme $\phi/Q/N$ en fonction de la pression et du nombre d'heures de vieillissement



Dans le but de confirmer cette hypothèse, le même type de mesures a été effectué sur le système fil/plan en ménageant à l'aide de cales calibrées (100 μm et 500 μm) un espace entre le fil alimenté et la surface de l'isolant (dont la face inférieure métallisée était connectée à la masse), simulant ainsi, bien que grossièrement, l'apparition et la croissance d'un intervalle entre conducteur et surface isolante dans une géométrie filaire.

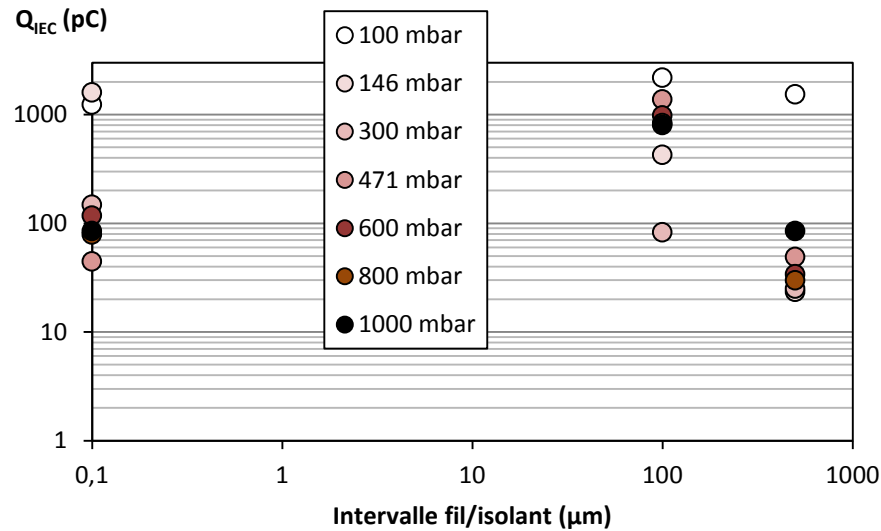


Figure III - 22 : Charge moyenne calculée sur une période complète pour le modèle fil/plan obtenue à tension constante (supérieure à la RPDIV) pour 3 intervalles gazeux séparant le fil de la surface de l'isolant (0 μm , 100 μm , 500 μm). La valeur de tension imposée dépend de la pression ; les valeurs de tension imposées sont uniquement dépendante de la pression (1000 V pour 100 mbar ; 1060 V pour 146 mbar ; 1220 V pour 300 mbar ; 1380 V pour 471 mbar ; 1500 V pour 600 mbar ; 1660 V pour 800 mbar ; 1860 V pour 1000 mbar)

Les résultats obtenus présentés en Figure III - 22 sont concordants (à l'exception du cas à 100 mbar) avec ceux de la Figure III - 21 si l'on associe la durée de vieillissement à la création puis au développement d'un intervalle gazeux entre le conducteur filaire et l'isolant :

- une forte dispersion des valeurs de charge pour une distance nulle,
- une augmentation des valeurs de charge à la création d'un intervalle (100 μm),
- une diminution des valeurs de charge avec réduction de la dispersion à l'augmentation des dimensions de l'intervalle.

Ces résultats, certes qualitatifs, confortent l'hypothèse d'un effet portant sur la géométrie et les dimensions des interstices dans lesquels s'établissent les décharges internes lors du vieillissement thermique.

III.3.1.2 Propriétés physicochimiques

La modification de l'isolation des câbles vieilliss a été investiguée à l'aide des techniques de DSC et ATG. Le Tableau III - 6 regroupe les valeurs de températures de dégradation et de transition de phase obtenue sur l'isolation totale des câbles vieilliss. On notera que ces mesures n'ont pu être effectuées (ATG) ou pas avec les mêmes équipements (DSC) pour le vieillissement le plus prolongé (9072 heures) pour des raisons logistiques.

Néanmoins, une légère évolution de ces températures est présente à partir de 1557 h, qui n'est pas significative pour expliquer une modification chimique de l'isolant : différence de température de 10°C, 16°C et 25°C pour respectivement la température de dégradation (Td), la température de fusion (Tf) et la température de transition vitreuse (Tg). A 9072h, la température de fusion est identique à celle du câble neuf (légère remontée suite à un changement d'équipement pour la valeur à 9072h mais identique à celle du câble neuf avec cet équipement - 325°C ± 5°C). Il n'y a donc aucune modification physicochimique.

Tableau III - 6 : Températures moyennes de dégradation et de transition de phase obtenues par DSC et ATG en fonction du temps de vieillissement

Grandeur	Etat initial	304h	1557h	9072h
Td	529°C ± 5°C	530°C ± 5°C	519°C ± 5°C	-
Tg	261°C ± 10°C	259°C ± 10°C	236°C ± 10°C	-
Tf	326°C ± 5°C	326°C ± 5°C	310°C ± 5°C	325°C ± 5°C

La technique de radiographie X a été utilisée afin de visualiser des modifications de la structure de l'isolation du câble. Les câbles neufs, vieilliss pendant 1557 h et 9072 h ont été observés sur les prélèvements. Les images sont présentées en Figure III - 23. Il est possible de discerner les différentes couches de l'isolation (le PTFE et le PI en « sandwich » avec le polymère fluoré). Aucune différence de structure n'est détectée entre le câble neuf et le câble vieilli pendant 1557 h. Cependant, après 9072 h de vieillissement, des détachements sont observés (Figure III - 23 – C) entre la couche interne et la couche externe. Un détail de cette zone de détachement est présenté en Figure III - 23 – D. L'interstice résultant de ce détachement entre les deux couches de l'isolation est d'environ 30 µm. En considérant le PDIV mesuré à 300 mbar (1920 V), on peut calculer la tension correspondante à travers cet interstice de gaz $U_g = 670$ V et comparer cette valeur à la tension de claquage de Paschen en supposant un champ électrique homogène (soit 340 V à 300 mbar). La présence de décharges dans cet espace est compatible avec la physique des décharges et une telle dégradation du

système d'isolation pourrait expliquer le RPDIV présenté sur la Figure III - 20 pour des câbles âgés de 9072 heures sur une plage de pression de 300 mbar à 1000 mbar.

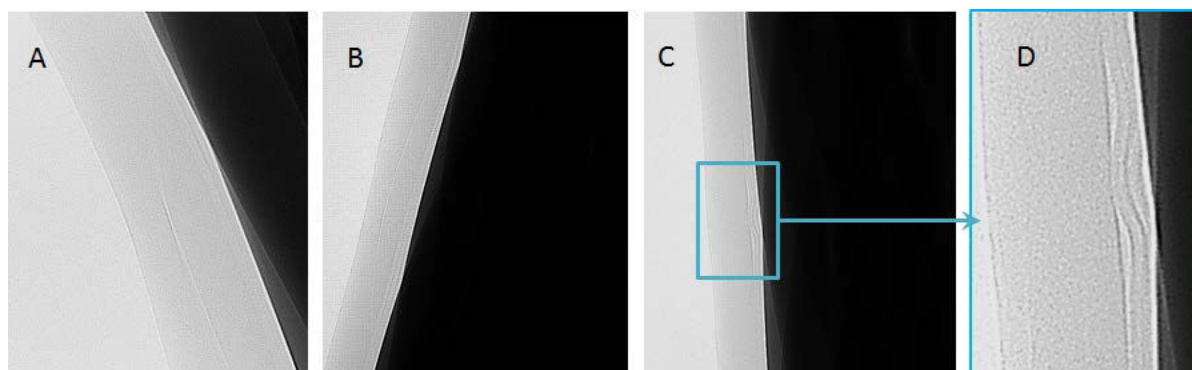


Figure III - 23 : Radiographie X; A - du câble neuf ; B – du câble vieilli 1557h ; C – du câble vieilli 9072h et D – un grossissement de la zone d'intérêt de C

Même si aucun changement de structure ni influence significative sur les valeurs de RPDIV n'ont pu être observés pour les câbles âgés de 1557 heures, l'attention a été attirée sur ces échantillons afin d'identifier les mécanismes initiateurs qui ont pu être mis en évidence par les diagrammes $\phi/Q/N$ des décharges internes. L'analyse FTIR en réflexion des couches isolantes a été réalisée sur des câbles non vieillis et des câbles vieillis pendant 1557 heures. Plus précisément, la face interne du système isolant a été méticuleusement extraite et des échantillons ont été fixés sur la surface du cristal de germanium. Les spectres comparés sont présentés sur la Figure III - 24. Pour l'échantillon non vieilli, les fortes bandes C-F (1150 et 1210 cm^{-1}) mettent en évidence la présence du polymère fluoré. On peut également observer de faibles bandes d'absorption attribuées à $-\text{CH}_3$ (2950 cm^{-1}), $-\text{CH}_2$ (2855 et 2920 cm^{-1}), $\text{C}=\text{O}$ conjugué (1700 cm^{-1}), $\text{C}=\text{C}$ aromatique (1500 cm^{-1}) et $-\text{OH}$ phénol (1350 cm^{-1}) correspondant au spectre d'absorption du PI. La couche de fluoropolymère est très mince, mais suffisamment adhérente à la couche de PI pour recouvrir de manière homogène sa surface même après l'opération d'extraction, ce qui résulte en un spectre dominé par l'absorption de C-F. Dans le cas de l'échantillon vieilli, le rapport entre les bandes d'absorption C-F et $-\text{CH}_2$ / $-\text{CH}_3$ a fortement diminué, révélant la plus forte présence des fonctions d'absorption des PI sur la surface [108].

De plus, des bandes faibles apparaissent, attribuées à $\text{C}=\text{C}$ aromatique + CH_2 (1450 cm^{-1}) et harmonique C-H aromatique hors plan (1650 cm^{-1}), qui sont également présentes dans le spectre d'absorption du PI.

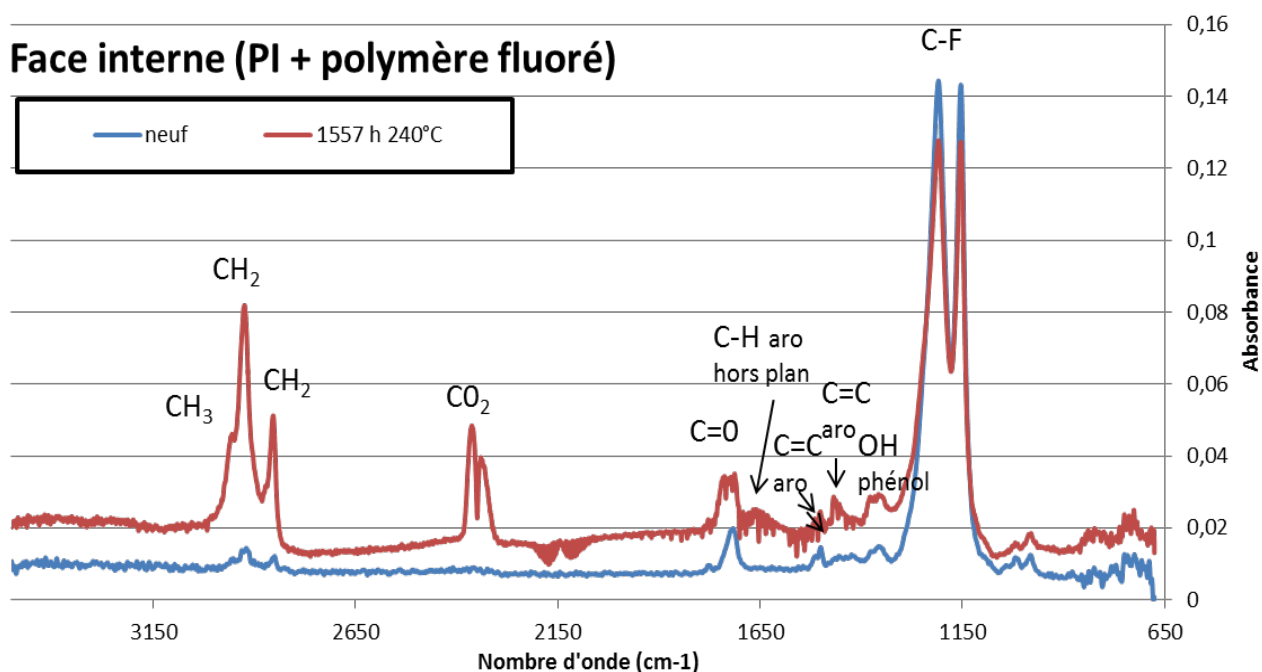


Figure III - 24 : Spectre d'absorption FTIR de la face interne (polymère fluoré proche de l'âme) – aro = aromatique

Après 9072 h de vieillissement, les deux couches de l'isolation du câble se décollent complètement. Ainsi, des spectres FTIR de la couche interne face interne (proche de l'âme - Figure III - 1) et de la couche interne face externe (proche du PTFE - Figure III - 1) du câble vieilli 9072 h ont été réalisés (Figure III - 25). On peut voir que sur ces deux couches les bandes du PI sont de plus en plus présentes puisque la dominance entre les bandes C=O et C-F s'est inversée par rapport à la couche interne du câble vieilli 1557 h. De plus plusieurs pics sont apparus (1790 cm^{-1} , 1290 cm^{-1} , 1240 cm^{-1} , 1090 cm^{-1} , 816 cm^{-1} et 725 cm^{-1}) et sont attribués directement sur le spectre de la Figure III - 25. L'attribution de tous ces pics donne une structure probable de la molécule du PI, proposée en Figure III - 26. En se référant à la littérature [105], il est possible de voir que le spectre obtenu pour le PI est très proche de celui du Kapton® (polymère couramment utilisé en électronique), qui présente des cycles aromatiques avec des fonctions imides fixés en ortho. Néanmoins, il existe quelques différences, qui sont :

- Présence d'un dédoublement des pics sur le spectre du PI à 1500 et 1350 cm^{-1} ;
- Des bandes moins intenses et moins larges à 1350 et 1090 cm^{-1} ;
- Pic plus intense à 1290 cm^{-1} ;
- Absence du pic à 1490 cm^{-1} .

Ces modifications de la composition chimique de la surface peuvent être interprétées comme un clivage induit par la température d'initiation de rupture des liaisons faibles (liaisons van der Waals et hydrogène) entre les chaînes polymères dans les couches PI et fluoropolymères, entraînant une perte partielle de la structure 3D dans la couche examinée. Grâce à ce mécanisme, les propriétés adhésives de la couche de fluoropolymère pourraient être perdues, ce qui pourrait entraîner la formation de vides/interstices entre les couches PI et PTFE d'une part et la couche PI et les conducteurs d'autre part comme illustré par la Figure III - 23 – D (et la séparation des deux couches de l'isolation).

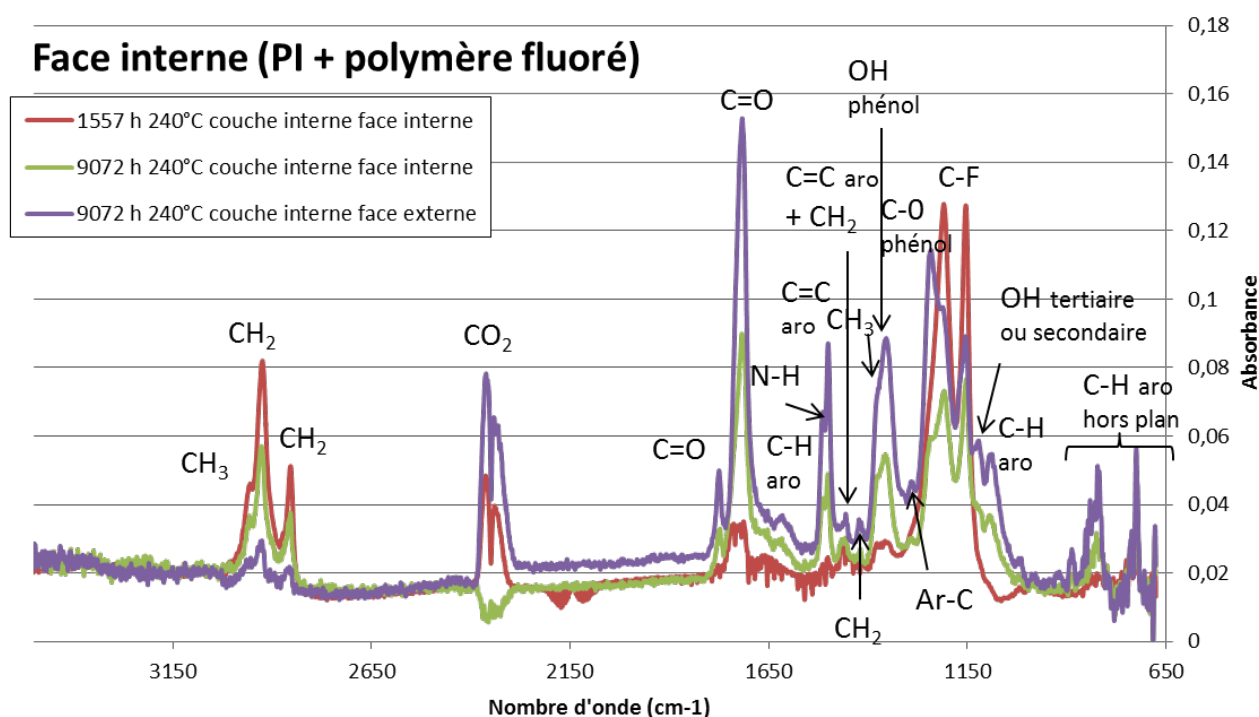


Figure III - 25 : Spectre FTIR de la couche interne des câbles vieillis à 240°C

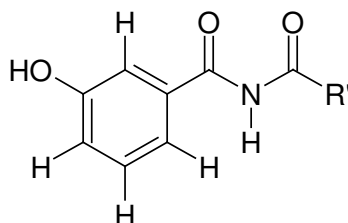


Figure III - 26 : Molécule probable PI

En ce qui concerne la couche externe (PTFE) des câbles vieillis 1557 h et 9072 h aucune modification n'est visible (Figure III - 27).

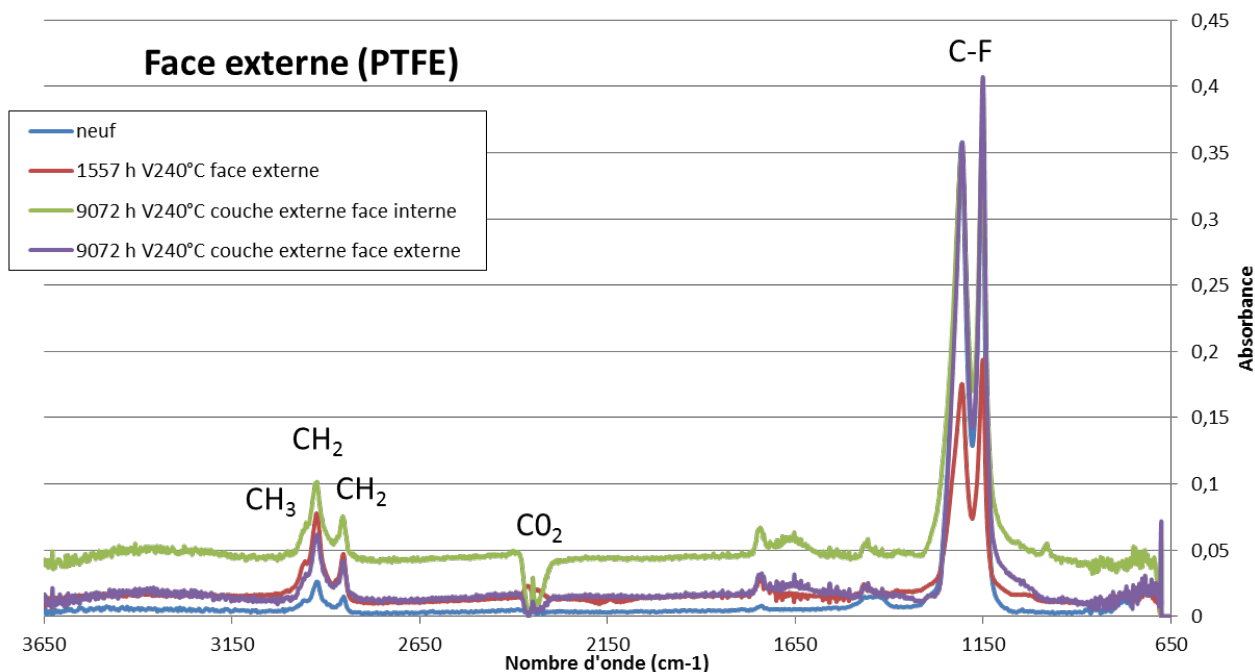


Figure III - 27 : Spectre FTIR couche externe câble neuf et vieillis 1557 h et 9072 h – en rouge couche externe (face en contact avec l'air car couches de PI et PTFE indissociables) en vert couche externe face interne (face en contact avec le PI) – en violet couche externe face externe (face en contact avec l'air)

III.3.2 Vieillissement sous contrainte thermique (240°C) et électrique (540 V DC / 1000 V DC)

III.3.2.1 Mesures de décharges partielles

III.3.2.1.1 Décharges partielles sur support

Rappelons tout d'abord que les vieillissements électriques combinés au vieillissement thermique ont été effectués en insérant les câbles sur la quasi-totalité de leur longueur dans une tresse métallique connectée à la masse. C'est cet ensemble qui a été enroulé sur support. L'âme du câble était alimentée durant les vieillissements sous 540 V DC ou sous 1000 V DC. Ainsi, le système d'isolation électrique a été soumis à un champ électrique sur toute la durée du vieillissement accéléré. Sous 540 V DC, la durée maximale de vieillissement est de 8907 heures. Sous 1000 V DC, la durée maximale de vieillissement est de 4564 heures. Les résultats PDIV et RPDIV obtenus en fonction du temps de vieillissement à 300 mbar sont tracés en Figure III - 28 et Figure III - 29. On observe que les valeurs de tension relevées après vieillissement sous les deux conditions de champ électrique demeurent dans l'intervalle de dispersion des mesures effectuées sur câble neuf. Ce résultat a été confirmé sur toute la

gamme de pression (100 mabr-1000 mbar). Ainsi, on constate que le vieillissement sous contrainte thermique et électrique (dans ces conditions) n'a pas d'effet sur les décharges externes (en termes de valeurs de PDIV et RPDIV) qui ont lieu entre la gaine métallique et la surface externe de l'isolation du câble.

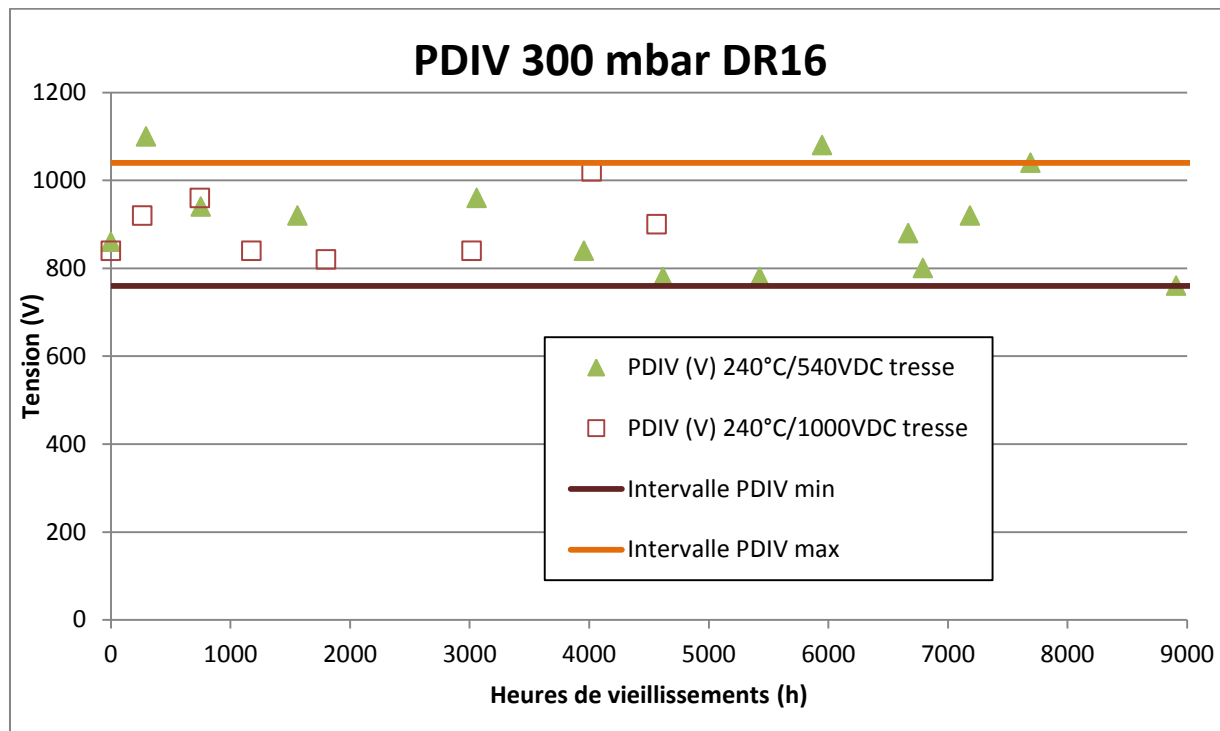


Figure III - 28 : PDIV 300 mbar 240°C/540VDC et 240°C/1000VDC

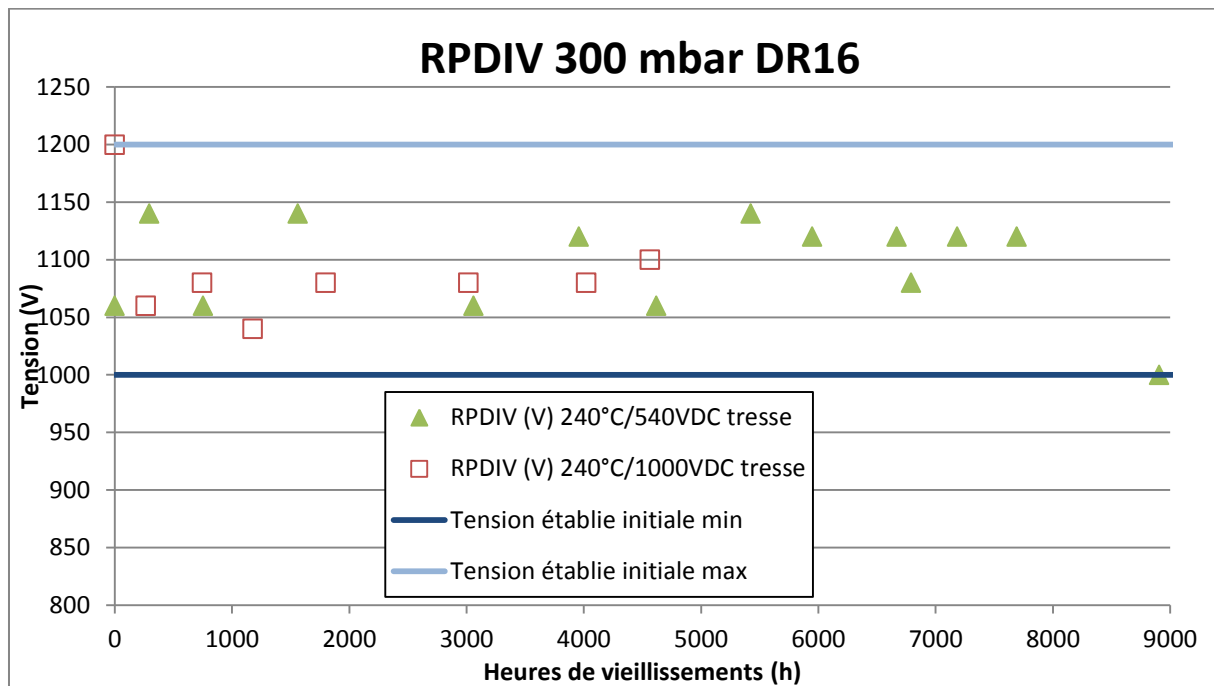


Figure III - 29 : RPDIV 300 mbar 240°C/540VDC et 240°C/1000VDC

III.3.2.1.2 DP dans l'huile

Les DP internes ont alors été examinées en utilisant comme précédemment l'électrode de masse tubulaire immergée dans l'huile isolante.

Pour le vieillissement 240°C/540VDC, les PDIV et RPDIV sont représentés en fonction de la pression dans les Figure III - 30 et Figure III - 31. Un léger effet du vieillissement est visible à partir de 1559 h. A 8907 heures, les tensions sont inférieures aux tensions du câble neuf sur toute la gamme de pression. Ce résultat est plus marqué sur les valeurs de RPDIV.

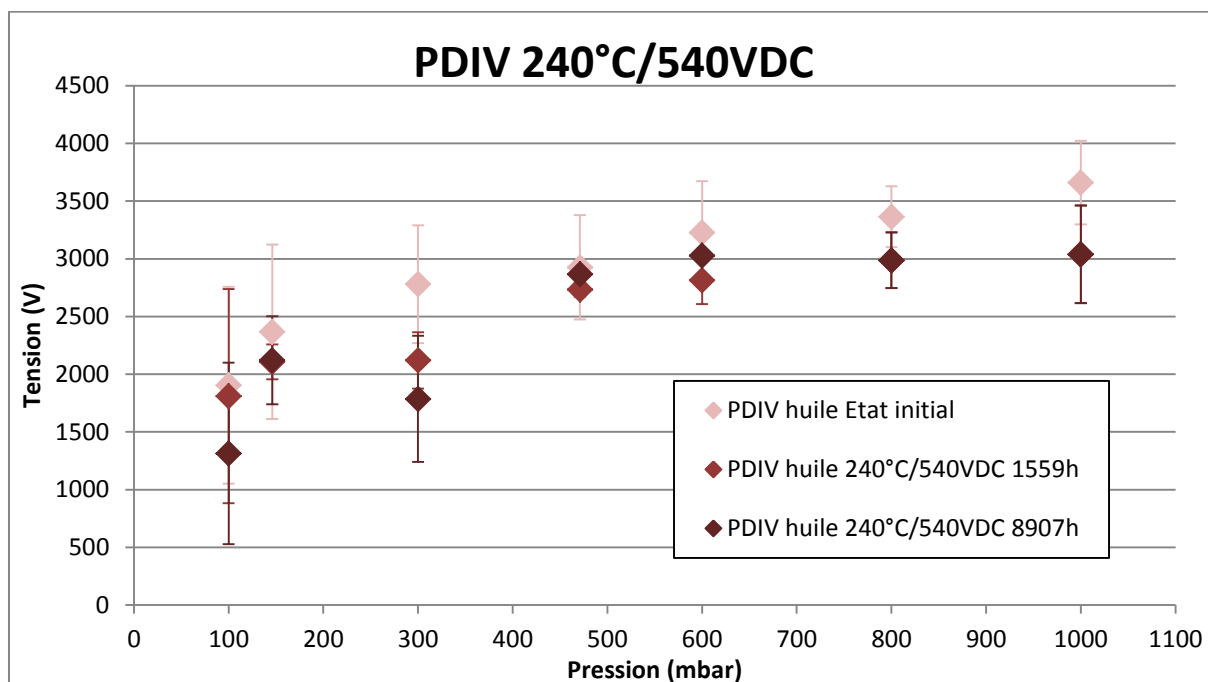


Figure III - 30 : PDIV en fonction de la pression du vieillissement 240°C/540VDC

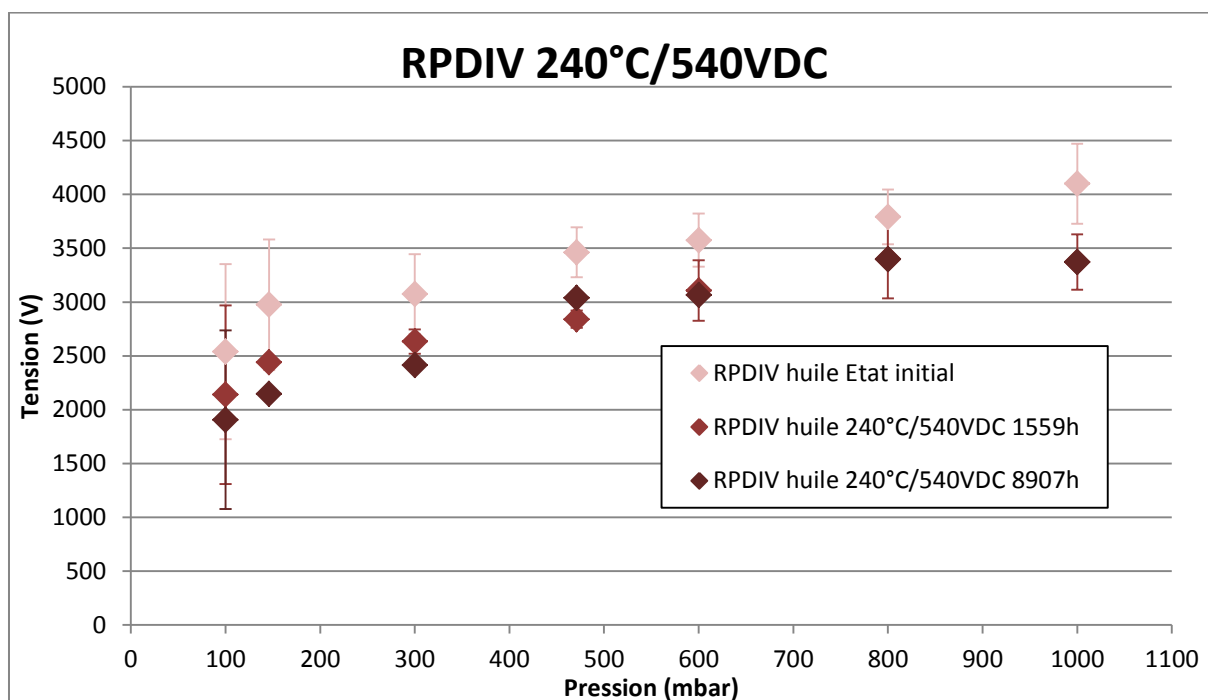


Figure III - 31 : RPDIV en fonction de la pression du vieillissement 240°C/540VDC

Pour le vieillissement 240°C/1000VDC, les PDIV et RPDIV sont tracés en fonction de la pression sur les Figure III - 32 et Figure III - 33. On n'observe pas d'influence significative du vieillissement sur les tensions seuil de décharges même après 4564 h.

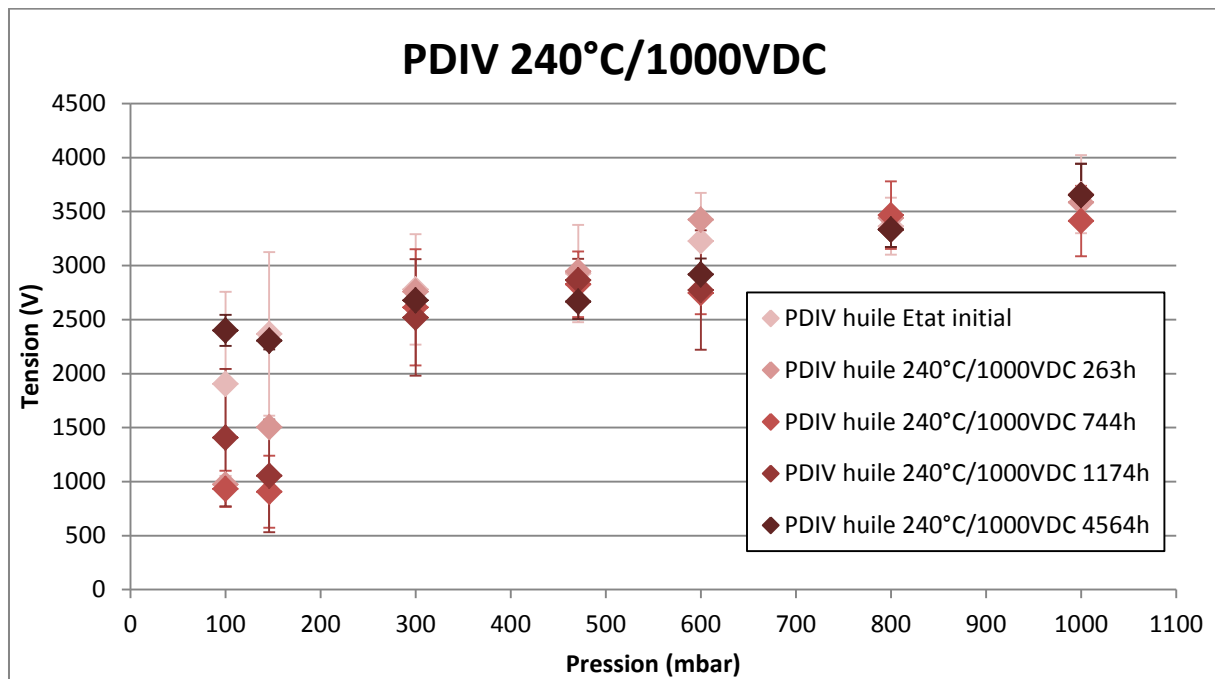


Figure III - 32 : PDIV en fonction de la pression du vieillissement 240°C/1000VDC

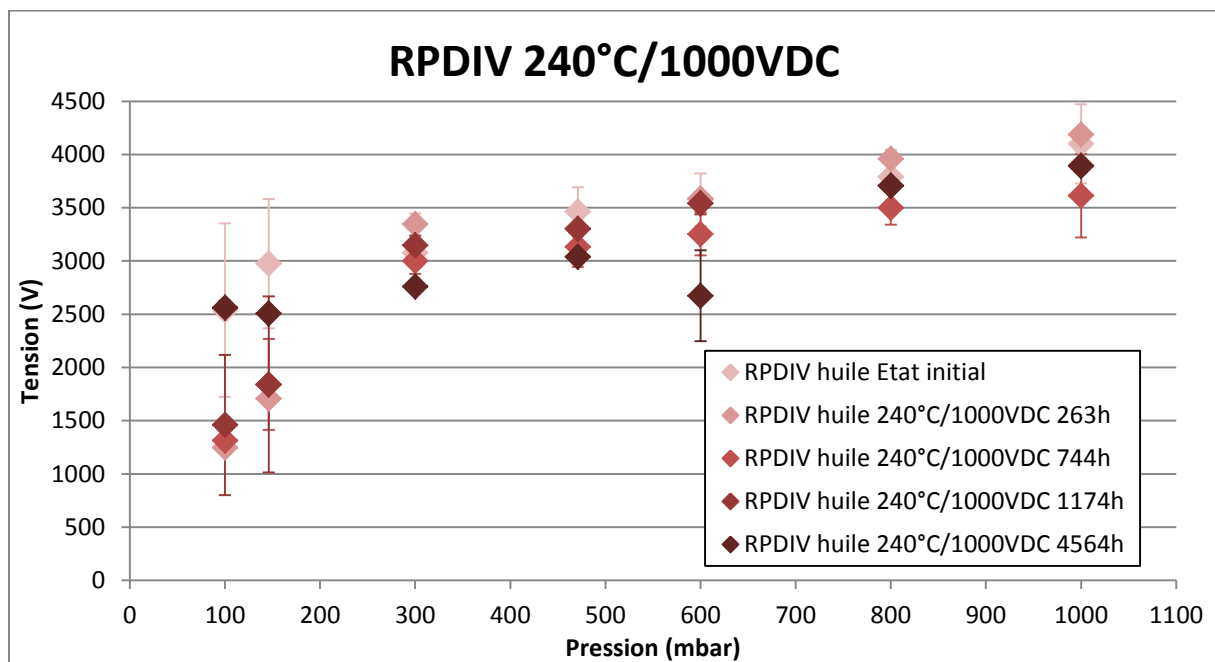


Figure III - 33 : RPDIV en fonction de la pression du vieillissement 240°C/1000VDC

Afin de vérifier si la tension (champ électrique imposé) est un facteur à prendre en compte au cours du vieillissement, un comparatif des 3 types de vieillissement de durées équivalentes a été effectué. Ainsi les Figure III - 34 et Figure III - 35 présentent respectivement les valeurs de PDIV et RPDIV des vieillissements à 240°C sans et avec tension en fonction de la pression à environ 1500h de vieillissement. Au vu de ces courbes, il est difficile de déterminer une

tendance sur les vieillissements, surtout pour les PDIV. Néanmoins, on peut relever qu'entre 300 et 1000 mbar, les RPDIV du vieillissement 240°C/540VDC sont plus faibles. Il y aurait donc un léger effet de la tension. D'autre part, le câble vieilli sous une tension de 1000 V DC a subi environ 400 h de vieillissement en moins ; un effet de la tension pendant ces 400 h pourrait avoir lieu.

Malheureusement, il n'est pas possible de comparer à des valeurs de durée de vieillissement plus longues car le vieillissement 240°C/1000VDC a dû être arrêté à 4564 h et nous n'avons pas de mesure disponible à cette durée pour les deux autres vieillissements. Ces mesures n'ont donc pas permis de trancher clairement sur la contribution du champ électrique couplé à la contrainte thermique vis-à-vis des tensions seuil de DP au cours des vieillissements accélérés.

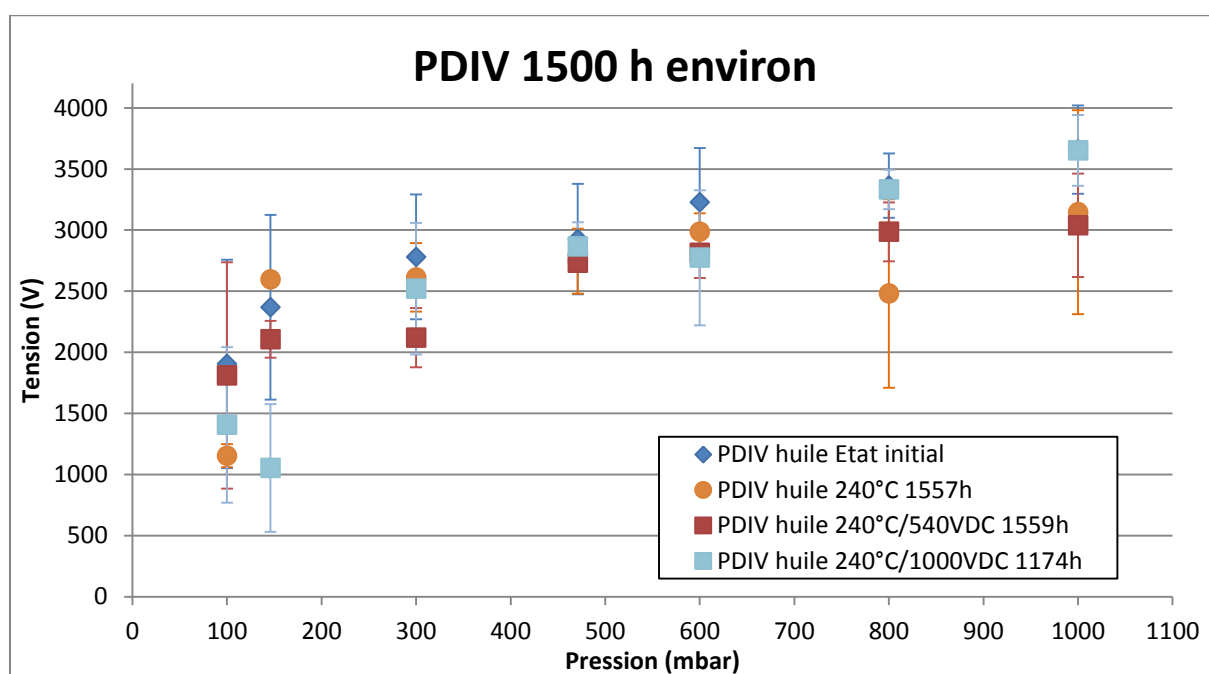


Figure III - 34 : Comparaison des PDIV à environ 1500 h des 3 vieillissements thermiques avec et sans contrainte électrique.

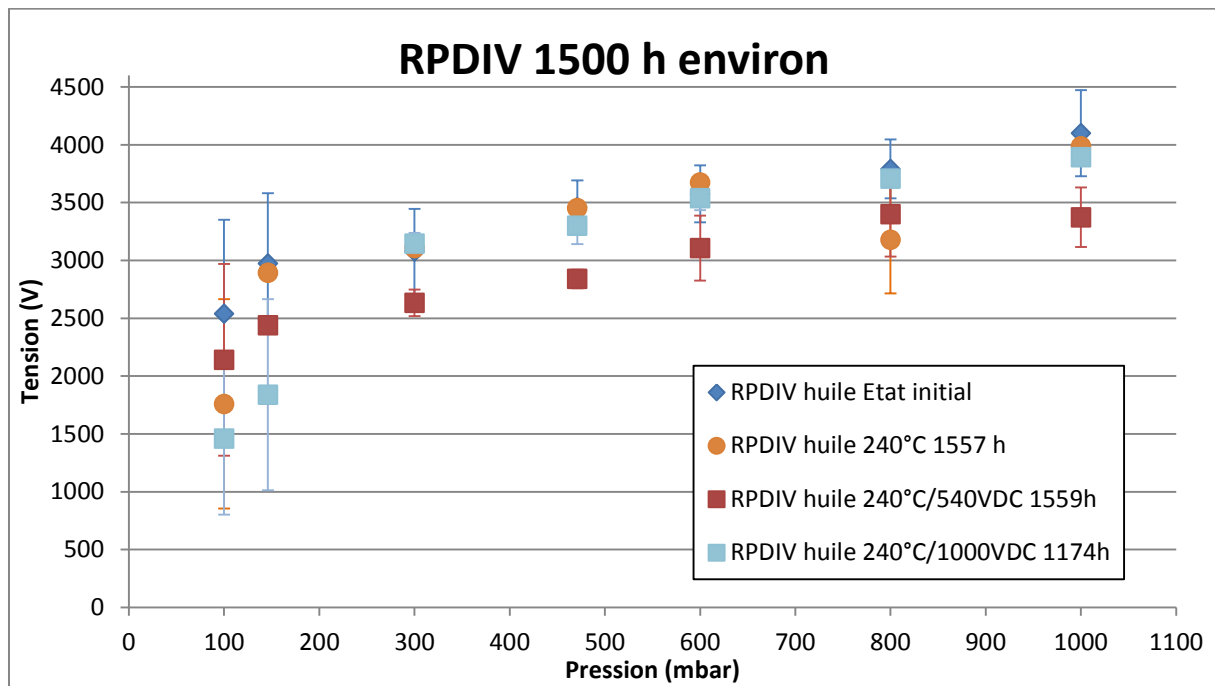


Figure III - 35 : Comparaison des RPDIV à environ 1500 h des 3 vieillissements thermiques avec et sans contrainte électrique.

III.3.2.2 Propriétés physicochimiques

L'effet des vieillissements sur les propriétés physicochimiques est présenté dans cette section. Le Tableau III - 7 présente les valeurs de température de transition de phase pour le vieillissement 240°C/540VDC à l'aide des techniques DSC et ATG. Nous n'avons pas pu obtenir de valeurs supplémentaires ni aucune valeur pour le câble vieilli sous 240°C/1000VDC suite au déménagement de mon laboratoire d'accueil industriel pour la température de dégradation (ATG). On voit peu d'influence de ce vieillissement sur les différentes températures. Néanmoins, si on compare aux valeurs obtenues dans le cas du vieillissement thermique seul (Tableau III - 6), les valeurs obtenues à 1559 h 240°C/540VDC comparées à celles obtenues à 1557 h 240°C sont plus élevées et se différencient peu des valeurs du câble neuf. Les valeurs de température de fusion, à 8907h après un vieillissement 240°C/540VDC, ont été obtenues avec un autre équipement, ce qui pourrait expliquer la légère remontée (valeur identique au câble neuf avec cet équipement).

On ne constate donc pas d'influence significative du couplage entre contrainte thermique et contrainte électrique sur les températures de dégradation et de transition de phase du système d'isolation pour les durées de vieillissement considérées.

Tableau III - 7 : Températures de transition de phase pour le câble vieilli sous 240°C/540VDC

Grandeur	Etat initial	1559 h 240°C/540VDC	6790 h 240°C/540VDC	8907 h 240°C/540VDC
Td	529°C ± 5°C	535°C ± 5°C	519°C ± 5°C	-
Tg	261°C ± 10°C	-	236°C ± 10°C	-
Tf	326°C ± 5°C	326°C ± 5°C	310°C ± 5°C	325°C ± 5°C

L'analyse par radiographie à rayon X des câbles a été réalisée sur les deux échantillons les plus vieillis : 8907h à 240°C/540VDC (Figure III - 36) et 4564h à 240°C/1000VDC (Figure III - 37).

Dans le cas du câble vieilli à 8907h à 240°C/540VDC, aucun défaut n'est détecté sur la partie rectiligne du câble. Néanmoins, des décollements apparaissent au niveau des zones de câble ayant subi une contrainte mécanique (rayon de courbure minimum). Comme des décollements sont détectés sur toute la longueur du câble vieilli pendant 9072h à 240°C, ces observations peuvent être interprétées de plusieurs façons :

- Les phénomènes ont lieu dans les 165 heures séparant les deux vieillissements (peu probable).
- Le câble neuf (mis en vieillissement à 240°C) a subi des contraintes mécaniques différentes qui l'auraient fragilisé lors de la mise en vieillissement.
- Des décollements sont présents mais trop faibles en amplitude pour être visualisés par cette technique.

Dans le cas du câble vieilli à 4564h à 240°C/1000VDC, aucun décollement n'est visible sur toute la longueur du câble. La durée du vieillissement est trop faible pour observer des modifications structurelles du câble.

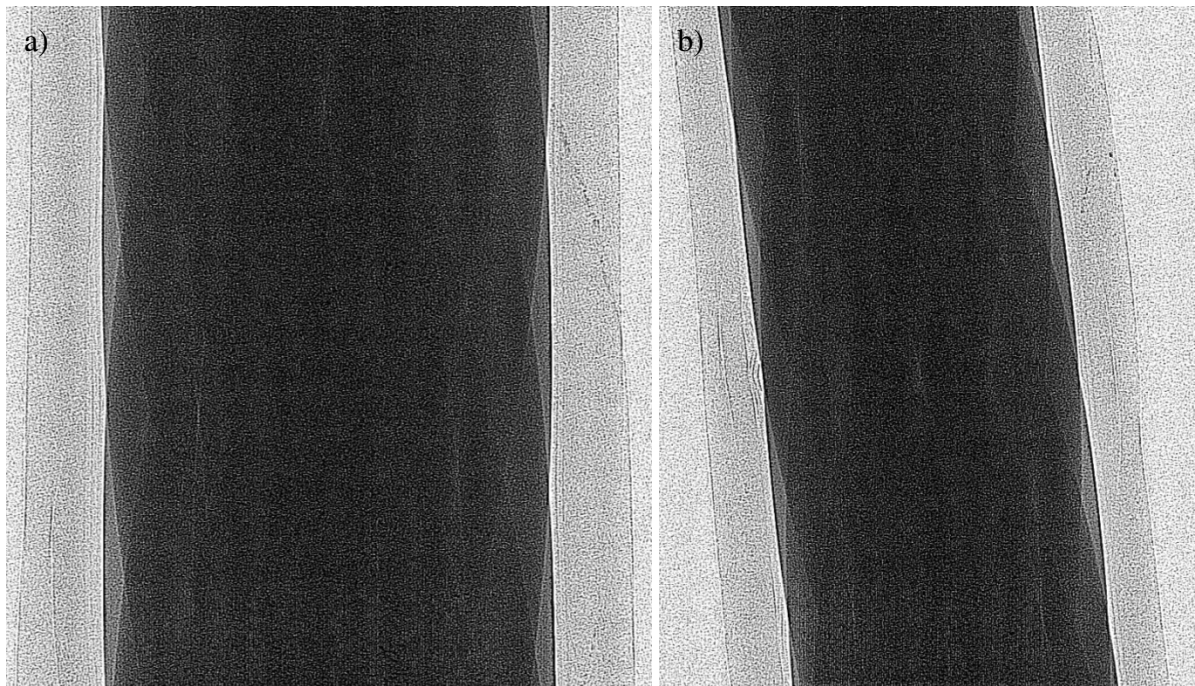


Figure III - 36 : Radiographie X du câble vieilli 8907h à 240°C/540 VDC - a) partie rectiligne du câble ; b) au niveau du rayon de courbure.

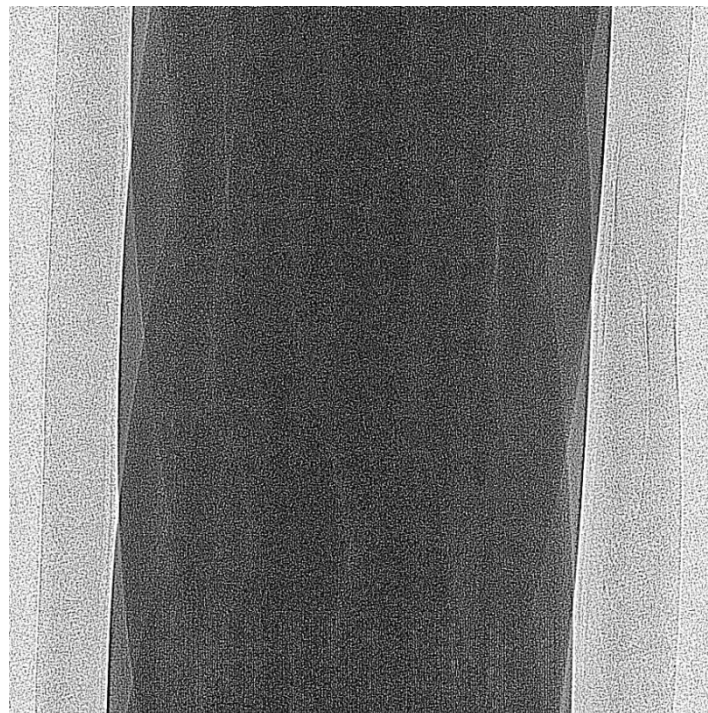


Figure III - 37 : Radiographie X du câble vieilli 4564h à 240°C/1000VDC.

La spectroscopie FTIR a été réalisée sur l'isolation du câble au cours et après les deux vieillissements thermiques sous tension. Les résultats d'analyse de surface de la face interne à 240°C/540VDC sont présentés à la Figure III - 38. On peut voir qu'après 6790 h, il y a très

peu de modifications et pas de séparations des deux couches. Néanmoins, nous pouvons observer une évolution à partir de 8907 h : le spectre du PI apparaît (l'attribution est la même que dans le cas à 240°C car c'est le même isolant et est intégrée sur l'image). Les deux couches de l'isolation (PTFE et PI) se séparent physiquement avant la mesure. les bandes CF ont chuté en absorbance (couche interne face interne) ou disparu (couche interne face externe). Il y a donc, comme à 240°C, des modifications de la composition chimique de la surface qui peuvent être interprétées comme un clivage induit par la température des liaisons faibles (liaisons van der Waals et hydrogène) entre les chaînes polymères dans les couches de PI et de fluoropolymères. Ceci peut entraîner une perte partielle de la structure 3D dans la couche examinée. Par ce mécanisme, les propriétés adhésives de la couche de fluoropolymère pourraient être perdues, ce qui pourrait entraîner la formation de vides/interstices entre les couches de PI et de PTFE d'une part et entre la couche de PI et les conducteurs d'autre part (et la séparation des deux couches de l'isolation).

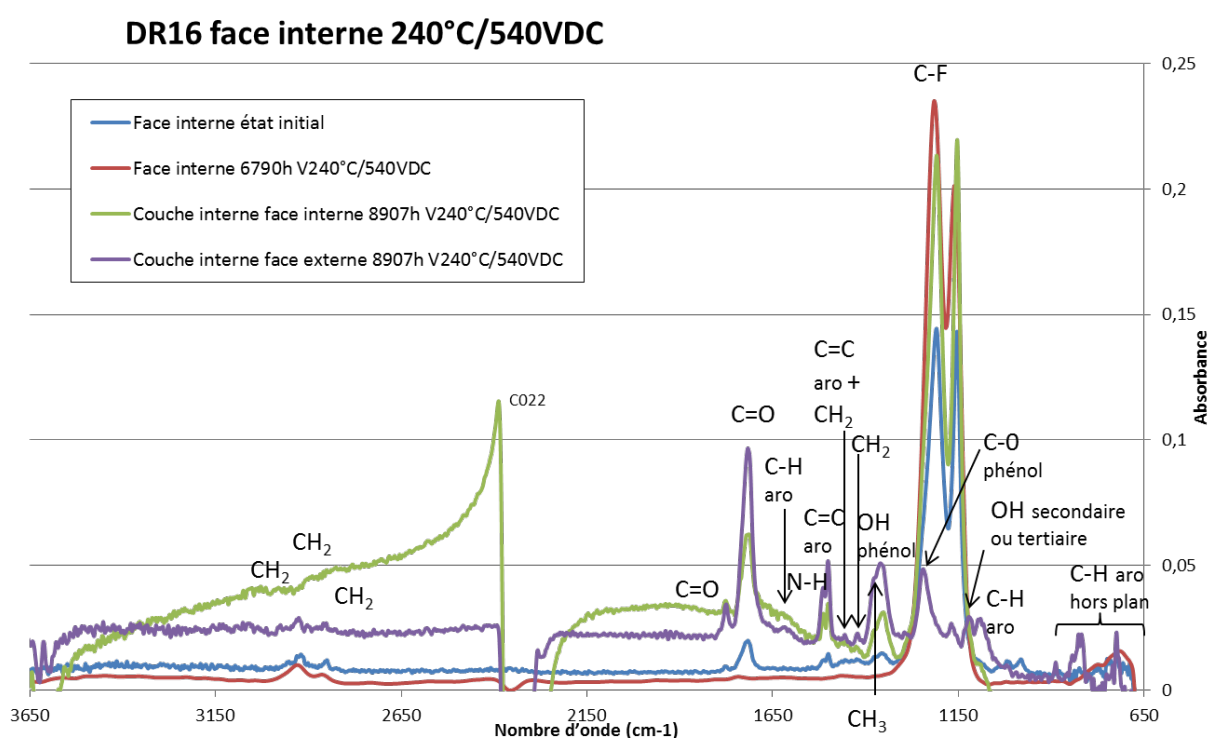


Figure III - 38 : Spectres FTIT face interne 240°C/540VDC

La couche interne vieillie à 240°C/1000VDC a aussi été étudiée et les spectres obtenus sont tracés à la Figure III - 39. Aucune séparation des couches n'a pu être réalisée malgré des effets du vieillissement visibles sur les spectres. A partir de 1174 h, on voit déjà apparaître les bandes correspondant au PI (attribuées directement sur le spectre). Après 4564 h, les bandes

CF ont diminué et les bandes correspondant au PI sont très largement visibles. Comme dans les deux cas précédents, il y a des modifications chimiques dues à la température qui induisent la perte partielle de la structure 3D, néanmoins pas assez pour induire la formation d'interstices entre les différentes couches et donc le décollement des deux couches d'isolation.

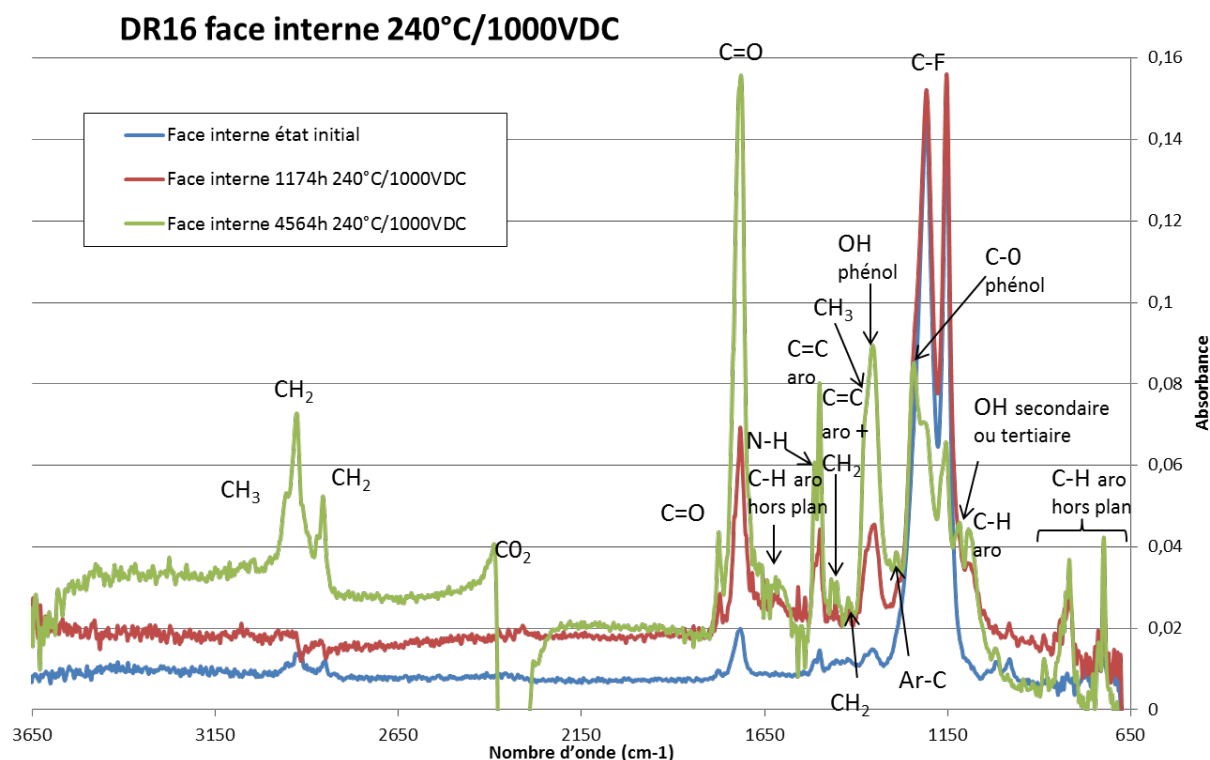


Figure III - 39 : Spectres FTIR face interne 240°C/1000VDC

La couche externe du câble a aussi été analysée par spectroscopie IR (Figure III - 40) en fonction de la durée de vieillissement à 240°C/540VDC. Après 8907 h de vieillissement, les deux couches de l'isolation se séparent. Mais pour plus de visibilité, la couche externe face interne (proche de la couche de PI) n'est pas représentée sur cette figure puisqu'elle est identique à la couche externe face externe (PTFE à l'extérieur du câble). On peut voir que plus la durée de vieillissement augmente, plus le rapport des pics CF/CH₂ diminue. Les pics du PI commencent aussi à être de plus en plus visibles avec un vieillissement plus long. L'effet du vieillissement 240°C/540VDC est semblable à celui du thermique seul (240°C).

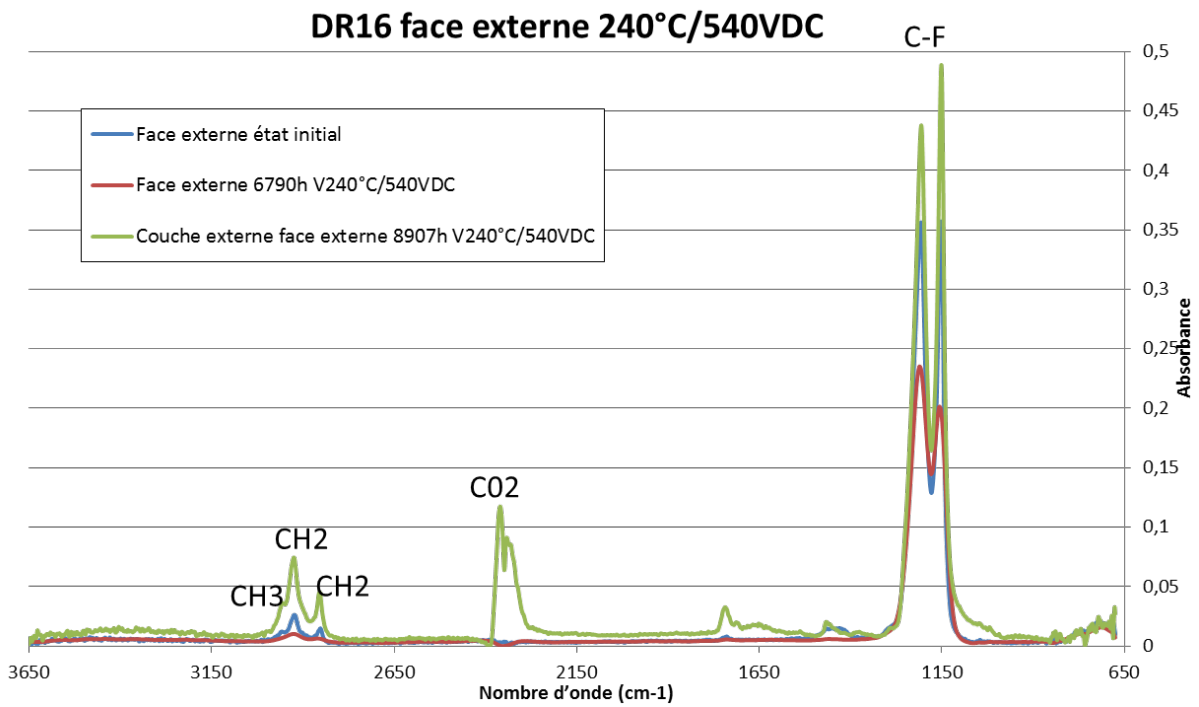


Figure III - 40 : Spectres FTIR face externe 240°C/540VDC

La couche externe du câble vieilli à 240°C/1000VDC a aussi été étudiée et les spectres sont présentés en Figure III - 41. Même après 4564 h de vieillissement, il n'y a pas de séparation entre les deux couches d'isolation. De plus, il n'y a qu'une légère diminution dans le rapport des pics CF/CH₂ après 4564 h. Ceci est confirmé par l'absence de décollement observée par radiographie X.

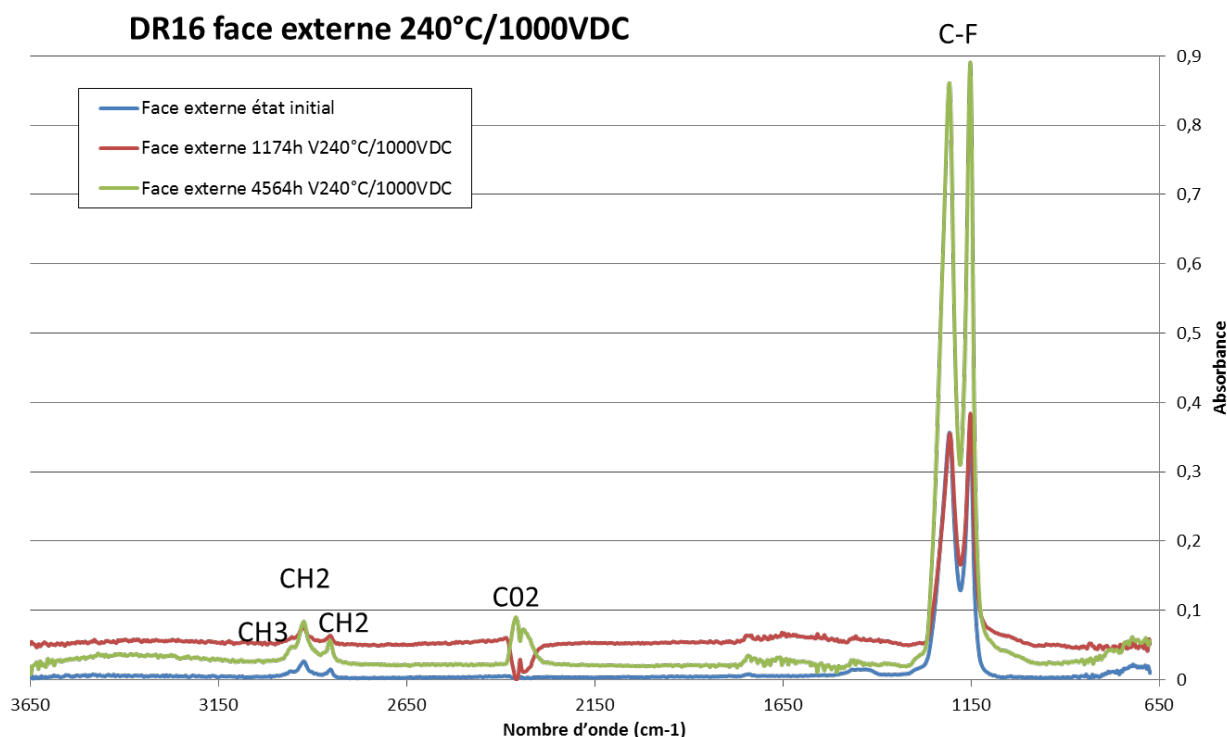


Figure III - 41 : Spectres FTIR face externe 240°C/1000VDC

III.4 Vieillissement thermique dynamique (VRT)

III.4.1 Effet du vieillissement sur les décharges partielles

De la même façon que pour les essais de vieillissement thermiques statiques, les résultats obtenus au cours et après l'essai de vieillissement en cycles thermiques (-55°C à 175°C avec une rampe de 20°C/min de -20°C à +125°C, avec un cycle d'une durée de 62,50 min) vont être présentés en termes de tensions seuil d'apparition des décharges externes et internes ainsi que d'évolution des propriétés physicochimiques de l'isolation.

III.4.1.1 Décharges partielles sur support

Les DP ont été mesurées au cours de l'essai de vieillissement à différentes pressions en connectant le support à la masse et en alimentant l'âme du câble. Les Figure III - 42 et Figure III - 43 représentent respectivement les PDIV et RPDIV du câble en fonction du nombre d'heures de vieillissement en cyclage thermique à 300 mbar. Dans le cas des PDIV, on voit une fluctuation proche de la valeur supérieure de l'intervalle de confiance mais les tensions restent dans cet intervalle après 7069 h de vieillissement (soit 6780 cycles). Pour les RPDIV,

les valeurs de tension demeurent dans cet intervalle de confiance jusqu'à 7069 h de vieillissement VRT. Le même résultat a été obtenu sur toute la gamme de pression examinée (100 mbar – 1000 mbar). Il n'y a donc pas d'effet des cycles thermiques sur les décharges externes en termes de tension seuil d'apparition.

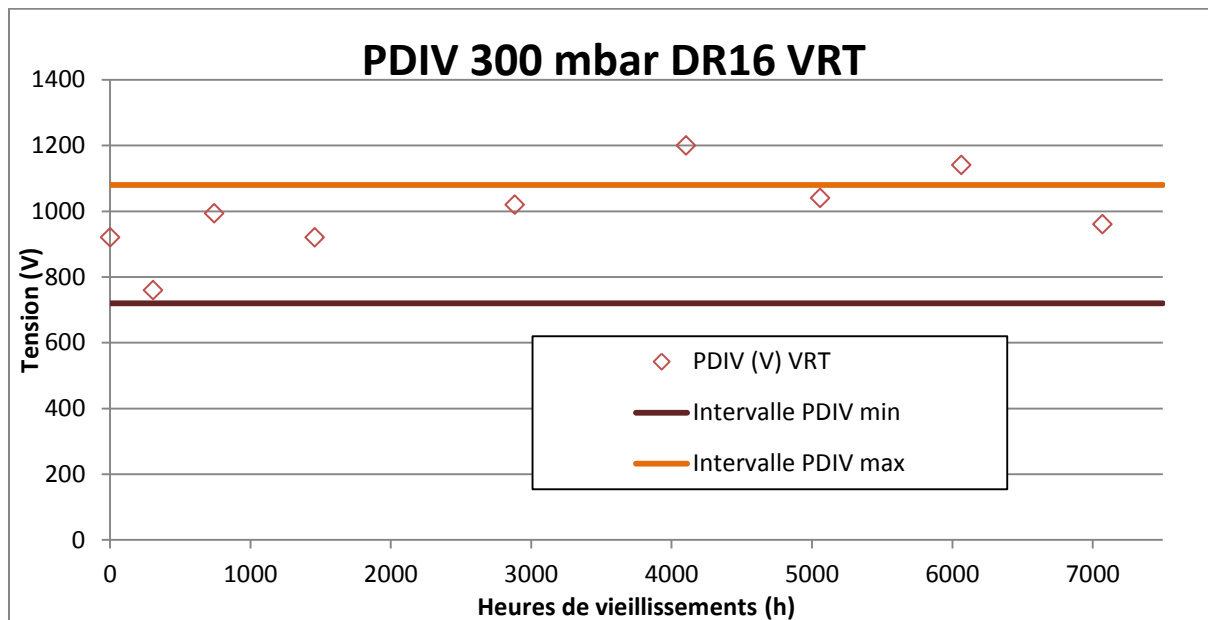


Figure III - 42 : PDIV décharges externes sous 300 mbar au cours du vieillissement VRT.

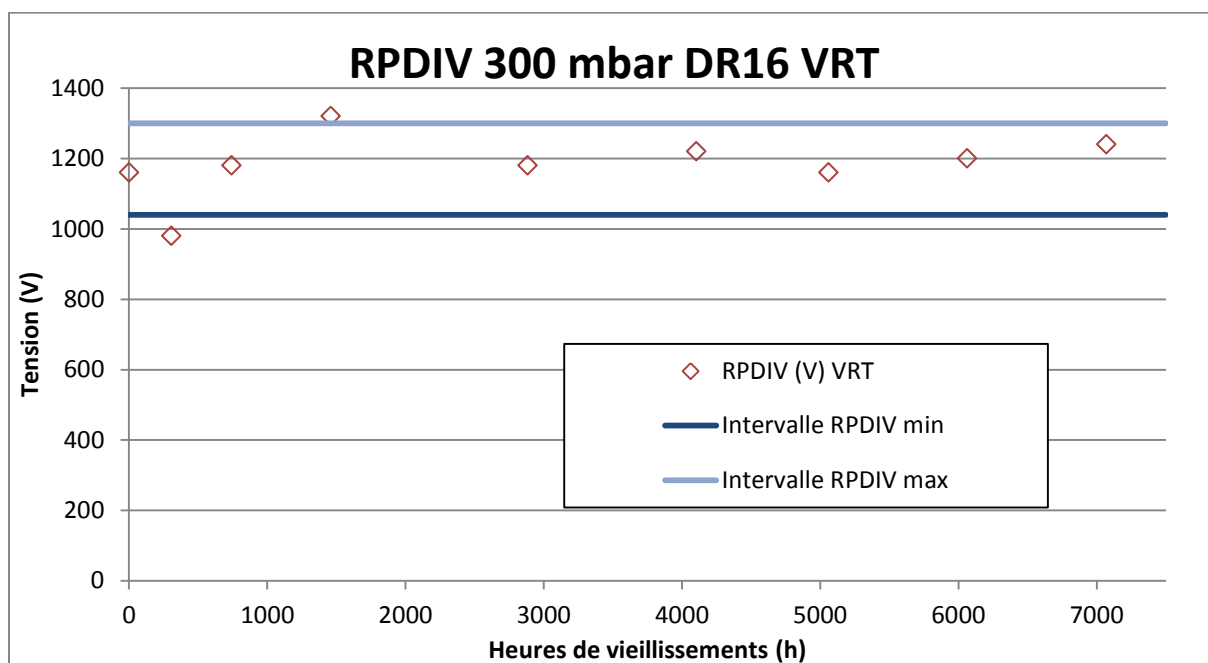


Figure III - 43 : RPDIV décharges externes sous 300 mbar au cours du vieillissement VRT.

III.4.1.2 Décharges partielles dans l'huile

Les DP internes ont été détectées au cours du vieillissement en utilisant le même dispositif que précédemment. Les valeurs de PDIV et RPDIV mesurées sont reportées en fonction de la pression sur les Figure III - 44 et Figure III - 45 respectivement. L'examen des courbes obtenues est difficile en raison d'une certaine fluctuation des tendances pour ce qui concerne l'influence du vieillissement en cyclage thermique. On observe que les PDIV du câble vieilli à plus de 7600 h sont clairement inférieures à celles du câble neuf de 100 mbar à 300 mbar et de 800 à 1000 mbar. Pour les RPDIV, on observe le même phénomène pour 100 mbar, 146 mbar, 800 mbar et la pression atmosphérique. On peut donc conclure qu'il y a un effet de ce vieillissement sur les décharges internes sauf pour les pressions intermédiaires.

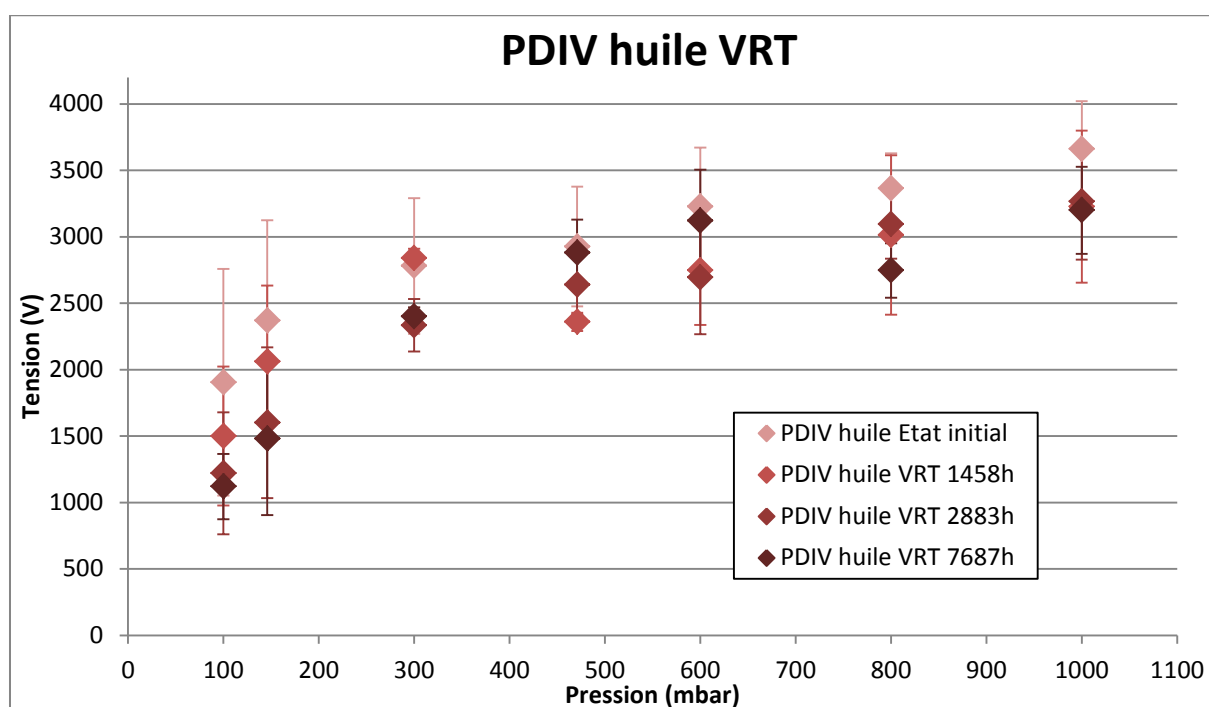


Figure III - 44 : PDIV décharges internes en fonction de la pression pour différents vieillissements VRT.

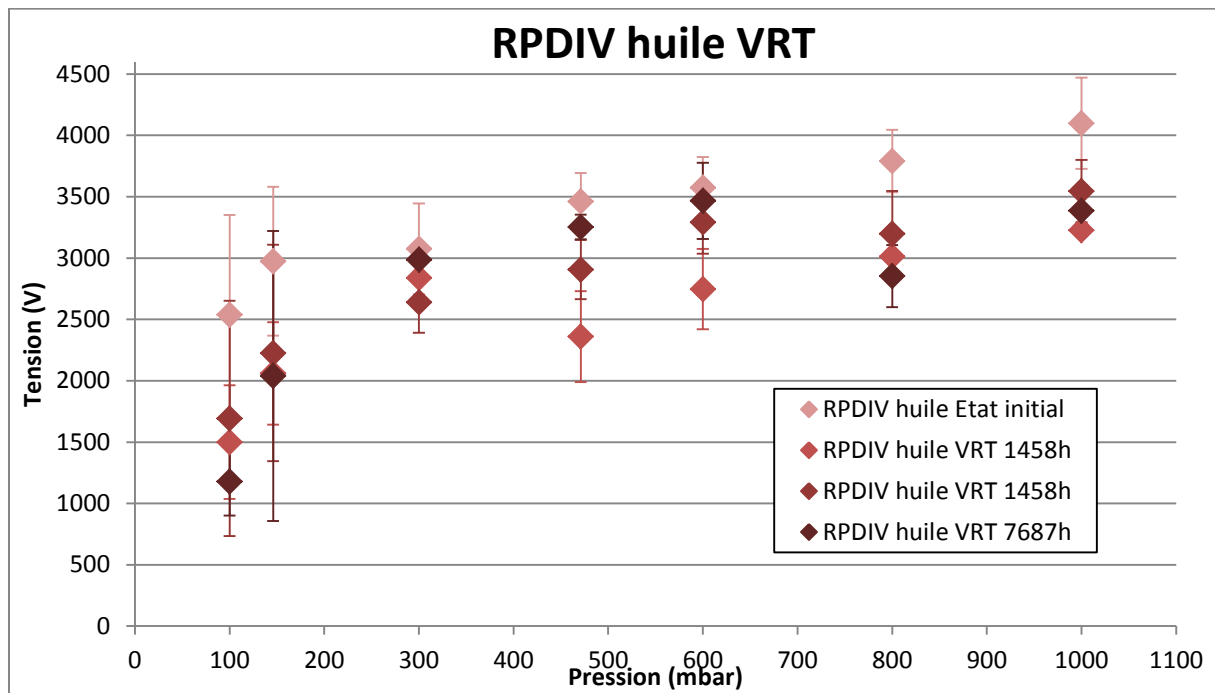


Figure III - 45 : RPDIV décharges internes en fonction de la pression pour différents vieillissements VRT.

III.4.2 Effets du vieillissement sur les propriétés physicochimiques

L'étude des propriétés physicochimiques du câble vieilli sous variation rapide de température n'a pu être réalisée que très partiellement. Grâce à l'ATG, la température de dégradation après 2883 h de vieillissement a été obtenue. Elle s'élève à $530^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ (avec 95% de perte de masse). Si cette valeur est comparée à celle de l'état initial ($529^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ avec 100% de perte de masse), il est conclu qu'il n'y a pas de modification à 2883 h. Grâce à la DSC, la température de fusion après 7687 h de vieillissement est de $325^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. A l'état initial, cette valeur est de $326^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, il n'y a donc aucune modification à 7687 h.

Une radiographie à rayon X a été réalisée sur l'échantillon de câble ayant subi le vieillissement le plus avancé, soit 7687 h (Figure III - 46). Aucun décollement n'est visible sur toute la longueur du câble. Ainsi, la durée du vieillissement est trop faible pour qu'il y ait des modifications structurales de l'isolation observables en radiographie par rayons X.

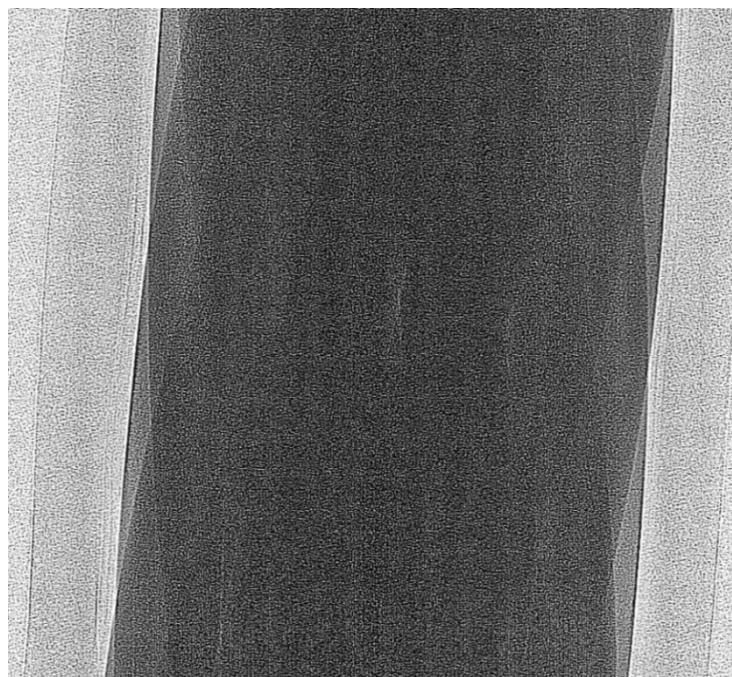


Figure III - 46 : Radiographie X 7687h VRT

Enfin, l'analyse de surface par spectroscopie FTIR a été réalisée après 2883 h et 7687 h de vieillissement sur les faces externes (Figure III - 47) et internes (Figure III - 48). L'attribution des bandes des différents spectres est directement reportée sur les deux figures. Sur la face externe, aucune modification n'est visible après 7687 h de vieillissement. Il en est de même pour la face interne après 2883 h de vieillissement. En revanche, après 7687 h, on peut voir que les bandes correspondant au PI sont de plus en plus intenses comparées à celles du CF. Comme dans les mesures de vieillissement précédentes, il y a des modifications chimiques dues aux cycles de température qui induisent la perte partielle de la structure 3D, néanmoins, pas assez pour induire des interstices entre les différentes couches et donc d'une part le décollement des deux couches de l'isolation et d'autre part des interstices entre l'isolant interne et les brins de toron qui induiraient une baisse significative des tensions d'apparition de DP. Ceci est confirmé par l'absence de décollement visible par radiographie à rayon X.

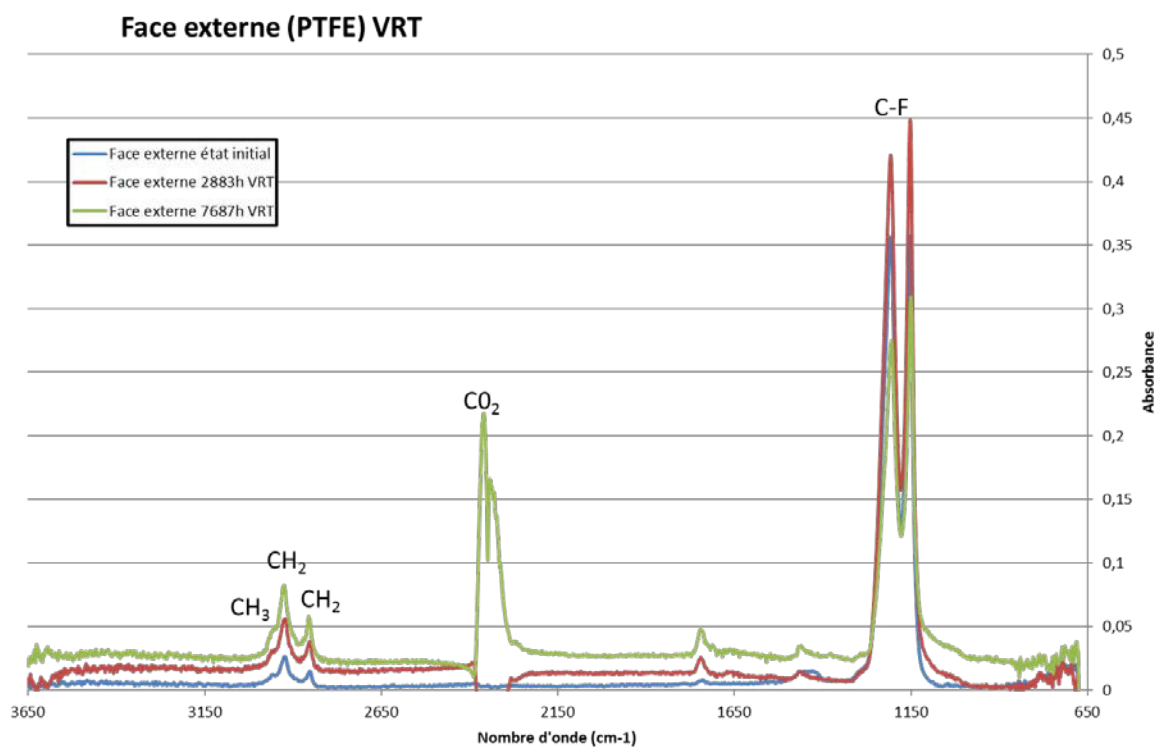


Figure III - 47 : Spectres FTIR face externe VRT

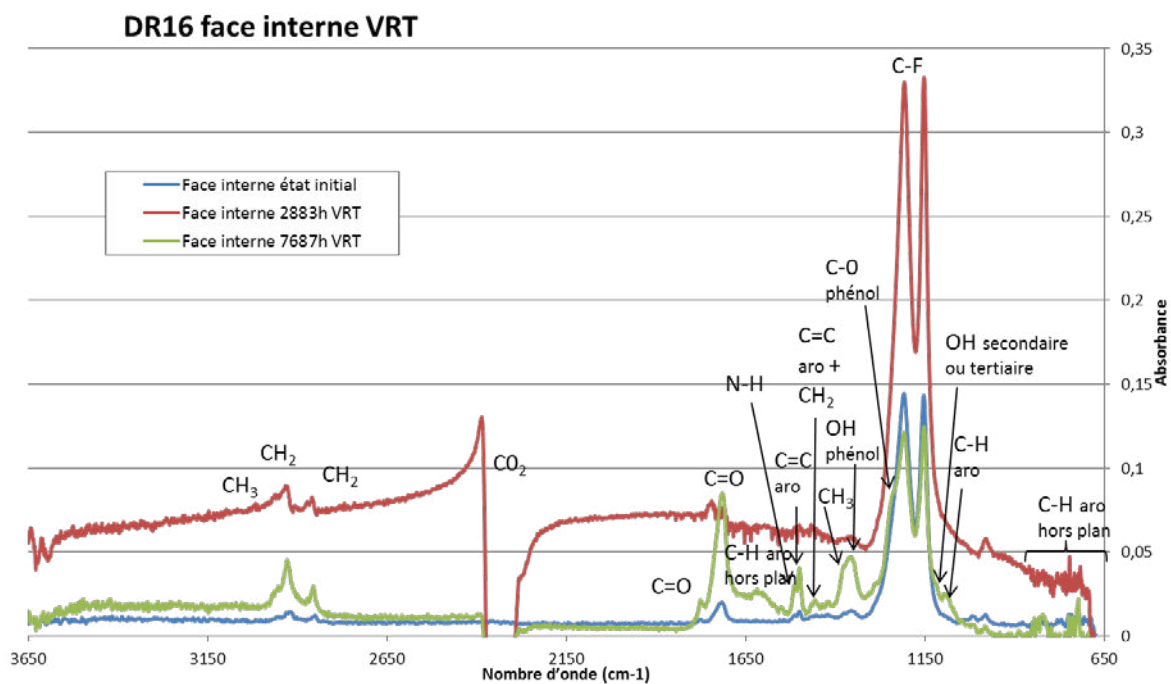


Figure III - 48 : Spectres FTIR de la face interne après VRT

III.5 Conclusion

Ce chapitre présente la caractérisation physicochimique et l'étude du comportement vis-à-vis des décharges partielles des câbles (DR16) neufs et vieillis.

A l'état neuf, des décharges externes, localisées entre la face externe du système d'isolation électrique et une électrode de masse (support utilisé pour les vieillissements ou électrode tubulaire) ont été détectées pour des tensions de RPDIV comprises entre 800 V et 2000 V sur une gamme de pression comprise entre 100 mbar et 1000 mbar. Des décharges internes ont également été détectées. Leur tension seuil d'apparition est aussi dépendante de la pression et les valeurs de RPDIV sont comprises entre 2500 V et 4000 V. Ces décharges s'amorcent et se développent dans des interstices situés entre la face interne de l'isolant et les brins de l'âme du câble. Ces localisations ont été confirmées par calcul des tensions imposées aux bornes des différents intervalles gazeux à l'aide d'une modélisation électrostatique et confrontation avec la courbe de Paschen. Des vieillissements thermiques statiques avec ou sans tension imposée de même qu'un vieillissement thermique dynamique ont été entrepris sur ces câbles. En raison de contraintes logistiques, la durée de ces différents types de vieillissement a été inégale. Le vieillissement thermique statique sans tension imposée a été conduit sur la durée la plus longue (9072 h) ; c'est sur ce vieillissement que les investigations ont été les plus poussées.

En termes de tension seuil d'apparition, aucun effet des différents vieillissements sur les décharges externes n'a été observé. Par contre, on observe des effets plus ou moins marqués des différents vieillissements sur les décharges internes après 9072 h à 240°C, 8907 h à 240°C/540VDC et 4564 h à 240°C/1000VDC. Pour le vieillissement thermique seul, après 9072 heures, on observe une chute de la valeur de RPDIV comprise entre 800 V et 1300 V (selon le niveau de pression) par rapport au câble neuf. De plus, les vieillissements apportent des modifications chimiques de l'isolant, en particulier après 9072 h : modification structurelle de la couche interne avec apparition de décollements (radiographie X pour 240°C) certainement liée à une modification de composition chimique des surfaces (spectres FTIR pour 240°C avec ou sans tension) et des évolutions de température de transition de phase.

Dans le cas du vieillissement thermique dynamique (VRT), on observe un effet sur les décharges internes aux faibles et hautes pressions. De plus, les vieillissements apportent des modifications chimiques de l'isolant : on voit ainsi une légère modification de structure de la couche interne après 7687 h (apparition des pics correspondant au PI sur le spectre FTIR) mais non visible par radiographie X.

CHAPITRE IV : Potentiel de surface

IV.1 Introduction

Suite à la caractérisation des propriétés physicochimiques et du comportement vis-à-vis des DP du câble neuf et des câbles vieillis, il convient d'étudier les propriétés diélectriques du système d'isolation des câbles et notamment leur évolution avec les différents vieillissements accélérés entrepris dans ce travail.

En effet, un des objectifs de cette étude était de fournir des données expérimentales permettant d'alimenter de futurs modèles au sein d'Airbus destinés à déterminer l'évolution des matériaux diélectriques sur la répartition du champ et ainsi prévoir le risque de décharges.

Dans un premier temps, la spectroscopie diélectrique (Solartron) a été utilisée pour mesurer la constante diélectrique (sur une gamme de fréquences comprises entre 10 μ Hz et 10 MHz). Cependant, les échantillons d'isolants étaient trop petits, trop courbés et la métallisation de surface nécessaire n'a pas fonctionné (pas d'adhésion entre la laque et le PTFE en surface et le polymère fluoré à l'intérieur) quelle que soit la méthode utilisée (laque d'argent, scotch métallisé...).

Une seconde méthode a été de mesurer la capacité d'échantillons de câbles à plusieurs fréquences précises (et non par balayage en fréquence comme avec le Solartron) à l'aide d'un analyseur d'impédance. A cette fin, nous avons inséré le câble dans une tresse métallique de longueur connue et serré chaque extrémité délicatement avec des colliers de serrage. Ainsi, un modèle simple de condensateur coaxial peut être considéré : $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{2\pi l}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)}$ avec ε_0 la permittivité du vide, ε_r la permittivité relative du diélectrique, l la longueur de la section cylindrique de diélectrique délimitée par un conducteur interne (âme du câble) de rayon R_1 et par un conducteur externe (tresse métallique) de rayon R_2 .

Des mesures ont été réalisées sur plusieurs câbles neufs puis sur des câbles vieillis thermiquement et après exposition à l'humidité durant plus de 1500 h. Malheureusement les valeurs obtenues après vieillissement restaient dans la dispersion de mesure constatée à l'état initial.

La troisième méthode qui a été utilisée est la méthode du potentiel de surface, consistant en une mesure dynamique du déclin et du retour de potentiel (le protocole est décrit dans le chapitre 2). Le déclin de potentiel donne la réponse d'un matériau à l'application d'une charge électrique, qui peut impliquer plusieurs mécanismes (polarisation, conduction ou transport de charge dans le matériau). L'existence d'un retour de potentiel signifie qu'une courte

neutralisation n'est généralement pas suffisante pour relaxer les contraintes appliquées pendant la polarisation.

Cette technique a permis d'obtenir des résultats raisonnablement reproductibles, cohérents et exploitables. Ce sont ces résultats qui seront détaillés dans ce chapitre.

IV.2 Résultats

IV.2.1 Câble neuf

IV.2.1.1 Résultats bruts

La Figure IV - 1 représente une comparaison entre les signaux obtenus sur un câble neuf, pour les deux polarités et deux valeurs de tension appliquées. Une représentation réduite est utilisée ici, permettant de comparer les courbes obtenues pour le déclin et le retour de potentiel, pour différentes valeurs de tension appliquée. Dans le cas du déclin de potentiel (noté DdP), la chute de potentiel divisée par le potentiel initial V_0 est représentée (une normalisation est effectuée). Le déclin est représenté en fonction du temps sur une échelle logarithmique.

On observe une influence du champ sur le DdP (déclin de potentiel) c'est-à-dire une accélération des phénomènes à 2000 V. En revanche, il n'y a que peu d'influence de la polarité à 500 V et à 2000 V, ce qui peut être dû au fait que la valeur V_0 utilisée est la valeur théorique de potentiel initial et non la valeur réelle de la première mesure.

Sur la Figure IV - 2, on compare les DdP obtenus sur deux échantillons de câble neuf provenant de la même bobine après charge à 500 V et 2000 V. On peut voir qu'il y a une certaine dispersion.

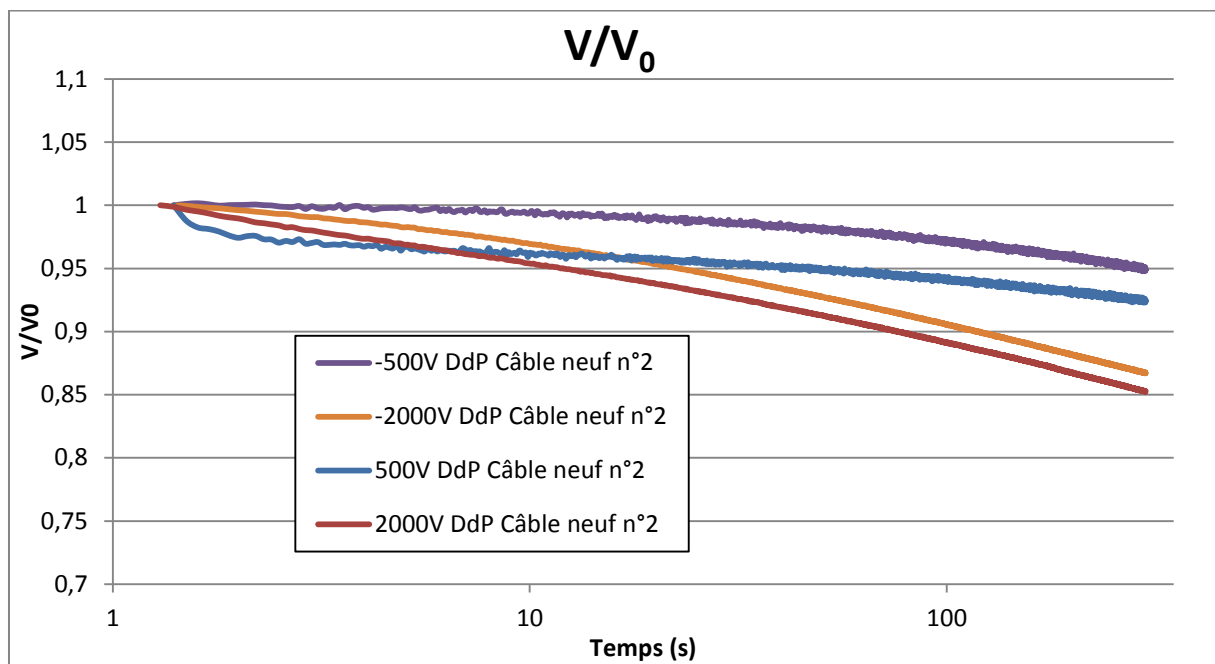
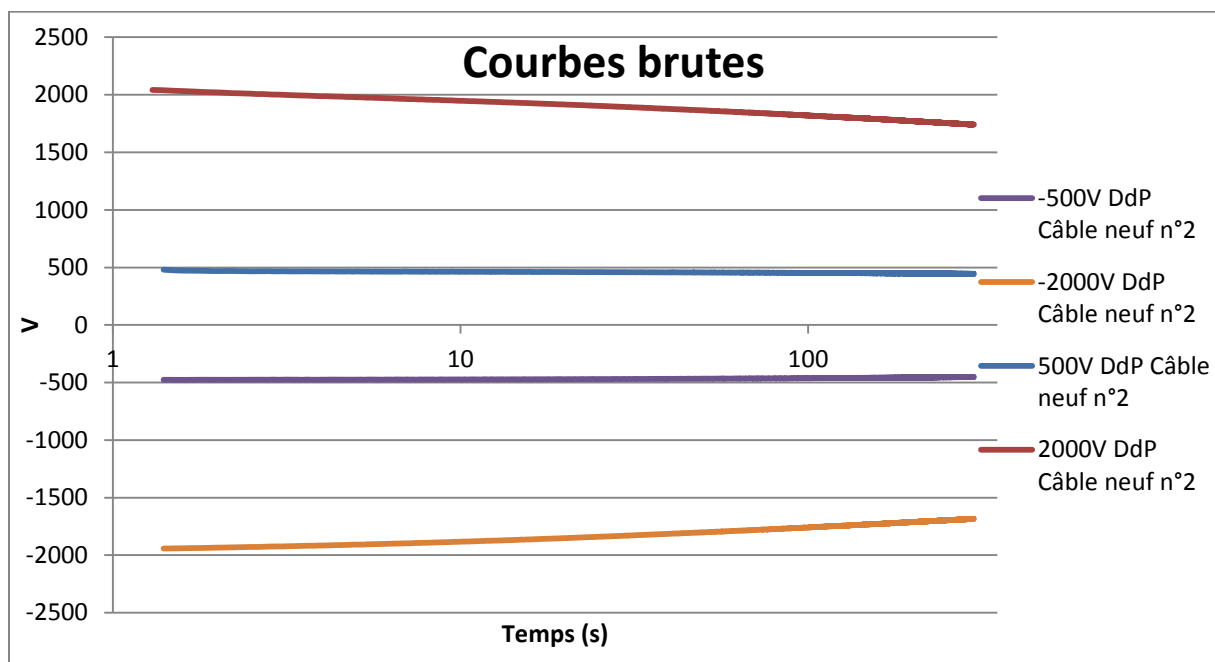


Figure IV - 1 : Déclin de Potentiel (DdP) brut et normalisé en fonction du temps pour un câble neuf à +/- 500 V et +/- 2000 V (le potentiel négatif est représenté par la lettre m)

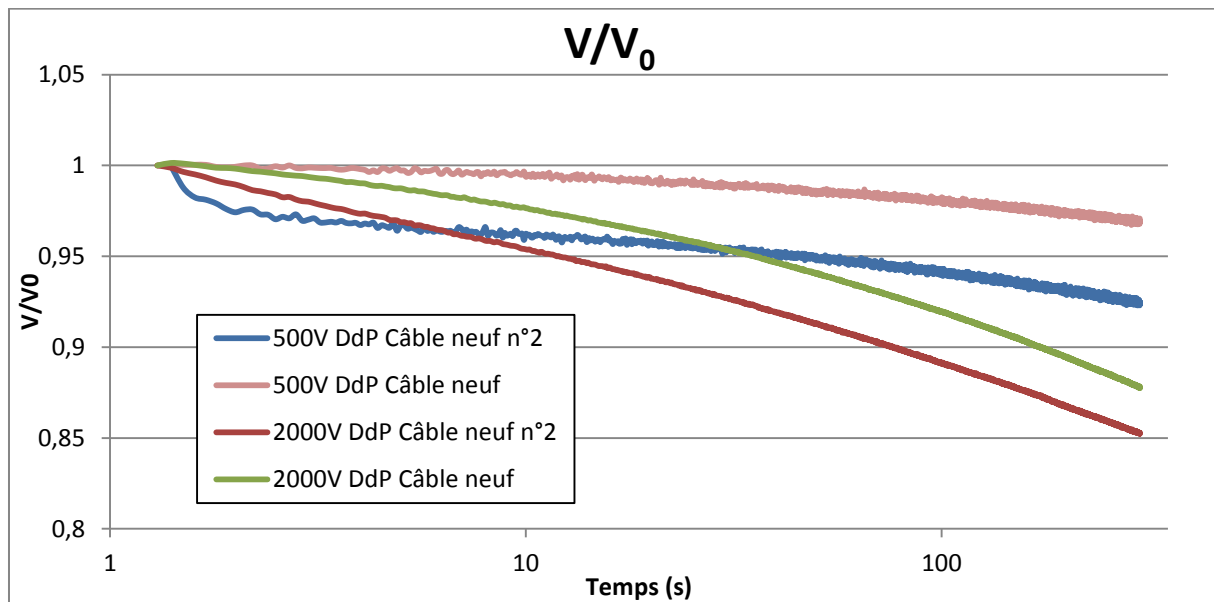


Figure IV - 2 : Déclin de Potentiel (DdP) normalisé en fonction du temps pour 2 câbles neufs à 500 V et 2000 V

Dans le cas du retour de potentiel (noté RdP), on représente le gain de potentiel par rapport au potentiel obtenu immédiatement après neutralisation (environ 0), divisé par le potentiel de surface au moment de la neutralisation V_n (Figure IV - 3) en fonction du temps (sur une échelle logarithmique) à ± 500 V et à ± 2000 V. On constate que, comme dans le cas du DdP, il y a peu d'influence de la polarité. On observe également une influence du champ sur le RdP au travers de l'accélération des phénomènes à 2000 V.

La Figure IV - 4 présente les RdP pour deux câbles neufs à 500 V et 2000 V. Il y a une variabilité assez grande d'un échantillon à l'autre. Cependant, il faut tenir compte du fait que le signal reste assez faible.

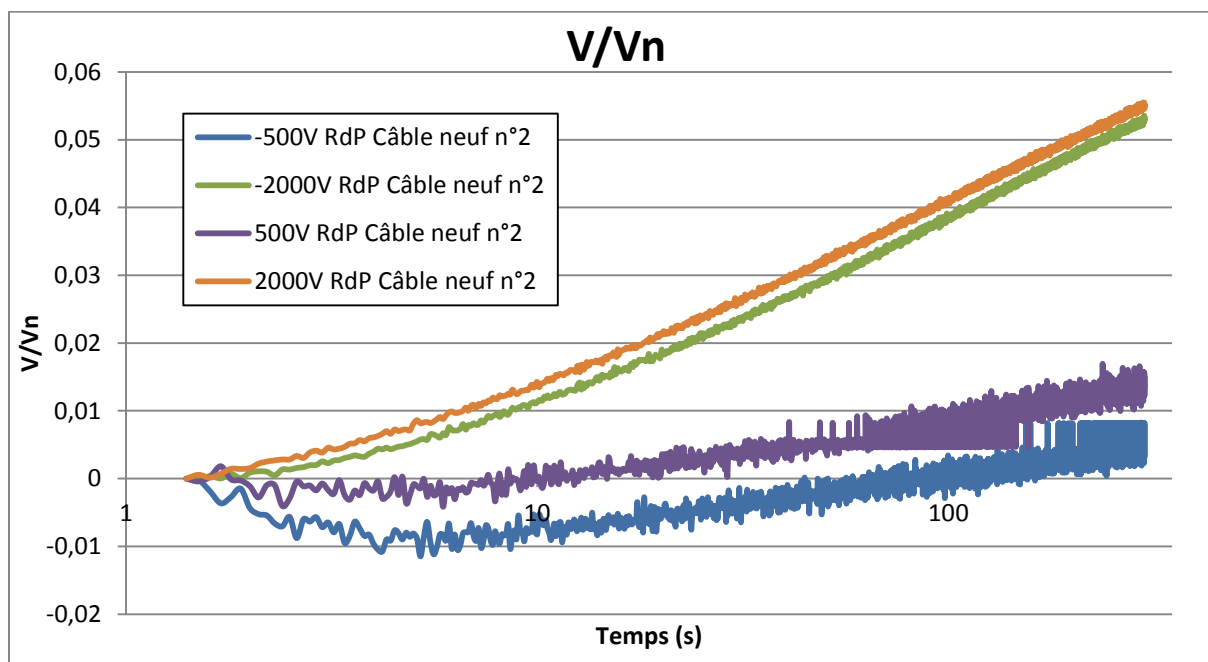


Figure IV - 3 : Retour de potentiel (RdP) normalisé en fonction du temps pour un câble neuf à +/- 500 V et +/- 2000 V (le potentiel négatif est représenté par la lettre m)

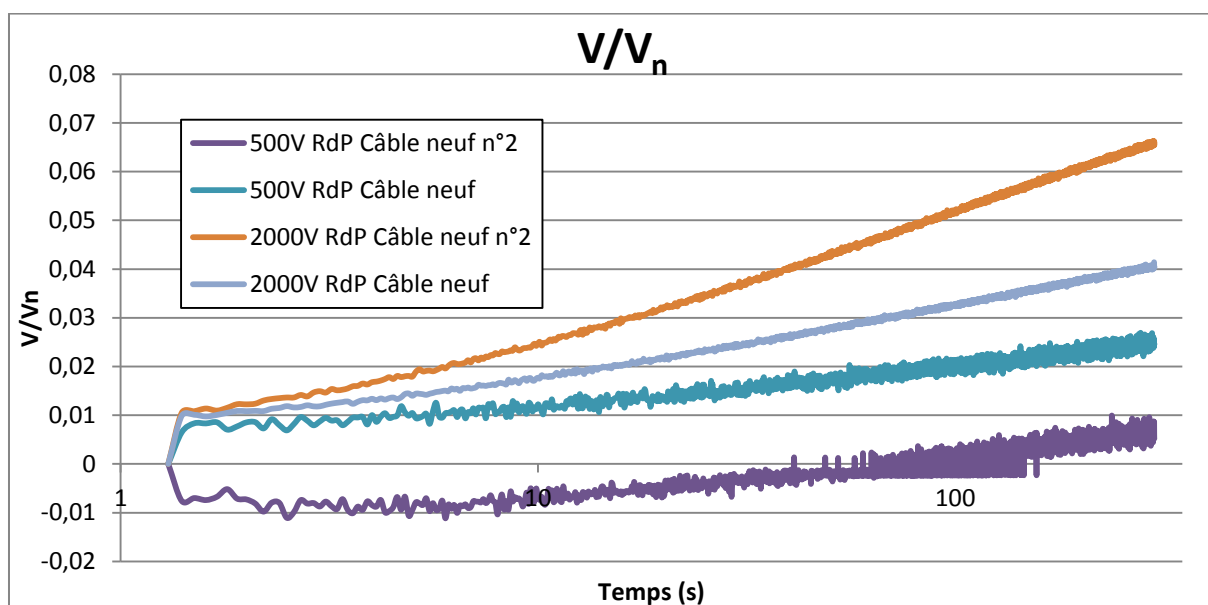


Figure IV - 4 : Retour de potentiel (RdP) normalisé en fonction du temps pour 2 câbles neufs à 500 V et 2000 V

Néanmoins, sur toutes ces courbes (des 4 figures précédentes), on voit qu'à 500 V les signaux sont assez bruités. La majorité des résultats bruts seront donc présentés à 2000 V dans la suite de ce chapitre.

IV.2.1.2 *Traitement tdV/dt*

On utilise, ici, une forme dérivée des courbes brutes qui est $\frac{tdV}{dtV_0}$. En effet, la représentation $tdV/dt=f(\log t)$ ou $dV/d(\ln t)=f(\log t)$ permet de mieux mettre en valeur la dynamique des courbes de potentiel que la représentation simple $\frac{V}{V_0} = f(t)$.

Sachant que $\int_{t_1}^{t_2} t \frac{dV}{dt} \ln(t) dt = \frac{dt_2}{t_2} \frac{t_2}{dt_2} V_{t_2} - \frac{dt_1}{t_1} \frac{t_1}{dt_1} V_{t_1} = V_{t_2} - V_{t_1}$, ceci caractérise donc la perte de potentiel entre t_2 et t_1 (l'aire présente sous la courbe dans un intervalle de temps est égale à la perte de potentiel (ici, relative) pendant cet intervalle [109]). La division par V_0 ou V_n permet de normaliser.

La Figure IV - 5 présente le déclin de potentiel en utilisant la représentation $\frac{tdV}{V_0 dt} = f(\log t)$ à +/- 500 V et +/- 2000V. Cette représentation permet de confirmer l'accélération des phénomènes que nous obtenons à +/- 2000 V. De plus, on peut voir que les résultats sont similaires pour les deux câbles et qu'il n'y a pas d'effet de la polarité (accélération des phénomènes à partir d'un certain temps car perte de potentiel plus important). Néanmoins, pour un des câbles neufs à -2000 V, on observe une différence qui peut être interprété comme un artefact.

La Figure IV - 6 montre le retour de potentiel en utilisant la même méthode à +/- 500 V et +/- 2000 V. Comme dans le cas du déclin, on peut voir qu'il n'y a pas d'effet de la polarité, qu'il y a une influence du champ et que les résultats sont assez similaires pour les deux câbles (petite différence à +/- 2000 V). Une fois de plus, on constate que les résultats à +/- 500 V sont assez bruités.

En ce qui concerne la dispersion, il est observé deux types de phénomènes : d'une part, une dispersion des résultats entre les câbles, qui peut être relativement importante, et qu'on obtient sur le DdP et sur le RdP, les courbes gardant toutefois des allures très similaires. Et d'autre part, des DdP « anormaux » peuvent apparaître uniquement en DdP et à -2000V. Ce phénomène n'entraîne pas toutefois un RdP anormal. C'est pour cette raison que les RdP ont été utilisés comme outil de caractérisation, plutôt que les DdP.

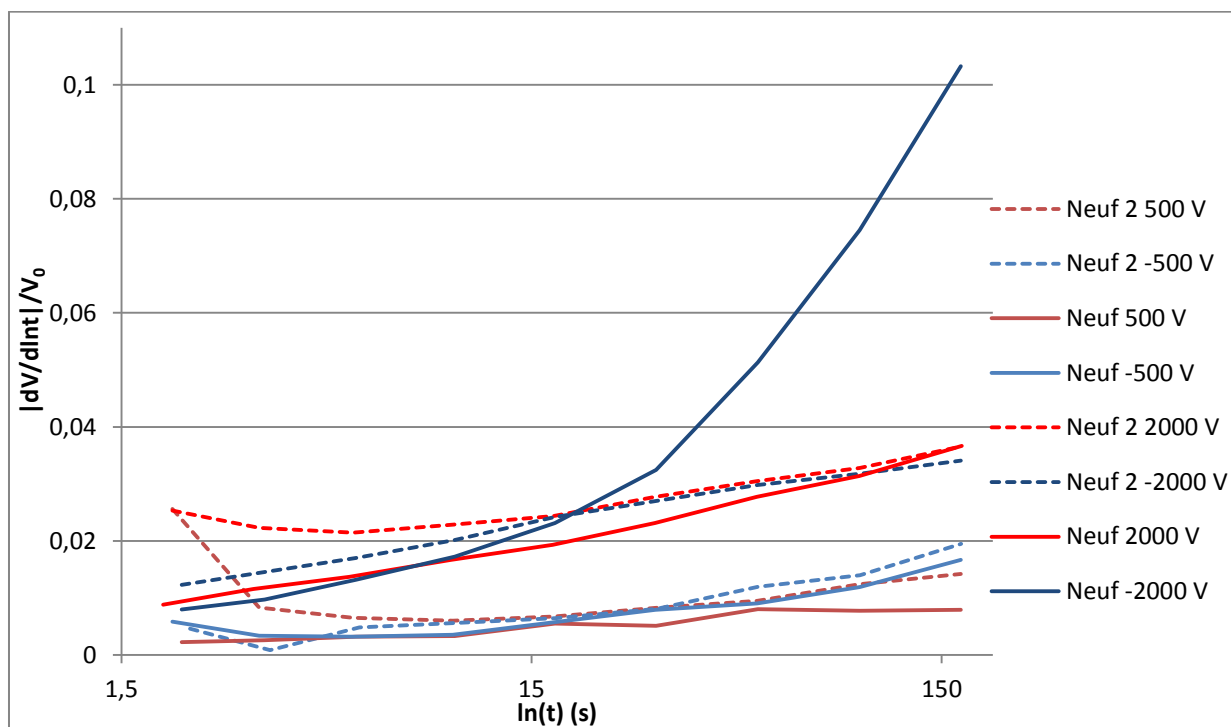


Figure IV - 5 : Déclin de potentiel pour les deux câbles neufs à toutes les tensions étudiées en représentation tdV/V_0dt

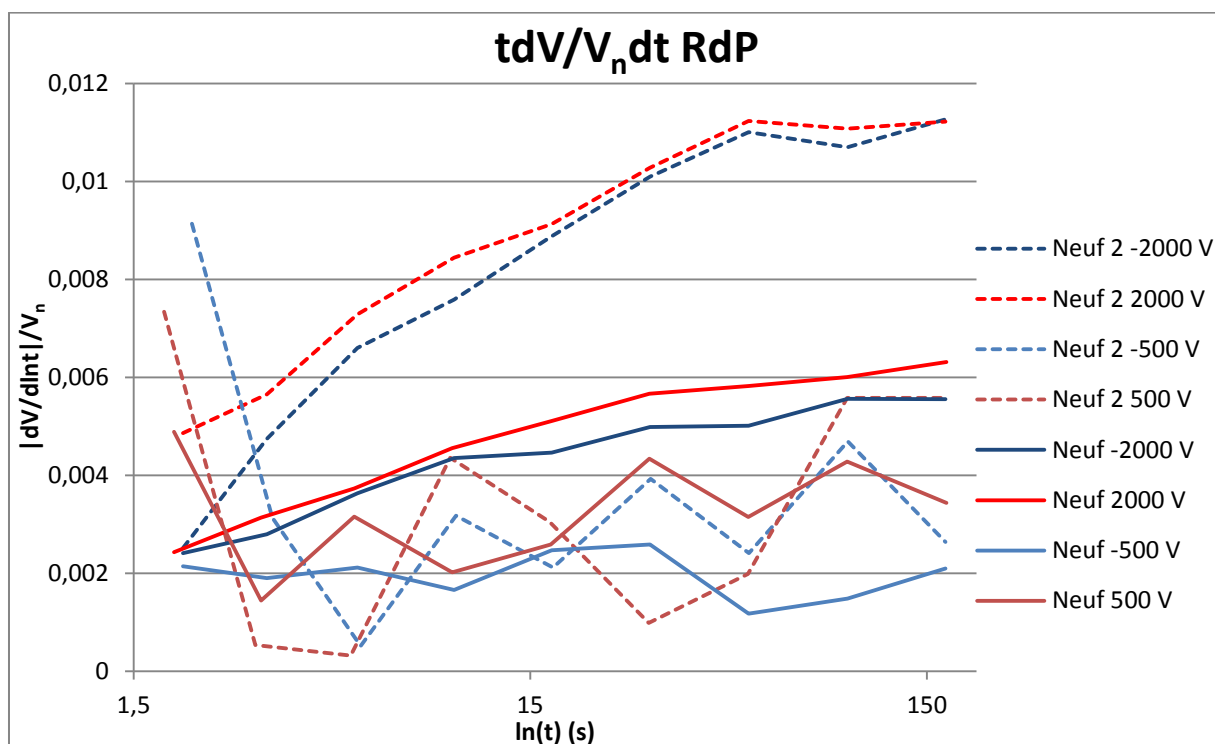


Figure IV - 6 : Retour de potentiel pour les deux câbles neufs à toutes les tensions étudiées en représentation $tdV/V_n dt RdP$

IV.2.2 Comparaison des différents vieillissements

Les résultats précédents montrent qu'il n'y a pas d'influence de la polarité et qu'à fort champ, il y a une accélération des phénomènes. Les résultats obtenus sur les câbles vieillissés seront donc présentés uniquement à ± 2000 V pour mieux appréhender les phénomènes. De plus, l'étude menée sur plusieurs séries d'échantillons de câbles a montré que les courbes de déclin de potentiel obtenues sont nettement moins reproductibles que celles obtenues pour les retours de potentiel. Ainsi, seuls les retours de potentiel seront présentés et discutés.

IV.2.2.1 Résultats bruts

Les retours de potentiel obtenus sur les câbles neufs et ayant subi un vieillissement thermique statique seul (240°C) après polarisation à 2000 V et -2000 V puis neutralisation sont présentés respectivement en Figure IV - 7 et Figure IV - 8. Tout d'abord, il est observé que le retour de potentiel est beaucoup plus fort pour les câbles vieillissés que pour le câbles neufs. On remarque que l'amplitude du retour de potentiel observé sur 5 minutes pour le câble ayant subi 9000 heures de vieillissement, est plus faible que celle du câble ayant subi 1557 heures de vieillissement, mais avec une dynamique différente.

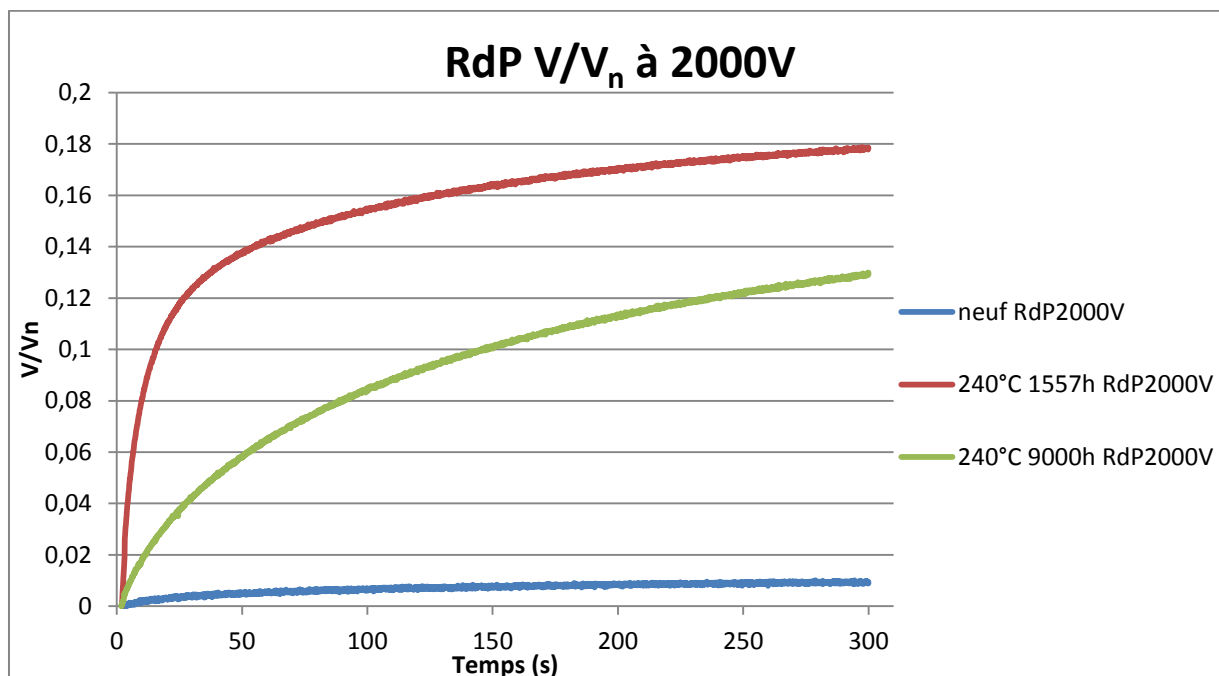


Figure IV - 7 : Retours de potentiel à 2000 V pour câbles neufs et vieillissés (1557 h et 9000 h) à 240°C

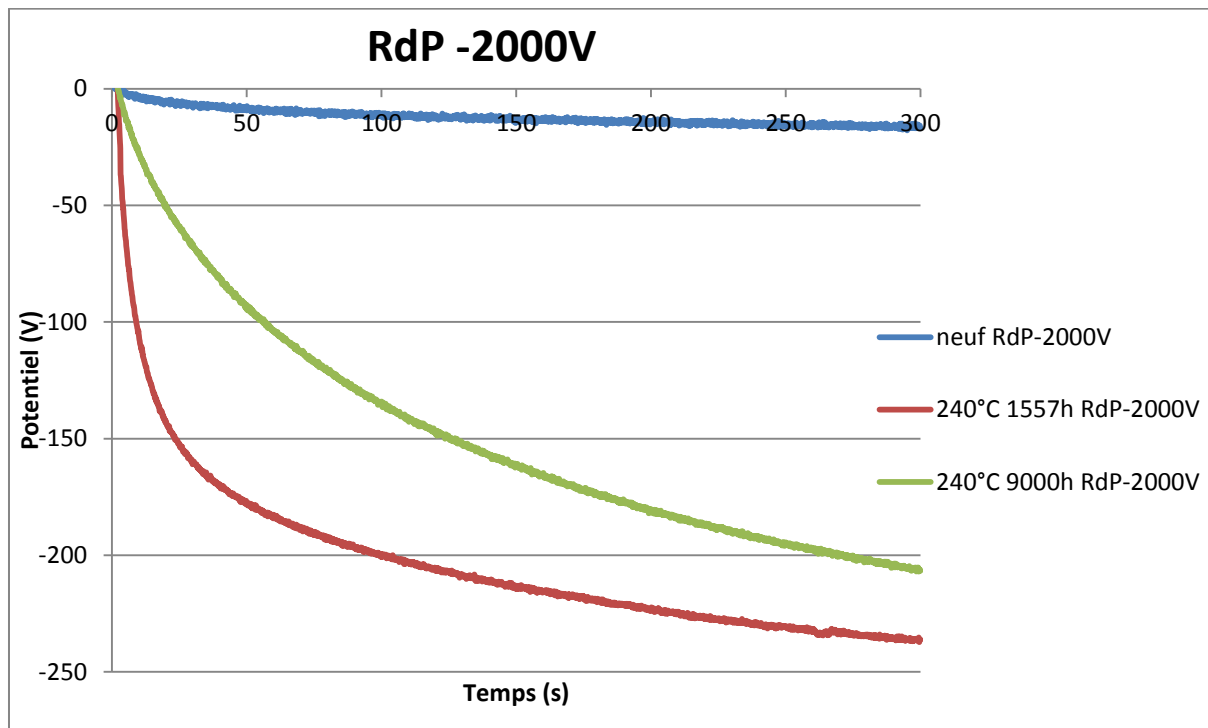


Figure IV - 8 : Retours de potentiel à -2000 V pour câbles neuf et vieillis (1557 h et 9000 h) à 240°C

La forme de la dynamique observée pour le déclin comme pour le retour sont très dépendantes du type de vieillissement réalisé comme le montre la Figure IV - 9, avec une comparaison des retours de potentiel entre 3 échantillons de câbles ayant subi 3 vieillissements différents ; on a ajouté ici le vieillissement VH (85°C / 85%HR) et le vieillissement sous décharges partielles – DP (vieillissement d’une durée de 10 minutes en insérant sous air le câble dans le tube à la masse. La tension appliquée au câble est bien au-dessus de la PDIV – 5000 V_{crête}).

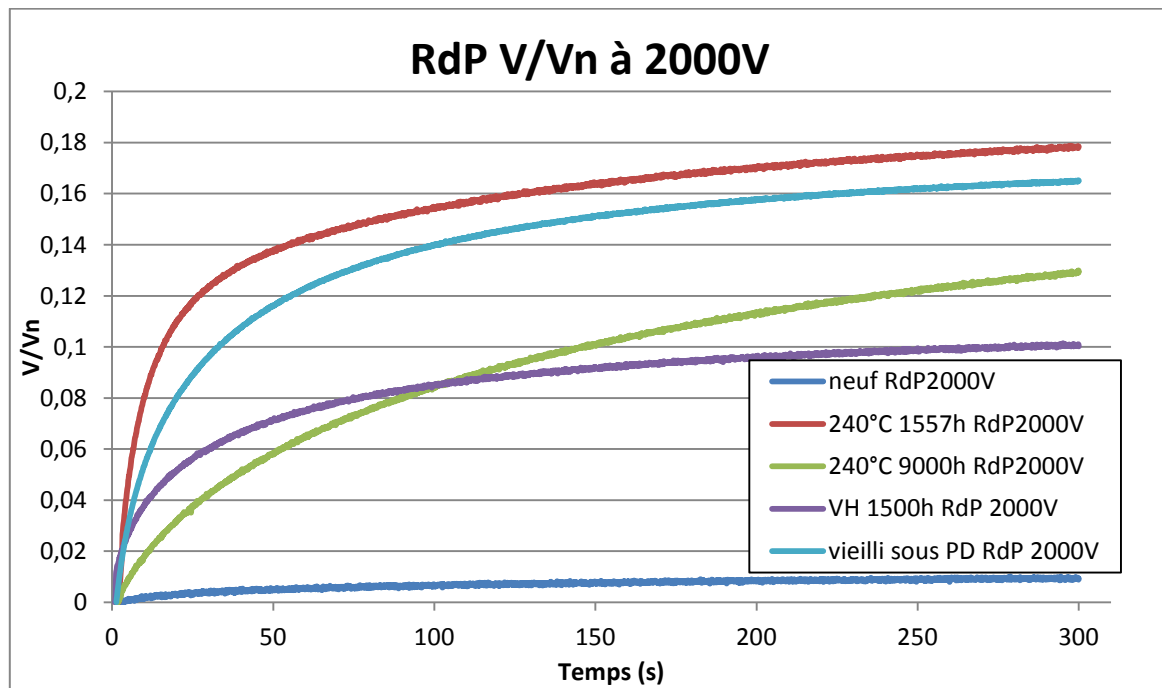


Figure IV - 9 : Retours de potentiel pour 3 types de vieillissement (1557 h et 9000 h à 240°C, 1500 h VH ; vieilli sous DP) après charge à + 2000 V, déclin de 300s et neutralisation de 1s

IV.2.2.2 Résultats après le traitement tdV/dt

La Figure IV - 10 présente les RdP de la Figure IV - 9 sous la forme $tdV/V_n dt = f(\log t)$. Cette représentation met en évidence l'existence de dynamiques très différentes suivant les vieillissements subis.

En repérant l'amplitude et la tendance des courbes obtenues en regard de l'axe temporel, on peut accéder à une information sur les temps caractéristiques du retour (et du déclin) de potentiel. On observe sur cette courbe, pour le câble vieilli 1557 h à 240°C, la queue d'un phénomène rapide, de l'ordre de la seconde. Alors que pour le câble vieilli à 9000 h sous la même contrainte, on voit plutôt le déroulement d'un phénomène lent, non achevé à l'issue des 5 minutes d'enregistrement. De plus, l'amplitude totale du pic renseigne sur l'ampleur du phénomène.

Pour le vieillissement humide, le retour est de relativement faible amplitude avec un temps caractéristique de plusieurs dizaines de secondes. Pour l'échantillon de câble vieilli sous décharges partielles - DP, le retour présente un même temps caractéristique mais avec une bien plus forte amplitude. Enfin, pour le câble neuf, on voit bien que le RdP est très faible.

Les différentes interprétations possibles seront proposées dans la partie suivante (IV.3).

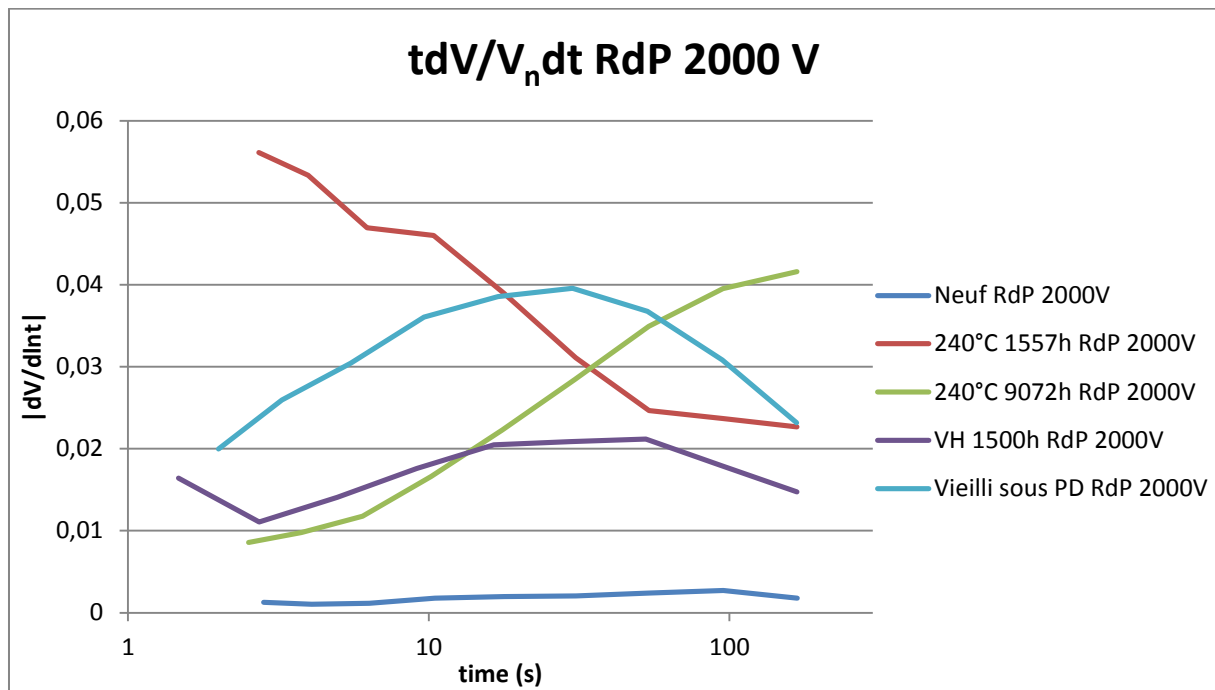


Figure IV - 10 : Représentation $tdV/V_0 dt = f(\log t)$ des courbes de la Figure IV - 9 (après charge à + 2000 V, déclin de 300s et neutralisation de 1s)

IV.3 Discussion et modèle

IV.3.1 Remarques et mécanismes possibles

La première remarque concernant les quelques courbes présentées ici, est que le phénomène observé est volumique : les résultats obtenus dépendent très peu de la polarité, et donc ne font probablement pas intervenir les interfaces externes, qui sont dissymétriques, de l'isolation. Il est très probable (ce qui est aussi conforté par le fait que le champ appliqué est assez modéré) qu'un phénomène de polarisation et de dépolarisation interne à l'isolation soient mesurés. Ce phénomène est cependant activé par le champ.

Une deuxième remarque est que l'ampleur du retour de potentiel observé est du même ordre que celle du déclin. Elle est plus faible, mais il est possible que cette différence soit un effet de l'activation par le champ des phénomènes, plus qu'une différence de nature entre ce qui se produit durant le déclin et ce qui se produit durant le retour. Cette observation implique que la conduction à travers toute l'isolation (avec évacuation partielle de la charge déposée) ne joue pas le premier rôle dans les résultats observés. Ce rôle est à attribuer à un phénomène de polarisation, qui accumule des contraintes dans le matériau, en produisant ensuite une relaxation lorsque le champ externe appliqué disparaît.

Une troisième remarque concerne plus particulièrement le vieillissement sous décharges partielles. En Figure IV - 9, on constate une amplitude de retour de potentiel comparable à celle du vieillissement sous contrainte thermique de 1557 heures alors que l'exposition aux décharges partielles (certes intenses) n'était que d'une durée de 10 minutes. Ce résultat préliminaire conforte l'intérêt de la prise en compte de ce type de vieillissement pour les travaux futurs.

La dernière remarque est que même après un vieillissement long, le déclin ne tend pas vers une neutralisation totale de l'échantillon, mais seulement vers une neutralisation partielle.

Le phénomène de polarisation impliqué pourrait en théorie être lié à des phénomènes de relaxation dipolaire lente des chaînes moléculaires du matériau, mais le caractère multicouche de l'isolation, l'accélération des phénomènes avec le champ et la forte influence du vieillissement suggèrent un phénomène de relaxation interfaciale. L'hypothèse à privilégier en première analyse pour interpréter ces résultats est l'augmentation de la conductivité avec le vieillissement d'une seule des composantes de l'isolation. Un modèle simple en est proposé plus loin.

Les Figure IV - 7 et Figure IV - 8 permettent d'observer qu'un vieillissement de 9000 h à 240°C produit un retour de potentiel plus faible que pour 1557 h. Remarquons que cette observation ne signifie pas nécessairement que le phénomène qui donne naissance au retour important à 1557 h soit plus faible ou ait disparu à 9000 h. Il est au contraire très possible qu'il ait été intensifié, et accéléré au point de se produire entièrement pendant la phase de neutralisation de 1s. Dans ce cas, il deviendrait invisible, car compensé par un apport de charge supplémentaire, et sa dynamique est trop rapide pour être visible sur la plage de temps considérée.

Cette hypothèse est compatible avec ce qui est observé sur la Figure IV - 9 : la partie ascendante vers les temps courts visible sur le vieillissement 1557 h est susceptible d'avoir été activée par le vieillissement, et d'avoir glissé vers la gauche à 9000 h, la rendant invisible. Le phénomène apparaissant à 9000 h, nettement plus lent, serait alors un autre phénomène physique.

IV.3.2 Modèle de polarisation interfaciale

On propose de modéliser l'isolation dans ses deux composantes (qui peuvent être, par exemple, le PI et le PTFE, mais on peut imaginer également d'autres possibilités, impliquant par exemple le matériau d'interface entre les deux polymères) par un circuit RC à deux cellules de la manière représentée en Figure IV - 11.

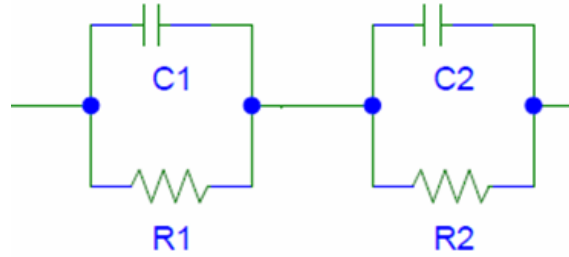


Figure IV - 11 : Modèle RC de l'isolation

On peut montrer simplement que ce type de modèle de l'isolation donne naissance dans le cas général à un retour de potentiel. Par exemple, si on suppose pour plus de facilité une polarisation de longue durée à potentiel constant V_0 , une neutralisation de courte durée va entraîner un retour de potentiel de même signe que le potentiel de polarisation, avec la dépendance suivante en fonction du temps :

$$\frac{V(t)}{V_0} = \frac{R_2 C_2 - R_1 C_1}{(R_1 + R_2)(C_1 + C_2)} \left(e^{-\frac{t}{R_2 C_2}} - e^{-\frac{t}{R_1 C_1}} \right)$$

Si la constante de temps d'une cellule est nettement plus élevée que l'autre (par exemple $R_2 C_2 \gg R_1 C_1$) alors le retour de potentiel sera important. Il le sera d'autant plus si on suppose en même temps $R_2 \gg R_1$ et $C_2 \gg C_1$.

Comme le phénomène dépend assez fortement du champ électrique, cette modélisation par un circuit linéaire ne peut être qu'une illustration simplifiée des phénomènes, et pas un outil de calcul ; on pourrait envisager pour une suite de l'étude un modèle avec au moins une des 2 résistances dépendant du champ, mais dans le cadre de cette thèse, on n'a pas assez de mesures en fonction du champ (deux valeurs uniquement) pour pouvoir construire ce modèle

IV.4 Conclusion

Tous les vieillissements que nous avons réalisés et dont nous décrivons une partie ici se traduisent par une augmentation significative du retour de potentiel (contrairement aux câbles neufs pour lesquels le RP reste très faible), alors même qu'il est difficile de trouver d'autres indices (chimiques, mécaniques, prise d'eau) de modification de l'isolation surtout à partir d'environ 1500 h de vieillissement. Le retour de potentiel semble donc un indicateur très sensible de l'évolution de l'isolation, et un des objectifs du futur travail sera de relier plus précisément ce phénomène à une cause physique.

La discussion précédente montre qu'une augmentation de conductivité d'une des composantes de l'isolation permet d'expliquer qualitativement les résultats. Une augmentation de la conductivité de l'isolant du câble pourrait permettre une augmentation des décharges dans les zones les plus conductrices voire même des ruptures plus précoces et des arcs électriques (avec notamment propagations d'arcs électriques) si la zone conductrice est en série avec le décollement. En revanche, si cette zone est en parallèle avec le décollement, cela va réduire les décharges. Le rôle de l'absorption d'humidité dans ce phénomène sera à investiguer, mais les premiers résultats ne semblent pas privilégier cette cause.

Conclusion générale

L'objectif principal de ce travail était d'une part de déterminer les limites d'utilisation des câbles en tension sous environnement aéronautique et d'autre part d'identifier les mécanismes initiateurs de la rupture diélectrique, c'est-à-dire les décharges partielles.

Pour répondre à cet objectif, plusieurs procédures de vieillissements accélérés ont été engagées sur différents câbles. Ces vieillissements doivent intégrer les multiples contraintes liées à l'utilisation sous environnement aéronautique : contraintes thermiques (on estime que, localement et de façon intermittente, la température du câble peut atteindre 240°C), mécaniques (le positionnement du câble dans l'hélicoptère peut générer des contraintes mécaniques), liées à l'humidité (l'absorption d'eau et/ou sa réaction avec la couche isolante peut en altérer les propriétés fonctionnelles), et évidemment électriques (le câble sera soumis à un minimum de 540 VDC).

Ainsi, les câbles sont enroulés sur des supports métalliques afin d'imposer un rayon de courbure correspondant à la limite maximale définie pour le câble par le fabricant (c'est le cas le plus contraignant pour le câble). Afin de représenter les autres contraintes de l'environnement aéronautique, différents types d'essais ont été effectués : essais thermiques statiques avec et sans tension, essais en humidité avec et sans tension et essais en cycles thermiques avec et sans tension.

Le câble DR16 (âme en cuivre recouvert de nickel avec une isolation rubanée composée principalement d'une couche externe en PTFE et d'une couche interne en PI recouverte de polymère fluoré sur ses deux faces) est présenté plus précisément pour le caractériser en profondeur.

Un banc de caractérisation des câbles en décharges partielles a été réalisé pour caractériser le câble de deux façons :

- D'une part, avec le support de vieillissement, dans l'air, pour caractériser les décharges externes qui ont lieu entre la masse (support ou tresse métallique dans le cas des vieillissements sous tension) et la surface isolante externe du câble.
- D'autre part, le câble a été inséré dans une électrode tubulaire connectée à la masse, immergée dans l'huile, afin de caractériser les décharges internes. Ces décharges ont lieu dans des interstices d'air situés entre les brins de l'âme du câble et la surface interne de l'isolation. Cette localisation des décharges internes, suggérée en premier lieu par la dépendance des valeurs de PDIV (et RPDIV) avec la pression de l'air, a été confirmée par :

- comparaison du diagramme $\phi/Q/N$ avec celui obtenu avec un dispositif modèle fil/plan (figurant une représentation plane du câble),
- confrontation des valeurs de tension imposées à ces intervalles gazeux calculées à l'aide d'un modèle électrostatique avec les valeurs de tension issues de la courbe de Paschen.

De plus, des analyses physicochimiques ont été réalisées afin d'examiner l'effet des différents vieillissements sur ce câble en particulier.

Enfin, des mesures de déclin et de retour de potentiel par la méthode du potentiel de surface ont été effectuées sur des câbles neufs et vieillis afin de voir les effets des vieillissements à faible nombre d'heures qui n'étaient pas observables avec les analyses physicochimiques et les analyses en DP.

Les principaux résultats obtenus sont qu'il n'y a aucun effet des différents vieillissements thermiques statiques (avec et sans tension) sur les tensions seuil d'apparition des décharges externes. En revanche, des effets des différents vieillissements sur les décharges internes après 9072 h à 240°C, 8907h à 240°C/540VDC et 4564 h à 240°C/1000VDC sont observés. En particulier, pour le vieillissement thermique seul, après 9072 heures, on observe une chute de la valeur de RPDIV comprise entre 800 V et 1300 V (selon le niveau de pression) par rapport au câble neuf. De plus, les vieillissements apportent des modifications chimiques de l'isolant pour des vieillissements de durée inférieure : modification de structure de la couche interne (la couche de PI en « sandwich » entre deux couches de polymère fluoré devient visible) et des températures de transition de phase. L'apparition du PI à la surface de la couche interne du câble est délétère car cela signifie que la couche de polymère fluoré n'assure plus l'adhésion entre le PI et le PTFE. Cela conduit donc à un risque de délaminage à partir de ces « points faibles ». Des décollements sont visibles après 9000 heures de vieillissement (par radiographie à rayons X), ce qui peut justifier la chute constatée des valeurs de PDIV et RPDIV des décharges internes. Ces mécanismes pourraient limiter la montée en tension si celle-ci excède la valeur de RPDIV puisque les décharges pourraient provoquer un vieillissement accéléré du système d'isolation du câble voire même une rupture du diélectrique.

En ce qui concerne le vieillissement thermique dynamique (VRT), aucun effet de ce vieillissement sur les décharges externes n'a été observé. Néanmoins, un effet sur les décharges internes à des faibles et hautes pressions est observé. De plus, les vieillissements

apportent des modifications chimiques de l'isolant : on voit ainsi une légère modification de structure de la couche interne après 7687 heures (apparition des pics correspondant au PI sur le spectre FTIR).

Pour ce qui concerne la caractérisation diélectrique du câble, une augmentation significative du retour de potentiel est visible après 1500 heures de vieillissement (contrairement aux câbles neufs pour lesquels le retour de potentiel reste très faible), alors même qu'il est difficile de trouver d'autres indices (électriques, mécaniques, prise d'eau) de modification de l'isolation si ce n'est une modification chimique. Ces mesures montrent une augmentation de conductivité d'une des composantes de l'isolation, qui permet d'expliquer qualitativement les résultats. Le rôle de l'absorption d'humidité dans ce phénomène sera à investiguer, mais les premiers résultats ne semblent pas privilégier cette cause.

Il est difficile de conclure quant à un mécanisme de rupture diélectrique de l'isolation du câble puisque les vieillissements ont dû être arrêtés avant la rupture diélectrique afin de réaliser les différentes analyses. Ces essais ont duré plus entre 4000 heures et plus de 9000 heures, il n'est donc pas possible de calculer une durée de vie (calculable avec 3 points différents par la loi d'Arrhenius).

Concernant les limites d'utilisation en tension, aucune valeur ne peut être à ce jour donnée. Des mesures complémentaires de décharges partielles et de potentiel de surface pourront être réalisées sur les autres vieillissements et sur tous les autres câbles.

Des essais complémentaires à plus de 1000 VDC doivent être réalisés sous contraintes aéronautiques et les conditions de vieillissement accéléré devraient être revues afin de diminuer le nombre d'heures de vieillissements. Par exemple, il est possible d'augmenter la température (il conviendra toutefois de ne pas excéder la température de transition vitreuse, soit environ 260°C, au-dessus de laquelle les mécanismes de dégradation pourraient être différents) ou la diminuer à son minimum (-55°C) ou réaliser des cycles thermiques entre -55°C et +240°C. Néanmoins, il n'est pas observé d'influence de la tension pour les vieillissements thermiques statiques (540 V DC jusqu'à environ 8000 heures et 10000 V DC jusqu'à environ 4500 heures). Enfin, le fait d'observer une amplitude de retour de potentiel comparable pour le vieillissement sous contrainte thermique de 1557 heures et le vieillissement sous décharges partielles de 10 minutes conforte l'intérêt de la prise en compte de ce dernier type de vieillissement pour les travaux futurs.

D'autres techniques pourraient être utilisées comme la spectroscopie diélectrique directement sur les câbles ou la mesure de charge d'espace sur des échantillons cylindriques pour voir l'influence des vieillissements en tension continue sur une possible accumulation de charges. Enfin, des essais de vieillissement sous décharges pourraient être effectués pour analyser la tenue du câble sous décharges partielles.

Bibliographie

- [1] EN2267-010, « Aerospace series - Cables, electrical, for general purpose - Operating temperatures between -55°C and 260°C - Part 010: DR family, single UV laser printable », *ASD-STAN*, 2012.
- [2] EN2084, « Aerospace series - Cables, electric, single-core, general purpose, with conductors in copper or copper alloy - Technical specification », *CEN*, 2005.
- [3] Wikiwand, « Wikiwand ». [En ligne]. Disponible sur: http://www.wikiwand.com/fr/Éthylène_tétrafluoroéthylène. [Consulté le: 26-nov-2015].
- [4] G. Brust, « No Title ». [En ligne]. Disponible sur: <http://pslc.ws/french/imide.htm>. [Consulté le: 26-nov-2015].
- [5] Polyfluor, « No Title ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.polyfluor.nl/en/materials/fep/>. [Consulté le: 26-nov-2015].
- [6] Claude Tournut, « Polymères fluorés », *Tech. l'ingénieur*, 1990.
- [7] O. Talon, « Polyimides linéaires (PI) », *Tech. l'ingénieur*, 2015.
- [8] J. E. Mark, Éd., *Polymer Data Handbook*. OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1999.
- [9] SPX902A0002E01, « Environmental requirements for equipment installed on Eurocopter helicopter », 2013.
- [10] DO-160, « Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment », 2007.
- [11] Météo France, « No Title ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.meteofrance.fr/prevoir-le-temps/observer-le-temps/parametres-observees>. [Consulté le: 26-nov-2015].
- [12] AFNOR, « NF EN ISO 9227 », 2007.
- [13] K. Harrisson, « No Title ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.3dchem.com/molecules.asp?ID=200#>. [Consulté le: 26-nov-2015].
- [14] J. A. Conesa et R. Font, « Polytetrafluoroethylene Decomposition in Air and Nitrogen », *Polym. Eng. Sci.*, vol. 41, n° 12, p. 2137-2147, 2001.
- [15] X. L. Huang, « Etude de l'évolution de la morphologie et des propriétés électriques du polytétrafluoroéthylène (PTFE) pour des applications aéronautiques en hautes températures (250 - 400 °C) », Thèse, Toulouse, 2014.
- [16] E. E. Lewis et M. A. Naylor, « Pyrolysis of Polytetrafluoroethylene », *J. Am. Chem. Soc.*, vol. 69, p. 1968-1970, 1947.

- [17] X. L. Huang, J. Martinez-Vega, et D. Malec, « Morphological evolution of polytetrafluoroethylene in extreme temperature conditions for aerospace applications », *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 131, n° 3, p. 1-6, 2014.
- [18] A. N. Hammoud, E. D. Baumann, et E. Overton, « High Temperature Dielectric Properties of Apical, Kapton, PEEK, Teflon AF, and Upilex Polymers », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, p. 549-554, 1992.
- [19] J. Jian et X. Zhongfu, « Influence of environment humidity on properties of FEP, PTFE, PCTFE and PI film electrets », *8th Int. Symp. Electrets*, p. 95-100, 1994.
- [20] H. Z. Syed et R. Hackam, « Effects of Water Salinity , Electric Stress and Temperature On The Hydrophobicity of Polytetrafluoroethylene », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, p. 23-26, 1998.
- [21] S. Wenrong, L. Junhao, Y. Peng, et L. Yanming, « Digital detection, grouping and classification of partial discharge signals at DC voltage », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 15, n° 6, p. 1663-1674, 2008.
- [22] J. A. Mergos, M. D. Athanassopoulou, T. G. Argyropoulos, C. T. Dervos, et P. Vassiliou, « The effect of accelerated UV-ageing on the dielectric properties of PVC, PTFE and HDPE », in *IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD 2010*, 2010, p. 4-7.
- [23] S. Chen, C. Yue, W. Wang, D. He, et K. Yang, « Volume resistivity and PDIV characteristics of polymer materials under electro-thermal aging », *2012 Int. Conf. High Volt. Eng. Appl.*, n° 50977025, p. 190-193, 2012.
- [24] W. N. W. Salleh, A. F. Ismail, T. Matsuura, et M. S. Abdullah, « Precursor selection and process conditions in the preparation of carbon membrane for gas separation: A review », *Sep. Purif. Rev.*, vol. 40, n° 4, p. 261-311, 2011.
- [25] A. Spadło *et al.*, « Selective crosslinking of polyimide for photonic devices », *Mol. Cryst. Liq. Cryst.*, vol. 502, n° May, p. 185-194, 2011.
- [26] M. J. Turk, A. S. Ansari, W. B. Alston, G. S. Gahn, A. A. Frimer, et D. A. Scheiman, « Evaluation of the thermal oxidative stability of polyimides via TGA techniques », *J. Polym. Sci. Part A Polym. Chem.*, vol. 37, n° 21, p. 3943-3956, 1999.
- [27] S. Zelmat, « Etude des propriétés d'un matériau polyimide à haute température : Application à la passivation des composants de puissance en carbure de silicium », Thèse, Toulouse, 2006.
- [28] S. Chisca, I. Sava, V. E. Musteata, et M. Bruma, « Dielectric and conduction properties

- of pure polyimide films », *Polym. Int.*, vol. 50, n° 10, p. 1089-1094, 2011.
- [29] E. Sacher, « Dielectric properties of polyimide film. II. DC properties », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-14, n° 2, p. 85-93, 1979.
 - [30] L. Li, N. Bowler, P. R. Hondred, et M. R. Kessler, « Dielectric response of polyimide to thermal and saline degradation », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, p. 3-6, 2010.
 - [31] R. Khazaka, S. Diahm, M. L. Locatelli, C. Trupin, et B. Schlegel, « Thermal and thermo-oxidative aging effects on the dielectric properties of thin polyimide films coated on metal substrate », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenom.*, p. 52-55, 2011.
 - [32] K. Fukunaga et T. Maeno, « Space Charge Observation of Polyimide Films under DC Electric Fields », *Int. Conf. Solide Dielectr.*, 2004.
 - [33] S. Fujita et Y. Kamei, « Electrical Properties of Polyimide with Water Absorption », *Int. Symp. Electrets*, p. 275-278, 2002.
 - [34] R. Khazaka, M. L. Locatelli, S. Diahm, et P. Bidan, « Effects of mechanical stresses, thickness and atmosphere on aging of polyimide thin films at high temperature », *Polym. Degrad. Stab.*, n° 0, p. , 2012.
 - [35] CEI IEC 60270, « Techniques des essais à haute tension – Mesures des décharges partielles », 2000.
 - [36] F. H. Kreuger, E. Gulski, et A. Krivda, « Classification of Partial Discharges », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 28, n° 6, p. 917-931, 1993.
 - [37] O. Bergius, « Implementation of on-Line Partial Discharge Measurements in Medium Voltage Cable Network », Tampere, 2011.
 - [38] A. T. Vu Thi, « Propriétés diélectriques de matériaux isolants sous contraintes impulsionnelles répétitives. Application aux modules de commutation en électronique de puissance », Thèse, Grenoble, 2006.
 - [39] E. Sili, « Etude de l'impact de l'environnement aéronautique sur la courbe de Paschen et sur le vieillissement du Polyimide sous décharge partielle », Thèse, Toulouse, 2012.
 - [40] E. Kuffel, W. S. Zaengl, et J. Kuffel, *High Voltage Engineering*. Butterworth-Heinemann, 2000.
 - [41] M. J. P. Jeroense et P. H. F. Morshuis, « Electric fields in HVDC paper-insulated cables », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, n° 2, p. 225-236, 1998.
 - [42] Marc Jeroense, *Charges and Discharges in HVDC Cables in particular in mass-*

impregnated HVDC cables. 1997.

- [43] A. Pointu, J. Sablier, et M. Sablier, « Spectrométrie de Principe Plasmas froids de Propriétés électriques et appareillage Par : Plasmas froids de décharge Propriétés électriques », *Tech. l'ingénieur*, 1998.
- [44] F. Koliatene, « Les Décharges Partielles (DP) dans le diagnostic du Système d'Isolation de l'Avionique », *JCGE*, n° 1, p. 3-6, 2008.
- [45] E. Badareu et I. Popescu, *Gaz ionisés, décharges électriques dans le gaz*, Dunod. 1968.
- [46] T. W. Dakin, G. Luxa, G. Oppermann, J. Vigreux, G. Wind, et H. Winkelkemper, « Breakdown of gases in uniform fields Paschen curves for nitrogen, air and sulfur hexafluoride », *Electra*, vol. 32, p. 61-82, 1974.
- [47] Peek, *Phénomènes Diélectriques dans la Technique des Hautes Tensions*. Mc Graw-Hill Book Company, 1924.
- [48] E. Sili, F. Koliatene, et J. P. Cambronne, « Pressure and temperature effects on the paschen curve », *Annu. Rep. - Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, p. 464-467, 2011.
- [49] V. Boucher, « Etude du vieillissement de matériaux hautes températures pour machines tournantes et définition de méthodes d'essais accélérées », Thèse, Grenoble, 2010.
- [50] L. E. Lundgaard, « Partial Discharge - Part XIV : Acoustic Partial Discharge Detection - Practical Application », *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 8, n° 5, p. 34-43, 1992.
- [51] L. E. Lundgaard, « Partial Discharge - Part XII: Acoustic Partial Discharge Detection - Fundamental Considerations », *IEEE Electr. Insul. Mag.*, p. 25-31, 1992.
- [52] E. Odic, E. Jouseau, G. Vivien, et C. Maroni, « Characterization of Medium Voltage Equipment Ageing By Monitoring of Partial Discharges Chemical and Acoustical Emission », *10th Int. Electr. Insul. Conf.*, n° May 2006, p. 24-29, 2006.
- [53] E. Jouseau, G. Vivien, E. Odic, et C.-S. Maroni, « Exhibition of an ageing criterion based on partial discharge detection for medium voltage equipment », *IEEE Intern. Symp. Diagnostics, Electr. Mach. Power Electron. Drivers*, p. 5-9, 2005.
- [54] A. G. Sellars, O. Farish, B. F. Hampton, et L. S. Pritchard, « Using the UHF Technique to Investigate PD Produced by Defects in Solid Insulation », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, n° 3, p. 448-459, 1995.
- [55] T. Zhiguo, L. Chengrong, H. Xingquan, L. Zhili, et F. Shangying, « The feasibility of locating PD source in transformer using the UHF technology », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, p. 477-480, 2004.

- [56] Cédric Abadie, « On-line non-intrusive partial discharges detection in aeronautical systems », Thèse, Toulouse, 2017.
- [57] G. Friedrich, M. Jaillet, D. Laurent, E. Mouren-Renouard, E. Odic, et B. Mineur, « Brevet - Méthode et dispositif de suivi de la détérioration d'une machine tournante », 2010.
- [58] R. Bartnikas, « Effect of Pulse Rise Time on the Response of Corona Detectors », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. EI-7, n° 1, p. 3-8, 1972.
- [59] R. Bartnikas, « 1987 whitehead memorial lecture – a commentary on partial discharge measurement and detection », *IEEE Trans. Electr. Insul.*, n° 5, p. 629-653, 1987.
- [60] D. A. Nattrass, « Partial Discharge Measurement and Interpretation », *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 4, n° 3, p. 10-23, 1988.
- [61] M. Conti, « Development of artificial intelligence systems for electrical insulation defect identification through partial discharge measurements », Thèse, Bologna, 2003.
- [62] P. H. F. Morshuis et J. J. Smit, « Partial discharges at dc voltage: Their mechanism, detection and analysis », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, n° 2, p. 328-340, 2005.
- [63] U. Fromm, « Interpretation of Partial Discharges at dc Voltages », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 2, n° 5, p. 761-770, 1995.
- [64] T. Klueter, J. Wulff, F. Jenau, et D. Wienold, « Evaluation of Surface- and Corona Discharges at DC Voltage », *IEEE Environ. Electr. Eng.*, p. 4-8, 2013.
- [65] B. Cella, T. Lebey, et C. Abadie, « Partial discharges measurements at the constituents ' level of aerospace power electronics converters », in *Electrical Insulation Conference*, 2015, n° June, p. 7-10.
- [66] T. Billard, C. Abadie, et T. Lebey, « Partial discharge testing in aeronautic environment on magnet wire and feeder cables », in *Electrical Insulation Conference*, 2016, n° June, p. 19-22.
- [67] R. Boukadoum, R. Landfried, T. Leblanc, P. De Moulon, et G.-Y. Cedex, « Comparison of the effect of different types of aging on partial discharge inception voltage in aerospace power connectors », in *Electrical Insulation Conference*, 2017, n° June, p. 11-14.
- [68] C. Emersic, C. Zhang, I. Cotton, R. Lowndes, S. Rowland, et R. Freer, « Degradation of printed circuit board coatings due to partial discharge », in *Electrical Insulation Conference*, 2015, n° June, p. 7-10.

- [69] I. Christou et I. Cotton, « Methods for Partial Discharge Testing of Aerospace Cables », in *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2010.
- [70] Y. Luo, G. Wu, J. Liu, G. Zhu, P. Wang, et K. Cao, « Damage processes of polyimide film caused by surface discharge », in *IEEE International Conference on Solid Dielectrics, ICSD*, 2013, vol. 2, p. 325-328.
- [71] E. Odic, A. Goldman, M. Goldman, M. Dhainaut, et R. Dussart, « Current distribution of AC surface discharges and associated chemistry », *J. Electrostat.*, vol. 64, n° 7-9, p. 477-484, 2006.
- [72] T. Kan, K. Abe, H. Miyake, Y. Tanaka, et T. Maeno, « The Influence of Corona Discharge on Space Charge Accumulation in Polyimide Film », *Annu. Rep. Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena, CEIDP*, p. 258-261, 2013.
- [73] E. Sili, J. P. Cambronne, N. Naude, et R. Khazaka, « Polyimide lifetime under partial discharge aging: Effects of temperature, pressure and humidity », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 20, n° 2, p. 435-442, 2013.
- [74] L. A. Dissado et J. C. Fothergill, *Electrical Degradation and Breakdown in Polymers*. Peter Peregrinus Ltd, 1992.
- [75] L. A. Dissado, G. Mazzanti, et G. C. Montanari, « The role of trapped space charges in the electrical aging of insulating materials », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 4, n° 5, p. 496-506, 1997.
- [76] C. Laurent, « Diélectriques solides et charge d'espace », *Tech. l'ingénieur*, 1999.
- [77] N. Hozumi, T. Takeda, H. Suzuki, et T. Okamoto, « Space Charge Behavior in XLPE Cable Insulation under 0 . 2-1 . 2 MV / cm dc Fields », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 5, n° 1, p. 82-90, 1998.
- [78] M. Ezoe, K. Kuwada, et T. Kawashima, « Effects of ionic impurity on space charge distribution in solid dielectrics », *Int. Conf. Solide Dielectr.*, vol. 03, p. 85-88, 2001.
- [79] Y. Li et T. Takada, « Experimental observation of charge transport and injection in xlpe at polarity reversal », *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 25, n° 4, p. 704-716, 1992.
- [80] N. Hozumi, H. Suzuki, T. Okamoto, K. Watanabe, et A. Watanabe, « Direct observation of time-dependent space charge profiles in XLPE cable under high electric fields », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 1, n° 6, p. 1068-1076, 1994.
- [81] Y. Zhang, J. Lewiner, C. Alquie, et N. Hampton, « Evidence of strong correlation between space charge buildup and breakdown in cable insulation », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 4, n° 6, p. 778-783, 1996.

- [82] S. Holé, T. Ditchi, et J. Lewiner, « Non-destructive methods for space charge distribution measurements: What are the differences? », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, n° 4, p. 670-677, 2003.
- [83] N. H. Ahmed et N. N. Srinivas, « Review of space charge measurements in dielectrics », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 4, n° 5, p. 644-656, 1997.
- [84] P. Molinié, « Charge injection in corona-charged polymeric films: potential decay and current measurements », *J. Electrostat.*, vol. 45, n° 4, p. 265-273, 1999.
- [85] P. Molinié, « Measuring and modeling transient insulator response to charging: The contribution of surface potential studies », *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 12, n° 5, p. 939-950, 2005.
- [86] D. W. Vance, « The Surface Charging of Insulators by Ion Irradiation », *J. Appl. Phys.*, vol. 42, n° 13, p. 5430-5443.
- [87] P. S. Llovera, « Etude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel. Nouveaux outils d'analyse. », Orsay, 2002.
- [88] V. Adamec et J. H. Calderwood, « The interpretation of potential decay on the surface of a charged dielectric specimens », *J. Phys. D. Appl. Phys.*, vol. 20, n° 6, p. 803-804, 1987.
- [89] I. P. Batra, K. K. Kanazawa, et H. Seki, « Discharge characteristics of photoconducting insulators », *J. Appl. Phys.*, vol. 41, n° 8, p. 3416-3422, 1970.
- [90] V. I. Arkhipov, J. A. Popova, et A. I. Rudenko, « Space-charge perturbed dispersive transport in disordered dielectrics », *J. Electrostat.*, vol. 18, n° 1, p. 23-37, 1986.
- [91] J. G. Simmons et M. C. Tam, « Theory of isothermal currents and the direct determination of trap parameters in semiconductors and insulators containing arbitrary trap distributions », *Phys. Rev. B*, vol. 7, n° 8, p. 3706-3713, 1973.
- [92] P. Molinié et L. P., « Théorie et pratique des mesures de retour de potentiel : des outils pour le suivi de l'injection de charge sur les films isolants », *SFE*, p. 1-9, 2002.
- [93] B. Gross, « On discharge voltage and return voltage curves for absorptive capacitors », *Phys. Rev.*, vol. 62, n° 7-8, p. 383-387, 1942.
- [94] J. Attal, « Microscopie acoustique », *Tech. l'ingénieur*, n° 0, p. 402, 1998.
- [95] EN4681-001, « Aerospace series - Cables, electric, general purpose, with conductors in aluminium or copper-clad aluminium - Part 001 : Technical Specification », *AECMA*, 2009.

- [96] EN4681-003, « Aerospace series - Cables, electric, general purpose, with conductors in aluminium or copper-clad aluminium - Part 003 : AD family, Single, UV laser printable - Product standard », *AECMA*, 2009.
- [97] EN2267-012, « Aerospace series - Cables, electrical, for general purpose - Operating temperatures between -65°C and 260°C - Part 012 : DZ family, single UV laser printable for use in low pressure atmosphere- Product standard. », *AECMA*, p. 1-8, 2014.
- [98] EN4681-005, « Aerospace series - Cables, electrical, general purpose, with conductors in aluminium or copper-clad aluminium - Part 005 : AZ family, single, for use in low pressure atmosphere - Product standard. Product standard », *ASD-STAN*, p. 1-8, 2015.
- [99] Zehira Ziari, « Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère », Thèse, Constantine, 2008.
- [100] J. Grenet, « Analyse calorimétrique différentielle à balayage (DSC) », *Tech. l'ingénieur*, vol. 33, 2010.
- [101] E. Wirth, F. Guitteny, et C. Mathonat, « Thermogravimétrie », *Tech. l'ingénieur*, 2014.
- [102] M. Wanin, « Évaluation non destructive de la qualité des matériaux (Partie 1) », *Tech. l'ingénieur*, p. 0-26, 2001.
- [103] « NICODOM Ltd. », 2007. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.ftir-polymers.com/soon.htm>.
- [104] J. Mihály, S. Sterkel, H. Ortner, et L. Kocsis, « FTIR and FT-Raman spectroscopic study on polymer based high pressure digestion vessels », *Croat. Chem. {...}*, vol. 79, n° 3, p. 497-501, 2006.
- [105] M. L. Maurer, A. C. Tooker, S. H. Felix, A. Tooker, et S. Felix, « Characterization of polyimide via FTIR analysis », *LInl*, p. 1-6, 2014.
- [106] S. Heltzel et C. O. A. Semprimoschnig, « A detailed study on the thermal endurance of Kapton HN® and Upilex S® », *High Perform. Polym.*, vol. 16, n° 2, p. 235-248, 2004.
- [107] Jean-Marcel Rax, *Physique des plasmas*, Dunod. 2005.
- [108] V. V. Tcherdyntsev, L. K. Olifirov, S. D. Kaloshkin, M. Y. Zadorozhnyy, et V. D. Danilov, « Thermal and mechanical properties of fluorinated ethylene propylene and polyphenylene sulfide-based composites obtained by high-energy ball milling », *J. Mater. Sci.*, 2018.
- [109] P. Llovera et P. Molinie, « New methodology for surface potential decay measurements: application to study charge injection dynamics on polypropylene films », *Dielectr. Electr. Insul. IEEE Trans.*, vol. 11, n° 6, p. 1049-1056, 2004.

Titre : Endurance et tenue diélectrique de l'isolation de câbles électriques pour l'aéronautique

Mots clés : isolant, vieillissement, câble, décharges partielles, potentiel de surface

Résumé : Dans la perspective de l'aéronef « plus électrique », l'augmentation de puissance électrique embarquée se traduit par une augmentation de tension. Les tensions envisagées aujourd'hui sont inférieures à 1000 V DC. Mais des valeurs plus élevées peuvent être considérées pour le futur. Il est donc indispensable d'étudier les dégradations prématurées induites par cette élévation de tension sur les équipements existants. Ce travail de thèse, portant spécifiquement sur les câbles aéronautiques, constitue une contribution à cette étude. Les câbles examinés, constitués d'une âme multibrins sur laquelle sont rubanées des couches de PTFE et PI, ont subi différents vieillissements accélérés thermiques statiques et dynamiques, sous humidité, et ce sans ou avec contrainte électrique. Certains vieillissements ont été effectués sur une durée supérieure à 9000 heures. Les décharges partielles (DP) ont été étudiées sur ces câbles en termes de tension d'apparition PDIV et RPDIV. Ces DP peuvent intervenir à l'extérieur du

câble mais également à l'intérieur (pour des tensions plus élevées) dans les interstices d'air entre l'isolant et les brins conducteurs. Cette localisation a été confirmée par un modèle électrostatique. L'effet du vieillissement n'a pu être constaté que sur les décharges internes, avec dans certains cas une réduction significative des valeurs de RPDIV.

Des analyses physicochimiques du système d'isolation électrique ont été effectuées ainsi que des radiographies par rayons X. Des modifications chimiques des interfaces du système d'isolation interviennent au cours des vieillissements. Pour les vieillissements les plus poussés (après 9000h sous contrainte thermique à 240°C), ces modifications résultent en la formation de cavités où des DP peuvent prendre place. Enfin, des mesures électrostatiques de potentiel de surface (déclin et retour après neutralisation) ont mis en évidence, bien avant l'observation de cavités, une augmentation de conductivité d'une des couches de l'isolation.

Title : Endurance and dielectric strength of electrical cable insulation for aeronautics

Keywords : insulation, ageing, cable, partial discharges, surface potential

Abstract : In future "more electric" aircraft, the increase in on board electrical power will result in an increase in voltage. The voltages envisaged today are lower than 1000 V DC, but higher values can be considered in the medium to long term. It is therefore essential to study possible premature degradation of existing equipment induced by this rise in voltage. This thesis work, specifically on aeronautical cables, is a contribution to this goal. The examined cables, consisting of a multi-stranded core on which PTFE and PI layers are wound, have undergone various static and dynamic accelerated thermal aging, under humidity, without or with electrical stress. Aging has been carried out in some cases for more than 9000 hours. Partial discharges (DP) were studied on these cables in terms of the appearance voltage PDIV and RPDIV. These DPs can occur outside the cable but also

inside (for higher voltages) in the air gaps between the insulation and the conductive strands. This location has been confirmed by an electrostatic model. The effect of aging was only found in the case of internal discharges, with in some cases a significant reduction in RPDIV values.

Physicochemical analyses of the electrical insulation system were carried out as well as x-ray radiography. Chemical modifications of the interfaces of the insulation system occur during aging. For the most advanced aging (after 9000h under thermal stress at 240°C), these changes result in the formation of cavities where DP can then take place. Finally, electrostatic measurements of surface potential (decline and return after neutralization) have shown, well before the observation of cavities, an increase in conductivity of one of the layers of the insulation.