

Etude de l'origine des décharges partielles sur des substrats céramiques enrobés

Anh Tho Vu Thi

▶ **To cite this version:**

Anh Tho Vu Thi. Etude de l'origine des décharges partielles sur des substrats céramiques enrobés. Sciences de l'ingénieur [physics]. Université de Grenoble, 2011. Français. NNT : . tel-00612433

HAL Id: tel-00612433
https://theses.hal.science/tel-00612433

Submitted on 29 Jul 2011

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

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

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **Génie Electrique**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Anh Tho VU THI

Thèse dirigée par **Olivier LESAINT** et **Jean-Louis AUGE**

préparée au **Laboratoire Génie Electrique de Grenoble**
dans **l'École Doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du Signal**

Etude de l'origine des décharges partielles sur des substrats céramiques enrobés

Thèse soutenue publiquement le **13 Juillet 2011**devant le jury composé de :

M. Jean-Hugues PAILLOL
Professeur de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour.

M. Dominique PLANSON
Professeur de l'INSA de Lyon, Rapporteur.

M. Thierry LEBEY
Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire LAPLACE, Rapporteur

M. Olivier LESAINT
Directeur de Recherche au CNRS, Laboratoire G2E*lab*, Directeur de thèse.

M. Jean-Louis AUGE
Maître de Conférences, Laboratoire G2E*lab*, co-directeur de thèse

« …có vài điều hiếm hoi trên đời miễn phí

một trong số đó là tình yêu thương của cha mẹ dành cho con

một trong những điều còn lại là ước mơ… »

Cảm ơn cha mẹ đã nuôi dưỡng ước mơ của con.

Remerciements

Ce travail de recherche s'est déroulé au sein de l'équipe « Matériaux Diélectriques et Electrostatique » du Laboratoire de Génie Electrique et Grenoble (G2E*lab*) sous la direction de Monsieur Olivier LESAINT et Monsieur Jean – Louis AUGE.

Je tiens à remercier en tout premier lieu mes deux Directeurs de thèse, Monsieur Olivier LESAINT et Jean-Louis AUGE, qui ont encadré la thèse pendant 4 ans, pour leur disponibilité, leurs encouragements et surtout leurs discussions et leurs idées de recherche. Leurs qualités scientifiques et techniques m'ont permis d'aller dans les bonnes directions. Sans leurs patiences au cours de ma rédaction, cette thèse n'aurait évidement jamais vu le jour. Je les prie de recevoir ici l'assurance de ma sincère et amicale gratitude.

Monsieur Dominique PLANSON, Professeur de l'INSA de Lyon et Monsieur Thierry LEBEY, Directeur de Recherche du Laboratoire LAPLACE, ont accepté d'être rapporteurs de ce travail. Qu'il me soit permis de leur adresser mes vifs remerciements.

Monsieur Jean-Hugues PAILLOL, Professeur de l'Université de Pau et des Pays de l'Adour, m'a fait honneur de présider le Jury de cette soutenance de thèse, qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma gratitude.

Un grande merci Jean Luc PALENZUELA, Christophe POLLET, Alain TISSERAND qui ont assuré l'essentiel de la fabrication des cellules d'essais, et dont leur disponibilité et leur savoir-faire ont été des aides précieuses lors des mises en forme des échantillons utilisés dans ce travail, Claire ROUX et Geneviève TEISSEDRE pour leur assistance très appréciée, ainsi que tous les membres de l'équipe MDE (Chercheurs, Techniciens, Secrétaires…) pour leur amitié et pour leur participation indispensable à la réalisation de ce travail.

Je remercie chaleureusement mes amis vietnamiens : Thu Nhi et Damien, Thanh Mai, Loan Phung, Minh Chau Manh Hung, Hieu, Na, Minh Minh, Son Tra…, des amis de loin : Tuan, Loan Babu, Tuan Anh Cun, Duong Do, Ngoc, Phuong Mai… et des amis du groupe « H2 » : Thanh, Van, Quoc Hung, Chi, Tran… qui m'ont encouragé pendant les moments les plus difficiles, m'ont donné des conseils et des aides précieuses. Avec eux, j'ai passé des moments inoubliables et une ambiance très amicale. Je leur souhaite à tous la réussite et la chance.

Enfin, je voudrais dire un « simple » merci à mes parents et ma sœur, qui m'ont donné la force d'arriver à la fin de ce travail. « Cảm ơn bố mẹ và em, rất nhiều rất nhiều ».

Table des matières

Table des matières ..... **i**

Table des figures ..... **v**

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES **5**

I. Les modules IGBT *5*

I.1. Structure des modules IGBT 6

I.2. Les matériaux isolants 7

I.2.1. Les substrats 7

I.2.2. L'encapsulant 9

I.3. Contraintes et défaillances des modules de puissance IGBT 10

I.3.1. Contraintes 10

I.3.2. Etudes des décharges partielles dans les modules IGBT 12

II. Problématique de l'étude *14*

III. Phénomène de décharge partielle *16*

III.1. Définition 16

III.2. Classification 16

III.3. Récurrence des décharges partielles. 17

III.3.1. Décharges internes 17

III.3.2. Décharges couronnes 19

III.4. Technique de détection et de mesure des décharges partielles 19

III.4.1. Détection par mesure électrique 19

III.4.1.1. Charge transférée et charge apparente 19

III.4.1.2. Principes de détection des décharges partielles 20

III.4.2. Détection de décharges partielles par méthodes non électriques 21

IV. Phénomènes d'électroluminescence *22*

IV.1. Définition 22

IV.2. Mécanisme du phénomène d'électroluminescence 22

IV.3. Matériaux électroluminescents 23

V. Techniques expérimentales *24*

V.1. Matériaux diélectriques utilisés 24

V.1.1. Substrats 24

V.1.2. Passivants 25
V.2. Cellules de mesure 28
V.2.1. Cellule de mesure des décharges partielles sur les substrats 28
V.2.2. Cellule de mesure des décharges partielles en géométrie pointe-plan 28
V.3. Sources d'alimentation haute tension 29
V.4. Mesure des décharges partielles 30
V.4.1. Système de détection électrique 31
V.5. Systèmes de détection optique 33
V.5.1. Caméra haute sensibilité 33
V.5.2. Photomultiplicateur 34
V.6. Mesure par spectroscopie diélectrique haute tension 36
V.6.1. Principe de la mesure par spectroscopie diélectrique 36
V.6.2. Dispositifs de mesure 38

CHAPITRE II : CARACTERISATION ELECTRIQUE ET OPTIQUE DES DECHARGES PARTIELLES SUR DES SUBSTRATS RECOUVERTS D'HUILE SILICONE 41

I. Mesures préliminaires : photoluminescence et thermoluminescence du substrat d'AlN 41
II. Dispersion du comportement des substrats d'AlN 43
II.1. Protocoles de mesures électriques et optiques 43
II.2. Mesures électriques et optiques 44
II.3. Visualisation de lumière 47
II.4. Corrélation avec la forme du bord de la métallisation 48
II.5. Origine de la lumière mesurée 48
II.6. « Bons » et « mauvais » substrats 50
III. Caractérisation électrique et optique de « bons » substrats d'AlN sous tension alternative 52
III.1. Décharges partielles et lumière émise 52
III.2. Signification de I_{PM} et de I_{DP} 55
III.3. Influence du dégazage 57
III.4. Tentative « d'imprégnation » de la céramique 58
III.5. Reproductibilité 62
III.6. Dégradations irréversibles 63
III.7. Influence de la température. 65
III.8. Discussion : comparaison avec les mesures dans le gel silicone et origine des DP 67
IV. Mesures temporelles de l'émission de lumière par un substrat d'AlN sous tension alternative, impulsionnelle et continue 68
IV.1. Mesures sous tension alternative 68
IV.2. Mesures sous tension impulsionnelle 70
IV.3. Commentaires sur les mesures d'émission de lumière avec un substrat d'AlN 74
V. Caractérisation des décharges partielles et de l'émission lumineuse sur des substrats d'Al_2O_3 dans l'huile silicone 75
V.1. « Bon » et « mauvais » substrats d'Al_2O_3. 76

V.2. Caractérisation d'un « bon » substrat d'Al_2O_3. 77
V.2.1. Sous tension AC 50Hz. 77
V.2.2. Sous tension impulsionnelle 79
V.3. Comparaison avec l'AlN 81
VI. Caractérisation des décharges partielles et de l'émission lumineuse sur des substrats verre/epoxy dans l'huile silicone *82*
VI.1. Sous tension alternative 82
VI.2. Sous tension impulsionelle 85
VII. Conclusion *85*
CHAPITRE III : INFLUENCE DE LA NATURE DE L'ENCAPSULANT 87
I. Caractérisation de différents liquides en configuration pointe-plan *87*
I.1. Huile silicone Rhodorsil 47V350 et Colza 88
I.1.1. Huile silicone Rhodorsil 47V350 88
I.1.2. Interprétation des mesures. 90
I.1.3. Huile de Colza. 92
I.2. Huile minérale pour transformateur Univolt® 93
I.3. Jarylec. 95
I.4. Ugilec ® 97
I.5. Mesures sous tension impulsionelle 98
I.6. Mesures en géométrie lame-plan 98
I.7. Bilan des mesures 99
II. Mesure des décharges partielles sur des substrats dans différents liquides et un gel silicone . 101
II.1. Evaluation de la TADP 101
II.2. Reproductibilité des mesures de décharges partielles 102
II.3. Conclusion sur l'origine des DP avec les substrats enrobés 104
III. Mesure de l'émission lumineuse sur des substrats dans différents liquides et un gel silicone . 106
III.1. Mesures dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 107
III.2. Mesures dans l'huile de colza 109
III.3. Mesures dans l'Ugilec® 110
III.4. Mesures dans le gel silicone 112
III.5. Mesures dans le Jarylec 113
III.6. Mesures dans l'huile de transformateur Univolt® 116
III.7. Mesures avec un substrat d'Alumine Al_2O_3 118
III.8. Discussion : origine de la lumière mesurée sur les substrats enrobés par différents liquides ou gels 118
III.9. Utilisation de la lumière émise pour évaluer l'activité des DP sous onde non sinusoïdale (influence du temps de montée) 121
CHAPITRE IV : SPECTROSCOPIE DIELECTRIQUE HAUTE TENSION 123
I. Introduction *123*

II. Résultats de mesure *124*
III. Discussion *128*
III.1. Origine des pertes non-linéaires 128
III.2. Courant non-linéaire dans l'échantillon 130
III.3. Mesures du courant de fuite 131
IV. Conclusion *133*

CONCLUSION GENERALE 135

PERSPECTIVES 139

ANNEXES 141

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 149

Table des figures

Figure I - 1 : Structure simple (a) et circuit équivalent (b) d'un IGBT [1] 5
Figure I - 2 : Vue éclatée d'un module de puissance IGBT 6
Figure I - 3 : Structure de base d'un module de puissance IGBT [] 6
Figure I - 4 : Motif unitaire des silicones 9
Figure I - 5 : Formules chimiques des différents motifs siloxaniques : a : mono-fonctionnelle, b : di-fonctionnelle, c : tri-fonctionnelle, d : tétra-fonctionnelle 10
Figure I - 6: Structure du poly-méthyl-siloxane 10
Figure I - 7 : Forme de tension appliquée durant le test de mesure de DP selon la norme IEC 1287 ... 12
Figure I - 8 : Types des décharges partielles : a : interne, b : de surface, c : couronne, d : en arborescence 16
Figure I - 9 : Modèle classique des capacités équivalentes d'un diélectrique avec une cavité interne [] 17
Figure I - 10 : Récurrence des DP dans une cavité [47] 18
Figure I - 11 : Courbe de Paschen pour quelques gaz simples [48] 18
Figure I - 12 : Circuit équivalent et récurrence des décharges couronnes [47] 19
Figure I - 13 : Schéma de principe d'un système de détection élémentaire 21
Figure I - 14 : Différentes étapes du processus d'électroluminescence [51] 23
Figure I - 15 : Substrat avec des électrodes de forme carré et en peigne 25
Figure I - 16 : Molécule de Polydiméthylsiloxanne 25
Figure I - 17 : Les composantes chimiques dans le Jarylec®C101 : benzylate-toluène et di-benzylate-toluène 26
Figure I - 18 : Les composantes chimiques dans l'Ugilec 26
Figure I - 19 : Les composantes chimiques dans l'huile de colza 27
Figure I - 20 : Cellule de mesure des décharges partielles avec le substrat 28
Figure I - 21 : Cellule de mesure en configuration pointe – plan 29
Figure I - 22 : Source de tension sinusoïdale 29
Figure I - 23 : Source de tension impulsionnelle avec ou sans composante continue 30
Figure I - 24 : Dispositif de mesure de décharges partielles. 30
Figure I - 25 : Exemple de distribution des décharges mesurée par le système ICM 31
Figure I - 26 : Exemples d'acquisition de DP en fonction du choix du LLD et du temps d'attente 32

Figure I - 27 : Exemple d'acquisition de DPs quand la fréquence élevée de l'apparition des décharges produit des artefacts de mesure. Echantillon AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 à $7kV_{eff}$. 33
Figure I - 28 : Dispositifs de mesure optique 33
Figure I - 29 : Images obtenu dans le noir, a : avant et b : après avoir effectué une moyenne sur 100 images..... 34
Figure I - 30 : Forme du courant PM enregistré sur l'oscilloscope avec un temps d'intégration court (C minimum, R = 1MΩ)..... 35
Figure I - 31 : Forme de l'impulsion de i_{PM}..... 35
Figure I - 32 : Schéma représentatif des parties réelle (ε') et imaginaire (ε") de la permittivité complexe en..... 36
Figure I - 33 : Schéma représentatif des parties réelle (ε') et imaginaire (ε") de la permittivité complexe en fonction de la fréquence dans le cas d'une conduction non ohmique. Dans le dernier cas, la polarisation d'électrode est observée..... 37
Figure I - 34 : a : Dispositif Programma IDA 200 et b : IDA 200 HVU (High Voltage Unit) 38
Figure I - 35. Précision des mesures en fonction de la fréquence et de la capacité de l'échantillon..... 39
Figure II - 1 : Emission de lumière par le substrat d'AlN recouvert d'huile silicone au cours du temps à température ambiante (20°C). Aucune tension n'est appliquée 42
Figure II - 2 : Emission de lumière par le substrat d'AlN chauffé à 140°C. Aucune tension n'est appliquée [6]..... 42
Figure II - 3 : Image du substrat d'AlN hors tension. La zone noire interne de forme carrée représente l'électrode de cuivre [6]. a : 20°C, aucune lumière n'est émise. b : 80°C, faible lumière émise. c : 140°C , forte émission issue du substrat..... 43
Figure II - 4 : Réponse du système optique $T_{\%}$ en fonction de longueur d'onde, déduit de la sensibilité relative du PM $T_{\%PM}$ et de taux de transmission de lumière de la lentille $T_{\%lens}$ ($T_{\%}=T_{\%PM}.T_{\%lens}$) 44
Figure II - 5 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} sur différents substrats d'AlN dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 en fonction de la tension appliquée. Echantillon AlN 1 test 7, AlN 2 test 2 et AlN 8 test 2 45
Figure II - 6 : Evolution du photo-courant moyen I_{PM} dans les conditions de la figure II-5 (échantillon AlN 1 test 7, AlN 2 test 2 et AlN 8 test 2). La position du PM pour AlN8 est verticale par rapport au substrat, pour les autres de 45°. La sensibilité est donc un peu plus élevée pour les mesures avec l'AlN8 45
Figure II - 7 : Distribution des décharges en fonction de la phase (la couleur correpond aux nombres de décharges), nombre de décharges en fonction de la phase et nombre de décharges en fonction de la charge (la couleur rouge représente les charges positives, la couleur bleue les charges négatives). Echantillon AlN1 dans l'huile silicone 47V350 à $7kV_{eff}$..... 46

Figure II - 8 : Distribution et nombre de décharges en fonction de la phase. Echantillon AlN2 dans l'huile silicone 47V350 à $7kV_{eff}$. 46
Figure II - 9 : Distribution et nombre de décharges en fonction de la phase. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone à $7kV_{eff}$ 46
Figure II - 10 : Localisation de la lumière émise sur le substrat AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, a : $4kV_{eff}$ et b : $7kV_{eff}$ 47
Figure II - 11 : Localisation de la lumière émise sur le substrat d'AlN2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350n a : $4kV_{eff}$ et b : $7kV_{eff}$ 47
Figure II - 12 : Localisation de la lumière émise sur le substrat AlN8 dans l'huile silicone, a : $4kV_{eff}$ et b : $7kV_{eff}$. 47
Figure II - 13 : Observation par microscopie des irrégularités au bord de la métallisation de l'AlN1 . 48
Figure II - 14 : Observation du bord de métallisation du substrat AlN2 sous microscope 48
Figure II - 15 : Observation du bord de métallisation du substrat AlN8 sous microscope 48
Figure II - 16 : Taux de transmission de lumière d'un substrat d'AlN de 630nm, mesuré avec un spectrophotomètre UV-visible 50
Figure II - 17 : Taux de transmission de la lumière calculé pour le substrat AlN et Al_2O_3 pour différentes épaisseurs. 50
Figure II - 18 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée sur différents échantillons 51
Figure II - 19 : Rapport I_{PM}/I_{DP} sur différents échantillons testés. Aucune mesure de I_{PM} sur l'AlN7 n'a été effectuée 52
Figure II - 20 : Evolution du photo-courant moyen (I_{PM}) et du courant moyen de décharges (I_{DP}) en fonction de la tension alternative 50Hz. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 après conditionnement (dégazage à température ambiante) 53
Figure II - 21 : figure II-20 présentée en échelle logarithmique 53
Figure II - 22 : Distribution des décharges en fonction de la phase à 6kVeff (a), à 7kVeff (b) et à 8kVeff(c). Echantillon AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (test 2) 54
Figure II - 23 : Nombre des décharges positives et négatives en fonction de la tension appliquée (AlN8) 54
Figure II - 24 : Estimation de la valeur maximale des décharges en fonction de la tension appliquée. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone 47V350 (test 2). Cette valeur est estimée à partir des distributions N(Q) des DP 55
Figure II - 25 : Lumière issue de l'AlN8 recouvert de Rhodorsil 47V350. a : $3kV_{eff}$. b : $5kV_{eff}$. c : $8kV_{eff}$ 55
Figure II - 26 : Exemple corrélation DP – lumière. 1 : photo-courant issu du PM. 2 : courant traversant l'impédance de mesure de l'ICM. Substrat AlN8 dans l'huile silicone à $7kV_{eff}$ 56

Figure II - 27 : Influence du dégazage (20°C, 10^{-2}mBar) sur a : le courant de décharge I_{DP} et b : photo-courant. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, test 1 et test 2 57
Figure II - 28 : Distribution des décharges sur le substrat sous différents conditions. a : sans dégazage (test1). b : dégazage 1 h à 20°C (test 2). Echantillon AlN5 dans l'huile silicone 47V20 58
Figure II - 29 : Observation de la surface de l'AlN sous microscope électronique à balayage..... 58
Figure II - 30 : Variations de la viscosité en fonction de la température pour les huiles Rhodorsil type 47V [61] 59
Figure II - 31 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée sous l'influence du dégazage à haute température. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, conditionné à 150°C 60
Figure II - 32 : Evolution du photo-courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée sous l'influence du dégazage à haute température. Echantillon AlN 5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, conditionné à 150°C 61
Figure II - 33 : Distribution des décharges à $8kV_{eff}$, a : après 1h de dégazage à 20°C et b : 6h de dégazage à 150°C. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone 47V20 61
Figure II - 34 : Evolution du courant de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée au cours des essais. Echantillon AlN5 dans 47V20, test 6, 7 et 8 62
Figure II - 35 : Evolution de photo-courant I_{PM} au cours des essais. Echantillon AlN5 dans 47V20 – Test 6, 7 et 8 62
Figure II - 36 : Evolution de la distribution des décharges à $8kV_{eff}$ au cours des trois essais : a : immédiatement après le dégazage, b : 1 heure après le dégazage et c : 16 heures après le dégazage. Mesures effectuées à température ambiante. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20 – Test 6, 7 et 8..... 63
Figure II - 37 : Distribution des DP a : $10kV_{eff}$ et b : à $11kV_{eff}$. Echantillon AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, test 8..... 63
Figure II - 38 : Lumière émise par l'objet pour a : $10kV_{eff}$ et b : $11kV_{eff}$. Echantillon AlN 1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 – Test 8..... 64
Figure II - 39 : Evolution du courant de décharges sur le substrat AlN1 en fonction de la tension appliquée avant et après dégradation. Echantillon. AlN1 – Test 7 et 9..... 64
Figure II - 40 : Evolution du photo–courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée sur le substrat avant et après dégradation. Echantillon AlN1 – Test 7 et 9 65
Figure II - 41 : Distribution des décharges sur le substrat à $7kV_{eff}$ avant (a) et après (b) dégradation. Echantillon AlN 1 - Test 7 et test 9. 65
Figure II - 42 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée à différentes températures de 20°C à -50°C. Echantillon AlN-S_1 dans l'huile silicone Baysilone PD5..... 66

Figure II - 43 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée à différentes température de 20°C à -50°C. Echantillon AlN – S_2 dans l'Huile Rhodia D5..... 66
Figure II - 44 : Forme du photo-courant instantané sur le substrat AlN8 (électrode carrée – colonne a) et sur le substrat AlN – SD (électrode en forme de « peigne » - colonne b) dans l'huile 47V350 (moyenne de 200 enregistrements)..... 69
Figure II - 45 : Evolution de la valeur maximale du photo-courant pendant les alternances positive et négative. Echantillon AlN-SD d'électrode en forme de « peigne » dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350. 70
Figure II - 46 : Photo-courant instantané sous tension impulsionnelle à $6kV_{CC}$, 50Hz, pour différents temps de montée (moyenne de 200 enregistrements). Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 71
Figure II - 47 : Photo-courant instantané sous tension impulsionnelle à $6kV_{CC}$, 50Hz, pour différents temps de montée. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (moyenne de 200 enregistrements). a : $T_{montée}$= 0.6µs, résistance de charge de 1kΩ. b : $T_{montée}$ =6.5µs, résistance de charge de 10kΩ. c : $T_{montée}$=80µs, résistance de charges de 100kΩ..... 72
Figure II - 48 : Intensité maximale du photo-courant I_{PMmax} pendant le dV/dt en fonction de la tension appliquée pour différents temps de montée sous tension impulsionnnelle et AC à 50Hz. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone 47V350 73
Figure II - 49 : Intensité moyenne du photo-courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée pour différents temps de montée. Forme de la tension : AC ou impulsionnelle. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 73
Figure II - 50 : Variation fréquentielle du photo-courant I_{PM} à différents temps de montée à $6kV_{cc}$ sous tension impulsionnelle. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350..... 73
Figure II - 51: Réponse du PM sous contrainte impulsionnelle (50Hz t_r=6,5µs) avec superposition d'une composante continue. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350..... 74
Figure II - 52 : Evolution du courant de décharges sur les substrats Al_2O_3 – S1, Al_2O_3 –S2 et Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350..... 76
Figure II - 53 : Distribution des décharges et nombre des décharges à $6kV_{eff}$ sur différents substrats. a :Al_2O_3 – S1. b : Al_2O_3 – S2. c : Al_2O_3 – S3. 77
Figure II - 54 : Evolution du courant de décharges I_{DP} et du photo-courant I_{PM} sur l'échantillon Al_2O_3 – S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, tension AC 50Hz 78
Figure II - 55 : Distribution des décharges sur le substrat Al_2O_3 – S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz à $3.6kV_{eff}$..... 78

Figure II - 56 : Localisation de la lumière émise sur le substrat Al_2O_3- S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz. a : 3.7kV_{eff}. b : 4.5kV_{eff} . c. 6.0kV_{eff} 79
Figure II - 57 : Photo-courant instantané sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension AC 50Hz à 7kV_{eff} (moyenne de 200 enregistrements) 79
Figure II - 58 : Photo-courant instantané (trace rouge) sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension impulsionnelle 50Hz (moyenne de 200 enregistrements) 80
Figure II - 59 : Evolution du courant moyen de PM sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension impulsionnelle et alternative 50Hz 80
Figure II - 60 : Comparaison des courants de décharges sur les substrat AlN-SD et Al_2O_3 –S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz 81
Figure II - 61 : Comparaison des photo-courants émis sur les substrat AlN-SD et AL_2O_3 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz. 82
Figure II - 62 : Evolution du courant moyen de décharges et du photo – courant sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz 83
Figure II - 63 : distribution des décharges partielles sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC, 50Hz, 12kV_{eff} 83
Figure II - 64 : émission de lumière sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension impulsionnelle 50Hz,à a : 10kV_{cc}, b : 15kV_{cc}, c : 18kV_{cc} 83
Figure II - 65 : Instabilité des décharges partielles sur un substrat Epoxy (S2) dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350. Tension appliquée en bleu. Niveau moyen de DP en rouge. 84
Figure II - 66 : Forme du photo-courant moyen émis sur l'époxy sous tension AC 50Hz à 32kV_{cc}. 1 : tension appliquée. A : I_{PM} instantané (moyenne sur 200 enregistrements) 84
Figure II - 67 : Comparaison entre l'intensité lumineuse moyenne I_{PM} émise par un substrat d'époxy et d'AlN – SD dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (impulsions carrées à 50Hz) 85
Figure III - 1 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350 et $i_{PM}(t)$ (moyenne 200 traces). Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance : 9 mm 89
Figure III - 2 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350 à 13kV_{eff} à a : forte sensibilité et b : sensibilité réduite, et c : $i_{PM}(t)$ (moyenné sur 200 acquisitions). Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm 89
Figure III - 3 : Nombre des décharges par minute en fonction de la tension appliquée. Rhodorsil 47V350 , 50Hz. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm 90
Figure III - 4 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350, et $i_{PM}(t)$ correspondant. a : moyenne sur 200 acquisition et b : enregistrement mono-coup. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm 90
Figure III - 5 : Huile de colza. a : forte sensibilité, b : sensibilité réduite et c : évolution du photo-courant (condition de mesure : 1MΩ, 15pF). Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm 92

Figure III - 6 : Huile de colza. a : sensibilité réduite et b : évolution du photo-courant (condition de mesure : 1MΩ). 15pF. Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm 93
Figure III - 7 : Comparaison du nombre de DP détectées par minute dans le Rhodorsil 47V350 et l'huile de Colza. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm 93
Figure III - 8 : Huile de transformateur. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm..... 94
Figure III - 9 : Huile de transformateur. Variation du courant moyen du PM après repos dans l'obscurité 16h. Pointe P6 de 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm..... 95
Figure III - 10 : Jarylec. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm 96
Figure III - 11 : Variation du courant de PM dans le Jarylec après repos dans l'obscurité pendant 16 h. Point P6 de 5µm, distance inter-électrode de 9mm..... 97
Figure III - 12 : Ugilec. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mn. 97
Figure III - 13 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8..... 103
Figure III - 14 : Evolution du courant de décharges moyen en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8 dans différentes huiles et dans le gel..... 104
Figure III - 15 : Distribution de charges en fonction de la phase sur le substrat AlN8 à $8kV_{eff}$ dans différents matériaux. a : Gel silicone Sylgard 527, b : Huile de colza, c : Huile silicone Rhodorsil 47V350, d : Huile de transformateur, e : Jarylec C101, f : Ugilec..... 104
Figure III - 16 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité..... 107
Figure III - 17 : Photo - courant moyen I_{PM} sur le substrat AlN8 dans divers liquides et un gel, avant et après 16h dans l'obscurité..... 108
Figure III - 18 : Image du substrat AlN8 dans l'huile de colza (a) à $2.5kV_{eff}$; (b) à $5kV_{eff}$, (c) à $8kV_{eff}$ 109
Figure III - 19 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'huile de Colza avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité..... 110
Figure III - 20 : Lumière émise sur le substrat AlN8 dans l'Ugilec T a : $4kV_{eff}$. b : $8kV_{eff}$ 111
Figure III - 21 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'Ugilec® T avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité..... 111
Figure III - 22 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans le gel silicone avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité. 112
Figure III - 23 Lumière émise sur le substrat AlN8 dans le gel silicone a : $4kV_{eff}$. b : $6kV_{eff}$ et c : $9kV_{eff}$..... 113
Figure III - 24 : Image du substrat AlN8 dans le Jarylec® juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité..... 114

Figure III - 25 : Photo-courant sur le substrat AlN8 dans le Jarylec® juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité 115
Figure III - 26 : Evolution du photo-courant dans le Jarylec® pendant plusieurs cycles consécutifs durant lesquels l'échantillon est d'abord exposé à la lumière avant l'essai (test1), puis plongé dans le noir pendant 16h avant l'essai (test 2). Dans le cycle 1 l'échantillon est resté plusieurs heures à la lumière et pendant les autres cycles le substrat a été à la lumière quelques minutes 116
Figure III - 27 : Image du substrat AlN8 dans l' Univolt ® 54 juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité 116
Figure III - 28 : Photo-courant sur le substrat AlN8 dans l'Univolt ® 54 juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité 117
Figure III - 29 : Evolution de photo-courant en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8 dans différents liquides et gel silicone. a : les mesures après le dégazage et b : mesure 16h après le dégazage 120
Figure III - 30 : Taux de transmission de lumière des différents liquides en fonction de la longueur d'onde (épaisseur : 1mm) 120
Figure IV - 1 : Propriétés diélectriques du substrat d'AlN (Echantillon AlN8 dans l'huile silicone) : a : permittivité et b : facteur de perte 125
Figure IV - 2 : Evolution du facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN (échantillon AlN8 dans l'huile silicone) 125
Figure IV - 3 : Propriétés diélectriques du substrat d'Al_2O_3 (Echantillon Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone) : a : permittivité et b : facteur de perte 126
Figure IV - 4 : Evolution de facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat d'AL_2O_3 (Echantillon Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone) 126
Figure IV - 5 : Propriétés diélectriques du substrat verre/époxy dans l'huile silicone : a : permittivité et b : facteur de perte 127
Figure IV - 6 : Evolution de facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat d'époxy dans l'huile silicone 127
Figure IV - 7 : Variation fréquentielle du photocourant en alternatif (A) et impulsionnel bipolaire (D) [6] 129
Figure IV - 8 : Schéma équivalent d'un substrat céramique 129
Figure IV - 9 : Variation de la résistance non linéaire R_{DP} calculée en fonction de la tension :a : sur l'AlN et b : sur l'Al_2O_3 131
Figure IV - 10 : Evolution du courant non linéaire calculé à 50 Hz. Comparaison avec les courants I_{DP} mesurés dans les mêmes conditions. a : AlN et b : Al_2O_3 131
Figure IV - 11 : Evolution temporelle du courant sur le substrat Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone 47V350. a : polarisation positive et b : polarisation négative 132

Figure IV - 12 : Comparaison du courant de fuite et du courant calculé sur le substrat Al2O3 – S3 dans l’huile silicone 45V350. 132

INTRODUCTION

Les convertisseurs statiques sont des dispositifs en évolution technologique permanente, qui trouvent de très nombreuses applications dans lesquelles le vecteur électricité est incontournable.

Dans le domaine des fortes puissances, les applications concernent essentiellement la gestion optimisée des réseaux d'énergie et le transport (spatial, aéronautique, terrestre, maritime). Pour certaines applications, un intérêt particulier est porté aux convertisseurs haute tension, par exemple pour relier les réseaux continus THT ou pour supprimer les transformateurs dans les applications liées aux transports ferroviaires. La tendance est à l'augmentation du champ électrique dans les composants, suite à la réduction d'échelle et/ou l'augmentation des tensions. En conséquence, les problèmes de tenue en tension sont plus difficiles à résoudre. Sur les convertisseurs apparaissent également des problèmes liés à la tenue en température. Des densités de flux thermiques plus importantes sont à extraire des composants.

Dans les convertisseurs statiques, les modules de puissance IGBT (***Insultated Gate Bipolar Transistor***) [1, 2] sont largement utilisés aussi bien dans les domaines des fortes que des moyennes puissances en raison de leurs bonnes caractéristiques intrinsèques : faible tension de commande, faible tension de déchet. Les IGBT couvrent aujourd'hui une large gamme de tensions (jusqu'à 6500V) et de courants (10 à 3600A) [3, 4, 5].

La structure d'un module IGBT classique est constituée de l'assemblage de semi-conducteurs (transistors et diodes) sur un substrat isolant céramique. Des fils d'aluminium relient les différents semi-conducteurs. La structure repose sur une semelle afin d'évacuer la chaleur vers le milieu extérieur. L'ensemble est noyé dans un encapsulant, souvent du gel silicone pour assurer la tenue diélectrique du module. La fiabilité du module est liée à de nombreux paramètres et notamment à la fiabilité de l'isolation qui est primordiale.

Le nitrure d'aluminium (AlN), l'alumine (Al_2O_3) et les gels silicones sont les matériaux isolants les plus utilisés dans ces modules. En fonctionnement nominal, ces matériaux sont soumis à des contraintes électriques et thermomécaniques d'autant plus nocives que les calibres en tension et la température seront élevés. La fiabilité et la durée de vie du module IGBT peuvent en être affectées. Un indicateur de l'état du module ou d'un système soumis à une contrainte électrique est sa capacité à

générer des décharges partielles. Les fournisseurs de matériel électrique utilisent la norme IEC 1287 pour qualifier leurs matériels vis-à-vis des décharges partielles.

Cette étude s'inscrit dans la suite des travaux de thèse de M. T. DO [6] dans lesquels les propriétés du gel silicone et du substrat céramique d'AlN ont été caractérisées par méthodes électriques et optiques. Son travail a répondu à certaines questions posées sur les mécanismes des décharges partielles dans l'isolation, la tenue diélectrique du gel silicone sous température élevée et les propriétés d'auto - cicatrisation du gel.

Les simulations de DO [6] ont mis en évidence des renforcements de champ à l'interface substrat/gel silicone/métallisation où des décharges ont la probabilité la plus forte d'apparaître. La caractérisation du gel dans une configuration d'électrodes pointe-plan à permis de montrer que la génération de « streamers » (phénomènes pré-disruptifs) conduit à une dégradation rapide du gel (apparition de vacuoles), qui sont à leur tour siège de décharges partielles.

Sur des substrats de nitrure d'aluminium (AlN) enrobés de gel, deux régimes de décharges partielles (DP) ont été identifiés : un régime « réversible » (stable et reproductible) ne produisant pas de dégradations apparentes sur des durées de quelques heures, et à plus haute tension un régime de DP produisant très rapidement des dégradations irréversibles. Do a émis l'hypothèse que ces deux types de DP sont liés aux différents types de streamers qui peuvent apparaitre dans le gel : DP réversibles liées aux streamers « lents » de très petites tailles, et DP irréversibles liées aux streamers rapides filamentaires de grandes amplitudes. Cependant, cette origine des DP n'est pas clairement établie. En effet, il existe une contradiction entre la stabilité des DP mesurées sur les substrats, et la dégradation rapide du gel observée en géométrie pointe-plan, y compris avec des décharges de très petites amplitudes. Do avait également réalisé une étude de la lumière émise par les substrats, et conclu que la lumière pouvait provenir de l'électroluminescence du substrat et/ou des décharges partielles.

Pour progresser sur ces questions, d'autres matériaux d'encapsulation et également d'autres types de substrats ont été étudiés dans notre étude. Notre intérêt s'est porté sur divers liquides en remplacement du gel, et également sur deux autres types de substrats (alumine et verre-époxy). Contrairement aux gels, les liquides ont des capacités d'auto-cicatrisation qui permettent de réaliser de nombreuses expériences dans des conditions stables et répétitives. Nous verrons qu'ils présentent également des caractéristiques de DP et des propriétés de luminescence très variables, et nous étudierons l'impact sur la caractérisation expérimentale des substrats enrobés.

Les questions posées dans ce travail concernent essentiellement:

- La détermination de l'origine des DP mesurées sur des substrats enrobés ?
- La signification et l'intérêt d'utiliser une méthode optique pour détecter des décharges partielles sur les substrats?

- Les conséquences pratiques pour le test de substrats enrobés.

Le manuscrit s'articule autour 4 chapitres.

Le premier chapitre introduit les notions de décharges partielles et d'électroluminescence nécessaires pour l'analyse du comportement des matériaux isolants sous contraintes électriques. Les causes de défaillances de l'isolation pour les modules sont introduites. Nous présentons également les techniques expérimentales. L'étude bibliographique sur les décharges partielles dans les modules est réduite en raison du nombre peu élevé d'études publiées sur le sujet.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les résultats de mesures des décharges partielles sur des substrats enrobés d'huile silicone. L'objectif est de comparer les comportements pour émettre des hypothèses sur la nature de l'origine des décharges dans les modules. Le nitrure d'aluminium (AlN), l'alumine (Al_2O_3) et un composite verre/époxy sont étudiés. Les moyens de caractérisation reposent essentiellement sur les réponses électrique et optique des échantillons.

Le chapitre 3 est consacré à l'étude de l'impact de l'environnement (le passivant) sur les substrats. Plusieurs liquides isolants sont caractérisés en configuration pointe – plan et comparés avec le comportement des substrats d'AlN immergés dans ces liquides. L'origine des DP et de la lumière émise par les substrats est discutée.

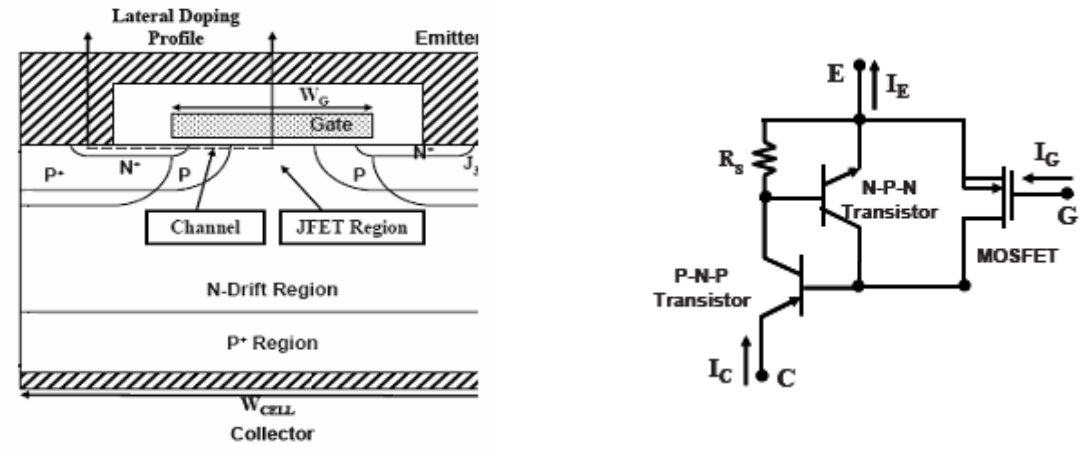
Dans le chapitre 4, nous étudions par spectroscopie diélectrique haute tension le comportement des substrats enrobés.

La dernière partie contient les conclusions essentielles de cette étude et les perspectives de recherche qui en découlent.

CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

I. Les modules IGBT

L'IGBT (***Insulated Gate Bipolar Transistor***) est un semi-conducteur de puissance utilisé dans le domaine de l'électronique de puissance depuis le début des années 90. Sa structure est constituée de quatre couches semi-conductrices différentes (P^+, N^-, P^+, N^-) synthétisées sur le même cristal de silicium [1, 2]. Ce transistor associe deux technologies différentes (bipolaire et MOS) afin d'obtenir leurs avantages tout en réduisant leurs inconvénients.



(a) (b)

Figure I - 1 : Structure simple (a) et circuit équivalent (b) d'un IGBT [1]

L'IGBT est utilisable sur une large gamme de tension (600V à 6.5kV) et de courant (10 à 3600A) pour une gamme de fréquence également étendue (10^2 à 10^4 Hz) [3, 4, 5] dans la conception des convertisseurs de puissance. Les modules IGBT sont intégrés dans de nombreuses applications qui concernent les variateurs de vitesse, les alimentations ininterruptibles, la traction électrique, la gestion de sources d'énergie éolienne ou solaire, les véhicules électriques, les ascenseurs, et les appareils domestiques.

Il existe actuellement sur le marché plusieurs fabricants de modules IGBT pour les applications de conversions de l'énergie électrique : DYNEX, SIEMENS, EUPEC, MITSUBISHI… Les technologies mises en œuvre sont sensiblement les mêmes d'un fabricant à l'autre.

I.1. Structure des modules IGBT

La structure de base d'un module de puissance IGBT est présentée sur les Figure I - 2 et Figure I - 3.

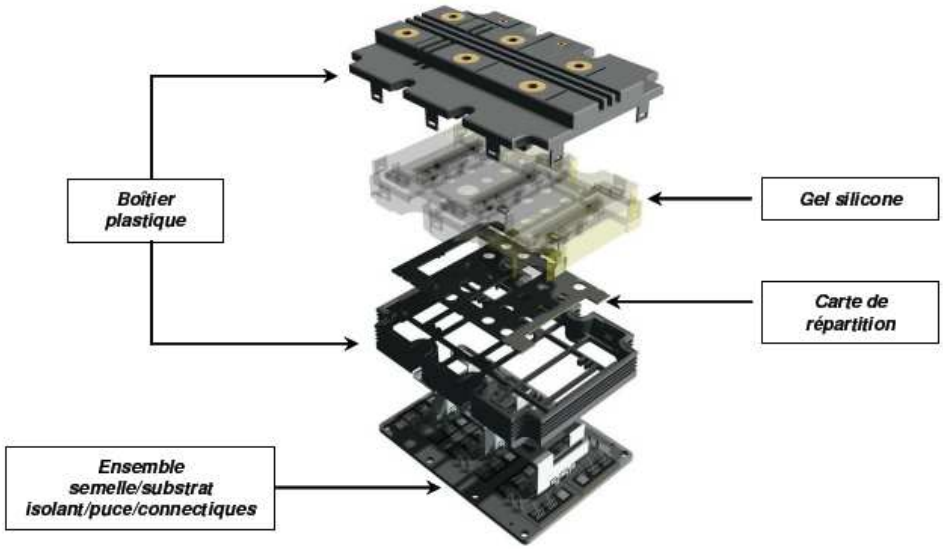


Figure I - 2 : Vue éclatée d'un module de puissance IGBT

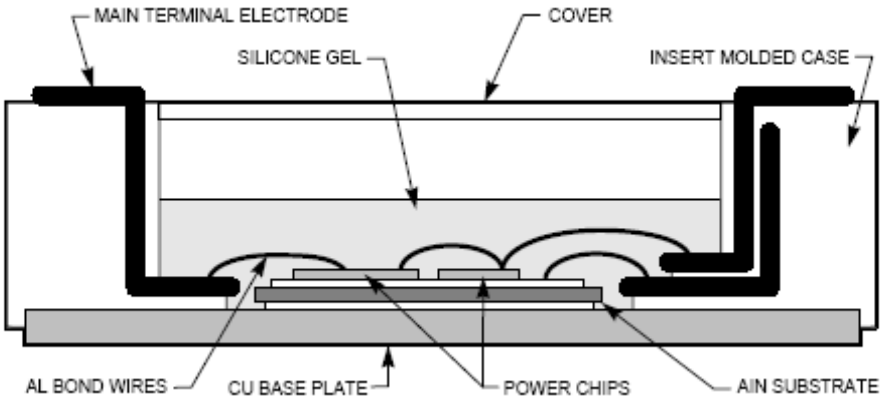


Figure I - 3 : Structure de base d'un module de puissance IGBT [7]

Un module IGBT est constitué de l'assemblage des semi-conducteurs (transistors et diodes) sur un substrat isolant métallisé. Les interconnexions électriques entre les puces IGBT sont réalisées par des fils d'aluminium ("bonding"). La structure repose sur une semelle métallique pour permettre l'évacuation des calories vers le milieu extérieur. Le cuivre et l'alliage d'Al-SiC sont les matériaux couramment utilisés pour la semelle grâce à leur excellente conductivité thermique. L'efficacité de transfert de la chaleur doit être optimisée pour éviter des températures de fonctionnement de la puce

trop importantes ce qui conduirait à la défaillance du semi-conducteur. L'ensemble de la structure est noyé dans un isolant, par exemple du gel silicone pour assurer la tenue diélectrique du module. Le packaging externe préserve les composants semi-conducteurs des agressions externes (humidité, contamination, corrosion…).

Les IGBT dans un module sont disposés en parallèle afin d'obtenir le calibre en courant désiré. Des associations plus ou moins complexes sont envisageables, allant du simple interrupteur formé d'un IGBT avec sa diode en antiparallèle, en passant par le hacheur, le bras de pont en H ou triphasé (six packs) [3, 8]. Certains modules de puissance de CIB (Converter, Inverter, Brake) [9] ou PIM (Power Integrated Module) [10] réunissent le pont redresseur, le hacheur de freinage avec les six IGBT de l'onduleur et leurs diodes de roue libre dans un même boîtier. Des modules "intelligent" ou IPM (Intelligent Power Module » [11]), incluant en plus le driver et différents capteurs existent également.

Les dernières avancées technologiques ont pour objectif d'améliorer la fiabilité des modules, Elles portent sur l'optimisation du compromis entre les pertes en régimes de commutation et de conduction dans les éléments semi-conducteurs. Quant à la tenue en tension, elle ne semble guère pouvoir aller au-delà des 6500V actuels, en raison des limites imposées par la technologie silicium. Des matériaux comme le GaN, le SiC et le diamant apparaissent intéressants pour des applications à plus haute tension, et peuvent également supporter de plus hautes températures.

I.2. Les matériaux isolants

Dans un module IGBT, différents types de matériaux isolants sont utilisés. Nous nous intéressons aux deux matériaux qui font l'objet de cette étude : le substrat et l'encapsulant.

I.2.1. Les substrats

Le substrat est un des éléments fondamentaux du module IGBT [12, 13]. Il permet d'isoler électriquement la partie puissance de la base du module qui est reliée à un système de refroidissement. Le substrat doit non seulement supporter une tension élevée, mais aussi favoriser l'extraction des calories des puces via le système de refroidissement. Le choix du substrat repose sur divers critères et contraintes :

- La technologie utilisée (circuit imprimé, couche mince, couche épaisse,…).
- Les contraintes électriques.
- Les contraintes mécaniques et thermiques.
- Le coût de fabrication.

Les céramiques sont utilisées essentiellement sous forme de plaques métallisées. Les caractéristiques du substrat dépendent de leur structure électronique (nature des atomes et des liaisons) et de leur cristallinité (phases cristallines, amorphes et présence des défauts). Les céramiques les plus utilisées comme substrat sont présentées dans le Tableau I - 1.

Propriété	**AlN**	**SiC**	**Al_2O_3**	**BeO**
Constante diélectrique	8.8	40	9.0	6.5
Module Young (10^3MPa)	300-310	380	300-380	300-350
Contrainte à rupture (MPa)	300-500	450-500	250-300	170-250
Conductibilité thermique (W/m.K)	170-260	270	20-30	250
Coefficient de dilatation thermique (10^{-6}/°C)	4.2-5.2	3.7	7.5-8.1	6.8-7.5
Résistivité électrique à 300K (Ω.m)	10^{14}	10^{13}	10^{13}	10^{14}
Perte diélectrique (tan δ) à 1MHz ($x10^{-4}$)	5	500	2	2
Tension de claquage (kV/mm)	14-17	0.7	11-16	10-14

Tableau I - 1 : Comparaison des propriétés de matériaux céramiques utilisables pour les substrats [13]

Parmi ces matériaux, l'alumine est la plus couramment employée comme substrat. Ce matériau est disponible avec différents niveaux de pureté. La constante diélectrique, la conductivité thermique et le coefficient de dilatation thermique augmentent avec la pureté de la céramique [12]. L'alumine possède une faible conductibilité thermique (20-30W/m.K) et une constante diélectrique élevée par rapport aux autres matériaux ce qui n'est pas approprié aux applications de forte puissance comme les applications en traction ferroviaires. Le coût de fabrication de l'Al_2O_3 est faible.

Le nitrure d'aluminium (AlN) et le carbure de silicium (SiC) possèdent une conductivité thermique plus élevée que l'alumine. En particulier, l'AlN possède un coefficient d'expansion thermique (4.2 à $5.2x10^{-6}°C^{-1}$) qui est proche de celui du silicium ($4.1x10^{-6}°C^{-1}$). Ceci permet de réduire les contraintes thermomécaniques au niveau de la brasure utilisée pour la fixation de la puce sur le substrat métallisé. L'AlN est donc le matériau le plus approprié pour les applications de forte puissance même s'il est plus coûteux. Le carbure de silicium est peu utilisé en raison de ses propriétés diélectriques inadaptées pour les fortes puissances.

L'oxyde de béryllium est très rarement utilisé malgré ses meilleures propriétés thermiques pour des raisons de toxicité lors de son usinage et d'un coût de fabrication élevé.

La métallisation des substrats céramiques est réalisée soit par activation chimique, soit par dépôt d'une mince couche d'alliage. Les deux techniques les plus utilisées pour la métallisation du nitrure d'aluminium sont le Direct Bonding Copper (DBC) [14] et l'Active Metal Brase (AMB) [15]

I.2.2. L'encapsulant

Dans les modules IGBT, l'encapsulant recouvre les composants et le substrat, les connexions électriques (wire bonding ou insert métallique), une partie de la semelle, ainsi qu'une partie des connectiques de puissance. Il doit assurer la tenue électrique du module de puissance. Les propriétés recherchées pour l'encapsulant sont nombreuses :

- Une rigidité électrique élevée.
- Une résistivité électrique élevée.
- Une conductivité thermique élevée.
- Une permittivité faible.
- Un faible coefficient de perte tanδ.
- Un faible coefficient d'expansion thermique.
- Une bonne stabilité thermique.
- Une bonne adhérence à la puce.
- Un faible module d'élasticité.

La plupart des encapsulants utilisés sont des polymères qui se présentent initialement sous formes liquides. Des gels silicones sont souvent utilisés comme isolation interne du module. Les silicones (ou poly-siloxanes) sont des polymères caractérisés par la présence dans leurs molécules, en plus de la liaison silicium-carbone, d'une liaison silicium - oxygène [16, 17]. La structure chimique peut être représentée par la répétition d'un motif unitaire de formule :

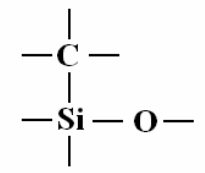


Figure I - 4 : Motif unitaire des silicones

Suivant les conditions de fabrication, les produits se présentent sous plusieurs formes : huiles, gel, gommes, pâtes, graisses, élastomères et résines. Pour chacune de ces familles, les produits se différencient de par leurs compositions, leurs degrés de polycondensation, de ramification et de réticulation, ce qui rend difficile une description précise de leurs propriétés.

Les motifs siloxanes peuvent comporter de une à quatre fonctions (Figure I - 5). L'enchaînement silicium – oxygène améliore certaines propriétés [16] par rapport aux polymères purement organiques, par exemple, le pouvoir d'isolation, la stabilité thermique dans une large plage de température (de –80 à +250°C pour certains) et la stabilité chimique.

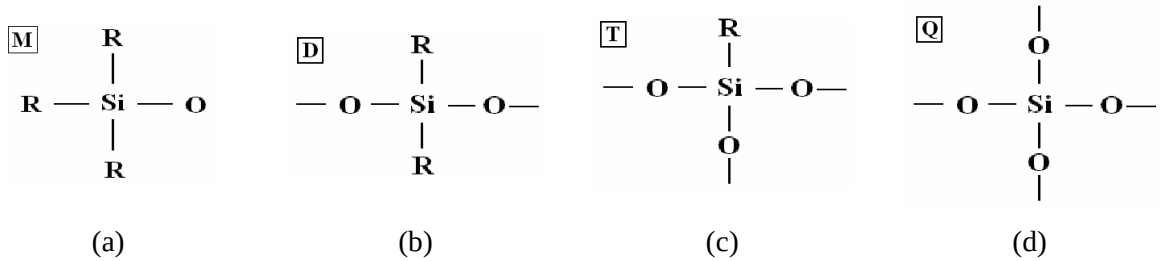


Figure I - 5 : Formules chimiques des différents motifs siloxaniques : a : mono-fonctionnelle, b : di-fonctionnelle, c : tri-fonctionnelle, d : tétra-fonctionnelle

Le point faible des silicones réside dans leurs performances mécaniques limitées et leur faible imperméabilité aux gaz.

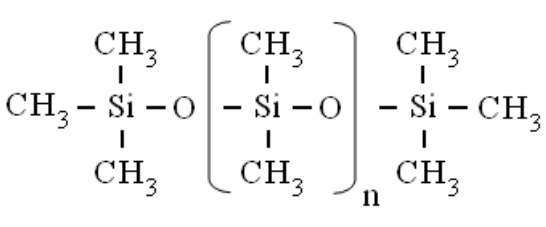


Figure I - 6: Structure du poly-méthyl-siloxane

Le gel silicone est très utilisé comme encapsulant dans les modules de puissance [18]. Ce gel est du poly-diméthyl-siloxane (PDMS -Figure I - 6). Il est polymérisé à température ambiante ou à haute température. Les gels silicones sont semblables aux élastomères du fait qu'ils soient "solides" et réticulés. Ce réseau réticulé forme un « cadre » qui maintient la phase liquide et empêche son écoulement. Les gels mous peuvent contenir jusqu'à 90% de fluide. Le fluide est typiquement de l'huile silicone qui est compatible avec le réseau réticulé. La concentration élevée du fluide rend le gel mou et flexible. L'élasticité du gel lui permet d'enrober les composants sans générer de contrainte mécanique importante.

Des liquides pourraient également être utilisés comme encapsulant. Leur viscosité très faible par rapport aux gels constitue un avantage pour l'isolation (moins de vacuoles, module d'élasticité plus faible) mais l'étanchéité du packaging doit être renforcée.

I.3. Contraintes et défaillances des modules de puissance IGBT

I.3.1. Contraintes

Comme tout composant électronique en fonctionnement, les modules IGBT sont soumis à des mécanismes de dégradation et de vieillissement liés aux conditions de fonctionnement ou à l'environnement. En électronique de puissance, les mécanismes de dégradation et les modes de défaillance des composants ont été largement étudiés et le sont encore aujourd'hui [2, 19, 21]. Les

défaillances dans les modules IGBT sont principalement dues aux contraintes thermo-mécaniques et électriques. Les cyclages thermiques et les décharges partielles constituent les causes principales de défaillance.

Les contraintes limites qui s'appliquent aux composants de puissance sont liées au packaging et aux puces semi-conductrices (IGBT et diode). Ces contraintes sont étudiés en détails dans [20, 21] et dans la thèse de VALLON [22]. La durée de vie des modules IGBT est fortement associée aux contraintes thermiques et électriques.

Concernant le packaging, les limites sont d'ordre :

- Thermique : l'assemblage d'un module IGBT (bondings / puces / brasures / substrat / semelle) est très sensible au cyclage thermique résultant par exemple de l'application de cycles de marche et d'arrêt ou de la variation de fréquence de modulation. La différence des coefficients d'expansion thermique (CTE) des différents matériaux utilisés dans un module, l'épaisseur des différentes couches de matériau [20, 21] participent à l'apparition de contraintes thermomécaniques. Elles sont localisées aux interfaces entre les puces et le substrat, entre le substrat et la semelle du composant et au niveau des bondings. Les conséquences sont souvent le décollement et les fissures au pied du fils de bonding, le délaminage de la métallisation entre les puces et le substrat, mais également la rupture du substrat céramique et l'apparition de fissures dans les puces [23, 24, 25, 26].

En régime nominal, la dissipation de chaleur générée par les puces peut atteindre quelques centaines de W/cm^2. La température de jonction des puces ne doit pas être trop importante afin d'assurer le fonctionnement normal du module. La température de la puce en fonctionnement continu est égale à 125°C et en régime de surcharge de courte durée de 150°C (valeur spécifiée par les constructeurs). Cependant il est possible dans certains cas d'atteindre 150°C en nominal [21].

- Electrique : les puces étant soumises à des potentiels élevés, il est nécessaire d'avoir une bonne isolation entre les puces, et entre ces puces et l'environnement extérieur. Le substrat en AlN et le gel silicone doivent jouer ce rôle. En fonctionnement nominal, les puces sont soumises à des potentiels élevés. Le champ électrique appliqué à l'isolation peut dépasser localement une centaine de kV/mm [6, 27, 28] dans les zones localisées aux bords de la métallisation ou des bondings. L'application d'une tension trop élevée, ou sa répétition, peut provoquer un défaut d'isolement. Des valeurs de champs de claquage des céramiques couramment employées sont données dans le Tableau I - 1 (de 10 à 17kV/mm) et des valeurs comparables sont données pour les gels silicones (de 15 à 18kV/mm). Toutefois, ces valeurs publiées et mesurées selon des méthodes normalisées ne sont pas directement utilisables pour la conception du module. En effet, les conditions expérimentales dans les essais normalisés et à l'intérieur d'un module sont différentes, notamment en terme de géométrie d'électrodes.

- Environnementale : le boîtier du composant protège les puces contre les agressions liées à l'environnement du module (humidité, attaque chimique). Un environnement trop sévère peu altérer le fonctionnement des composants.

I.3.2. Etudes des décharges partielles dans les modules IGBT

Un certain nombre d'études sur la détection et la localisation des décharges partielles dans les modules de puissance IGBT ont été effectuées afin d'apprécier leur fiabilité et/ou d'anticiper leurs choix pour un dimensionnement approprié dans les modules. Les contraintes en tension sont de quelques kV et les fréquences de commutation peuvent être élevées (quelques kHz). Cela peut conduire à des décharges partielles qui sont susceptibles de dégrader de façon irréversible le module. Les variations de tension appliquées aux modules sont de l'ordre du kV/µs. La détection des décharges partielles devient alors très difficile, étant donné que les harmoniques du courant dues à la tension appliquée (jusqu'à plusieurs MHz) sont dans une gamme de fréquence identique à celle utilisée pour détecter les DP. Les mesures de décharges partielles sont donc effectuées généralement sous contrainte alternative en suivant la norme IEC 60270 qui traite des techniques de mesures pour détecter les décharges partielles, et la norme IEC 1287 [29, 30]. Celle-ci présente le protocole de mesure pour qualifier l'isolation.

Le principe de l'essai IEC 1287 est l'application d'une tension de test au module IGBT entre son embase et toutes les autres électrodes (émetteur, collecteur et grille) court-circuitées entre elles. La Figure I - 7 présente le profil de tension à appliquer selon la norme IEC 1287. Pour un module IGBT de 6.5kV, une tension de $10kV_{eff}$ ($1.5U_m$) est appliquée une minute, puis une tension de $7kV_{eff}$ ($1.1U_m$) pendant 30s. Pendant les 5 dernières secondes de la mesure, la charge apparente due aux décharges partielles mesurée doit être inférieure à 10pC. Dans ce cas, l'isolation est qualifiée.

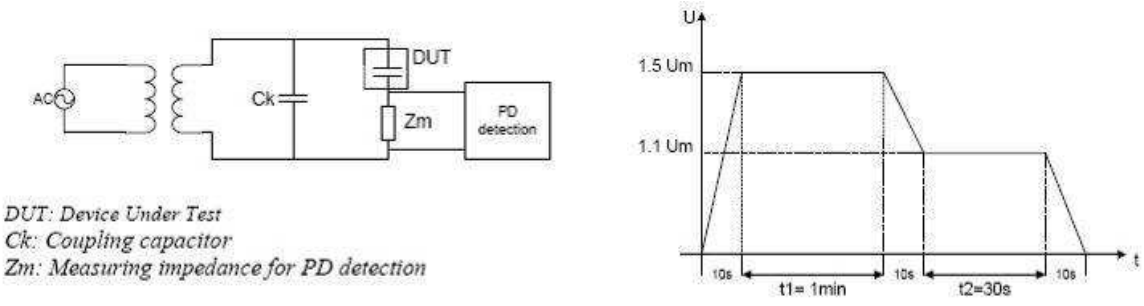


Figure I - 7 : Forme de tension appliquée durant le test de mesure de DP selon la norme IEC 1287

L'application de cette norme par les constructeurs de module est courante. Par exemple EUPEC [31, 32] met en évidence de petites décharges dans la céramique. L'utilisation des substrats d'alumine donne une faible valeur de tension d'apparition de décharges partielles (TADP), et la valeur

des charges varie autour de 200-300pC. Le remplacement des substrats d'alumine par celui d'AlN offre une meilleure TADP. De plus, la norme CEI 1287 est respectée pour leurs substrats d'AlN, la charge associée aux DP étant inférieure à 10pC.

D. Frey *et al* [27, 33] ont étudié sur la base d'une simulation numérique par éléments finis sous Flux 3D et Flux 2D les contraintes que les modules subissaient en terme de champ électrique statique. Les hypothèses de simulation étaient basées sur une géométrie réelle du module IGBT. Les conditions de test se résument à un substrat d'AlN de taille 50x50x0.63mm^3, de permittivité de 8.9 noyé dans du gel silicone de permittivité 2.8. La tension appliquée était de 5kV. Le résultat de ce travail montre un renforcement significatif du champ électrique au bord de la métallisation qui peut donc localement générer des décharges partielles. Des solutions ont été proposées pour diminuer le champ électrique, par exemple en introduisant une couche résistive le long de l'interface constituée de la métallisation, la céramique et le gel silicone. L'arrondissement de la métallisation pour limiter le renforcement du champ fût également une solution envisagée. Celle-ci, en pratique ne peut pas être réalisée en 3D. Les résultats sont similaires à ceux publiés par Fabian *et al* [34] et Mitic *et al* [35]. En 2D, Do [6] avec Quick Field® a mis en évidence les mêmes contraintes. Des mesures de décharges partielles sur des modules IGBT immergés dans du gel silicone ont permis de valider ces résultats sur la base de la localisation des décharges partielles en utilisant un système de détection optique. Les travaux de Fabian *et al* [34, 36] corroborent également ces analyses. Ces études concluent que la première cause de l'apparition des DP est la présence de cavités à l'interface substrat/métallisation/gel.

En utilisant parallèlement les trois méthodes de détection de décharges : électrique, optique et acoustique, Berth [37] a obtenu la même conclusion sur l'observation et la localisation des décharges partielles sur les substrats céramiques d'AlN sous tension alternative 50Hz. Les cavités à l'interface céramique métallisation ou les bulles d'air dans le gel silicone sont la cause principale des décharges. Les décharges qui sont initiées aux bords de la métallisation peuvent dégrader l'isolation dans le volume du gel par propagation de la décharge. Les cavités d'air susceptibles d'être présentes dans le gel silicone lors de sa fabrication constituent une deuxième source de décharges. Cette étude conclut que le bord de la métallisation constitue le point le plus faible du système d'isolation.

Selon Lebey *et al*, les conditions appliquées dans les mesures basées sur les normes IEC 1287 et IEC 60270 ne représentent pas les contraintes réelles que les modules doivent subir dans les conditions de fonctionnement normales. Un nouveau protocole de mesure a été proposé [38, 39]. L'objectif de ce nouveau test est d'appliquer une contrainte à tous les matériaux (substrat céramique, gel silicone…) ainsi qu'à leurs différentes interfaces (silicone gel/composants, silicone gel/ fils de connexion…). Les puces IGBT et des diodes associées doivent être bloquées dans ces essais. La tension appliquée est donc une superposition d'une tension alternative et d'une tension continue. L'influence de la composante continue est négligeable, et le nouveau système de mesure donne une TADP plus faible que celle basées sur la norme IEC 1287 [40].

Dans les études de DO *et al.* [41, 42, 43, 44], le phénomène de décharge partielle sur les substrats d'AlN noyé dans le gel silicone sous tension sinusoïdale et impulsionnelle a été étudié dans un large gamme de température (de 20°C à 150°C). L'activité des décharges partielles dans le gel silicone sous champ électrique très divergent (en configuration pointe-plan) a été également étudiée à l'aide de méthodes de détection optique et électrique. Pour le substrat céramique recouvert de gel, deux régimes de décharges ont été distingués : un régime de décharges réversibles et un régime de décharges irréversibles. L'influence de la température sur l'activité des décharges est faible. En configuration pointe-plan, dans le gel silicone, la probabilité d'apparition de streamers "lents" pendant l'alternance négative est élevée. Par contre, les streamers filamentaires rapides pendant l'alternance positive sont plus nombreux. Le gel silicone a un comportement proche de celui d'un liquide visqueux et possède un pouvoir d'auto-cicatrisation plus faible que celui des liquides.

II. Problématique de l'étude

Comme cela a été mentionné dans l'introduction, cette étude vient à la suite de l'étude réalisée par M. T. Do [6] sur les substrats AlN enrobés de gel silicone. A l'issue de ce travail, un certain nombre d'observations nouvelles avaient été réalisées, en particulier :

- l'observation d'une dégradation rapide du gel (apparition de vacuoles) sous l'influence de décharges électriques, même de très petites amplitudes (quelques pC). Ces cavités deviennent à leur tour siège de décharges partielles ;

- l'observation de deux régimes de décharges partielles sur des substrats de nitrure d'aluminium (AlN) enrobés de gel: un régime « réversible » (stable et reproductible) ne produisant pas de dégradations apparentes, et à plus haute tension un régime de DP produisant très rapidement des dégradations irréversibles.

Comme les auteurs ayant travaillé précédemment sur le sujet, Do a émis l'hypothèse que les DP proviennent de décharges générées dans le gel à l'interface triple céramique / métal / gel où le champ électrique est maximum. Il suppose également que les deux types de DP sont liés aux différents types de « streamers » (phénomènes prédisruptifs) qu'il a observés dans le gel en géométrie pointe-plan :

- DP réversibles liées aux streamers « lents » de très petites tailles, de charge < 10pC ;

- DP irréversibles liées aux streamers rapides positifs filamentaires de grandes amplitudes (> 100pC).

Cependant, cette origine des DP n'est pas clairement établie et se heurte à plusieurs contradictions :

- entre la dégradation rapide du gel observée en géométrie pointe-plan, et la stabilité des DP mesurées sur les substrats;

- entre la forte dissymétrie entre les deux polarités des phénomènes de décharges observées en géométrie pointe-plan, et la symétrie généralement observée avec les substrats.

Par ailleurs, l'étude de la lumière émise par les substrats sous tension a été réalisée dans le but de mettre au point une technique permettant d'évaluer l'activité des DP sous onde non sinusoïdale. A partir de mesures réalisées, Do avait conclu que la lumière pouvait provenir de l'électroluminescence du substrat et des décharges partielles se produisant dans le gel à l'interface triple céramique / métal / gel.

Pour progresser dans ces domaines, d'autres matériaux d'encapsulation et également d'autres types de substrats seront étudiés expérimentalement dans notre étude, dans le but de répondre plus clairement à ces questions:

- origine des DP mesurées sur les substrats enrobés ?

- signification et intérêt d'utiliser une méthode optique pour détecter des décharges partielles sur les substrats?

- conséquences pratiques pour le test de substrats enrobés.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons les résultats de mesures des décharges partielles sur divers substrats enrobés d'un matériau identique, l'huile silicone. Le remplacement du gel par un matériau liquide de composition proche, auto-cicatrisant, permettra de réaliser de nombreuses expériences dans de meilleures conditions de reproductibilité, c'est-à-dire sans avoir à changer périodiquement le gel qui se dégrade. L'objectif sera de comparer les comportements de divers substrats solides pour émettre des hypothèses sur l'origine des décharges mesurées. Le nitrure d'aluminium (AlN), l'alumine (Al_2O_3) et un composite verre-époxy seront étudiés.

Le chapitre suivant sera consacré à l'étude de l'impact de l'environnement (le passivant) sur les substrats. Plusieurs liquides isolants seront d'abord caractérisés en configuration pointe – plan, et ensuite comparés en tant que passivants de substrats. Ces caractérisations permettront de conclure sur l'origine des DP et de formuler des hypothèses plus élaborées sur l'origine de la lumière émise, qui s'avèrera nettement plus complexe que celle envisagée par Do.

Dans ces deux parties, les investigations seront basées sur des mesures de DP, d'émission lumineuse et de visualisation à haute sensibilité.

Dans le chapitre 4, nous tenterons de déterminer si une caractérisation par spectroscopie diélectrique sous haute tension peut également constituer un moyen d'étude permettant d'obtenir des informations sur les décharges partielles sur les substrats enrobés.

Dans les paragraphes qui suivent, nous précisons un certain nombre de notions qui seront utilisées dans la suite de l'étude : phénomènes de décharges partielles, d'électroluminescence, et techniques expérimentales utilisées.

III. Phénomène de décharge partielle

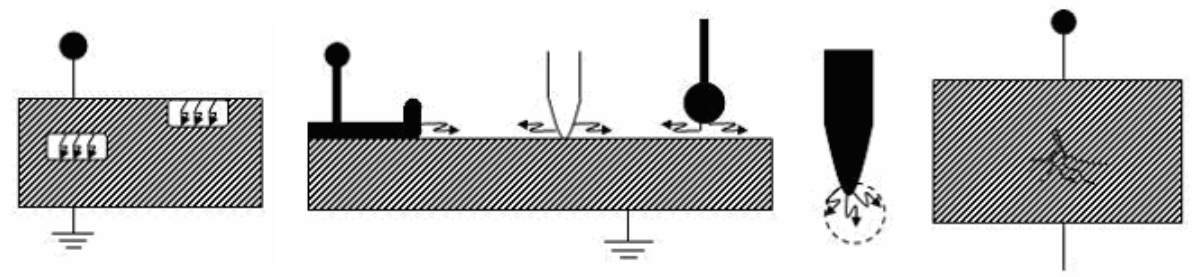
III.1. Définition

Les décharges partielles (DP) apparaissent, en général, sous l'application d'une tension élevée. Elles provoquent la dégradation du matériau et peuvent conduire au claquage de l'isolant ou du diélectrique.

Les décharges partielles (DP) sont des décharges électriques qui apparaissent dans les diélectriques solides, liquides ou gazeux présentant des défauts (cavité, décollement,…) dès qu'une tension suffisante est appliquée. Ces décharges correspondent à une rupture des gaz occlus dans les défauts, et elles sont appelées "partielles" car elles ne court-circuitent pas l'ensemble de l'isolation [29].

III.2. Classification

Plusieurs classes de décharges partielles ont été proposées. Suivant leur localisation, Kreuger [45, 46] a divisé les DP en quatre groupes :



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

Figure I - 8 : Types des décharges partielles : a : interne, b : de surface, c : couronne, d : en arborescence

1. **Décharges internes :** Ces décharges apparaissent à l'intérieur du matériau isolant, aux endroits où la rigidité diélectrique est faible, par exemple dans une cavité dans un solide ou une bulle dans un liquide (Figure I - 8 -a).

2. **Décharges de surface** : elles se manifestent lorsqu'un champ tangentiel important existe à la surface d'un diélectrique (Figure I - 8-b).

3. **Décharges couronnes** : elles prennent naissance au niveau des points où le champ électrique est renforcé. La décharge est restreinte à une zone réduite entourant la pointe (Figure I - 8-c).

4. **Décharges en arborescence** : elles se produisent suite à un défaut dans l'isolant. Une croissance des différentes branches de l'arborescence produira des conditions propices pour l'apparition d'autres DP (Figure I - 8-d).

Dans les modules IGBT, les deux types de décharges observées le plus souvent sont les décharges dans les cavités et les décharges couronnes.

III.3. Récurrence des décharges partielles.

III.3.1. Décharges internes

Le comportement des décharges internes peut être présenté par le circuit équivalent composé de 3 condensateurs notés a, b et c (Figure I - 9).

- c : la capacité de la cavité, qui est en parallèle avec un éclateur. Lorsque la tension de claquage de la cavité est atteinte, l'éclateur se met en court-circuit.
- b : la capacité du diélectrique sans DP en série avec la cavité.
- a : la capacité équivalente de l'isolant en parallèle avec a et b. Cette capacité correspond à la partie saine de l'isolant.
- V_a : la tension appliquée aux bornes du diélectrique.
- V_c : la tension aux bornes de la cavité.

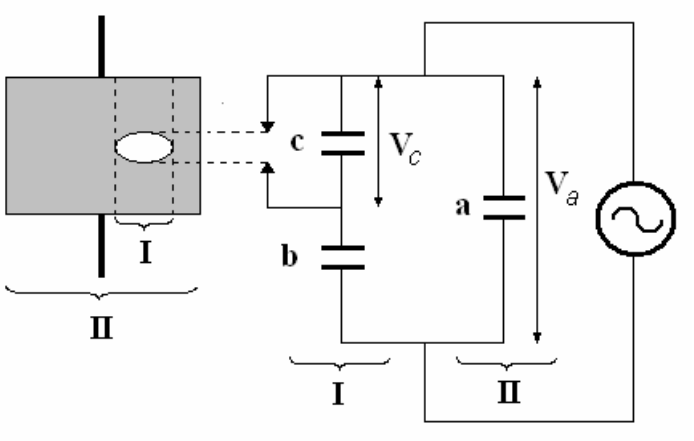


Figure I - 9 : Modèle classique des capacités équivalentes d'un diélectrique avec une cavité interne [47]

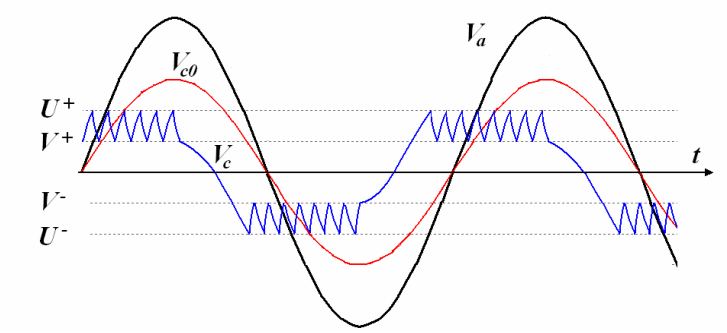


Figure I - 10 : Récurrence des DP dans une cavité [47]

Dans l'hypothèse où il n'y a pas de claquage dans le condensateur c, si une tension alternative V_a est appliquée sur le diélectrique, une tension V_{c0} apparaît à travers la cavité.

$$V_{c0} = \frac{b}{c+b} V_a \qquad \textbf{(Eq. I - 1)}$$

Lorsque la tension dans la cavité (V_c) dépasse une certaine valeur critique U^+ (tension d'ignition), une décharge partielle apparaît. V_c chute à une valeur d'extinction V^+ et la décharge disparaît. Cette chute de tension se produit sur une durée très courte (quelque nano-secondes) par rapport à la période de la tension sinusoïdale appliquée (50Hz). Ensuite, la tension aux bornes de la cavité augmente à nouveau, et s'effondre lorsque la valeur U^+ est atteinte, une nouvelle décharge se produit. Ce phénomène perdure jusqu'à ce que la tension appliquée V_a n'augmente plus (phase φ=90°). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative (arrêt des décharges à 270°) avec des seuils d'apparition et d'extinction de décharges à U^- et V^-. Ces décharges dans la cavité produisent des impulsions de courant rapides (quelque nano-secondes) dans l'échantillon et le circuit externe (Figure I - 10).

Le courbe de Paschen [48] permet de déterminer la tension d'apparition des décharges dans une cavité en fonction du produit pression du gaz occlus dans la cavité - distance inter-électrodes.

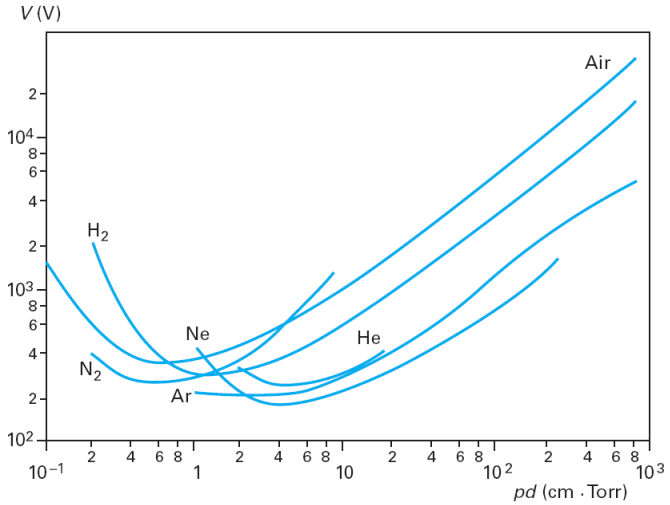
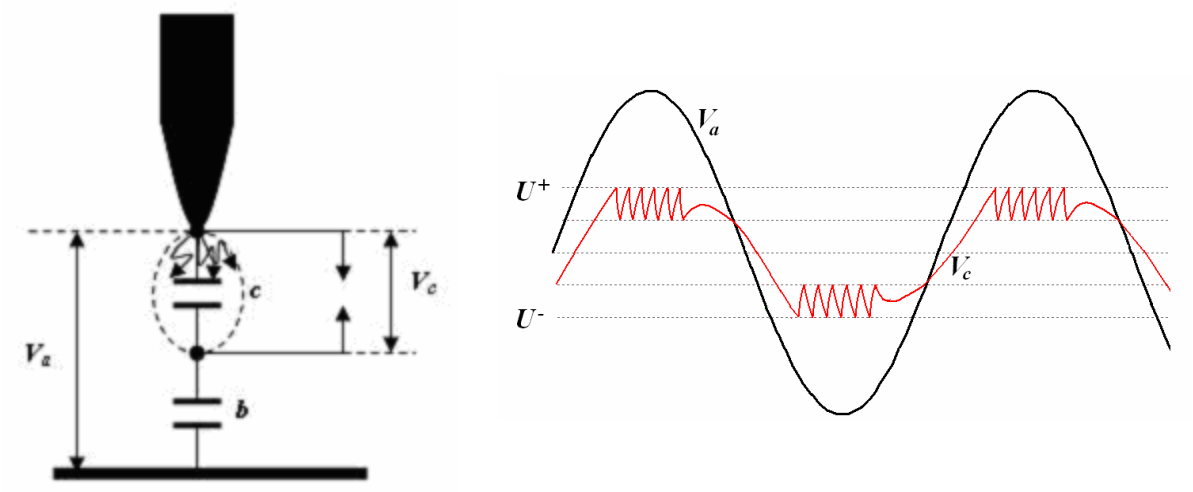


Figure I - 11 : Courbe de Paschen pour quelques gaz simples [48]

III.3.2. Décharges couronnes

En configuration pointe-plan des décharges de types couronnes peuvent se produire. Leurs signatures diffèrent de celles dans les cavités. Le circuit équivalent d'une décharge couronne est présenté par la Figure I - 12-a. Lorsque la tension appliquée V_a dépasse une certaine valeur critique U^+ (seuil d'apparition des décharges), l'ionisation se produit et le phénomène de décharge couronne se manifeste. Ceci se répète jusqu'à ce que la tension appliquée V_a deviennent inférieure au seuil de décharge V^+ (Figure I - 12-b). Le même phénomène se produit pendant l'alternance négative. Les distributions de décharges sont centrées sur 90° et 270° pendant une alternance.



(a) (b)

Figure I - 12 : Circuit équivalent et récurrence des décharges couronnes [47]

III.4. Technique de détection et de mesure des décharges partielles

III.4.1. Détection par mesure électrique

La charge apparente présente lors d'une DP peut être mesurée de différentes manières. Plusieurs travaux ont été publiés sur le sujet. Le lecteur pourra par exemple prendre connaissance de la technique reportée par Kreuger [45].

III.4.1.1. Charge transférée et charge apparente

Lorsqu'une décharge se produit dans le matériau, une quantité de ***charge transférée*** Δq_i dans la cavité (ou dans le cas de décharge de surface, la charge transfère le long de la surface) est en considérant le modèle ***abc*** :

$$\Delta q_i = (c + \frac{ab}{a+b})\Delta V_C \;\; avec\, \Delta V_C = (U^+ - V^+) \qquad \textbf{(Eq. I - 2)}$$

En l'absence de DP, $\Delta q_i = 0 \ \ puisque \ \Delta V_C = 0$

où ***a***, ***b***, ***c***, $\boldsymbol{U^+}$, $\boldsymbol{V^+}$ sont montrés par les Figure I - 9. Si les dimensions de la cellule est grande par rapport la cavité, nous avons b<<a et ***la charge transférée*** est :

$$\Delta q_i = (b + c)(U^+ - V^+) \qquad \textbf{(Eq. I - 3)}$$

La ***charge Δq_i transférée*** dans la cavité est un bon indicateur pour évaluer les DP et donc l'image de la dégradation du matériau. Aucune technique de détection ne permet de mesurer cette valeur. Par contre, la charge qui se déplace aux bornes de l'échantillon (appelé ***charge apparente Δq***) peut être mesurée.

La tension aux bornes de l'échantillon est égale à :

$$V_a = \frac{b}{a+b}\Delta V_C \qquad \textbf{(Eq. I - 4)}$$

Lorsqu'une décharge se produit, le condensateur ***c*** est court-circuité, donc la charge apparente ***Δq*** dans le circuit extérieur est :

$$\Delta q = (a + b).V_a \qquad \textbf{(Eq. I - 5)}$$

En introduisant (Eq. I – 4) dans (Eq. I – 5) on obtient :

$$\Delta q = b(U^+ - V^+) \qquad \textbf{(Eq. I - 6)}$$

A partir de (Eq. I – 3) et de (Eq. I – 6), nous déduisons la charge apparente Δq à partir de la charge réelle Δq_i

$$\Delta q = \frac{b}{b+c}\Delta q_i \qquad \textbf{(Eq. I - 7)}$$

Dans l'approximation du modèle **abc**, la charge réelle est sous estimée lors de la mesure de la charge apparente. Dans [45], il a été montré que l'énergie (W) dissipée par une décharge est proportionnelle à la charge apparente Δq. Pour cette raison, la charge apparente est considérée comme une mesure relativement fiable de l'amplitude de la décharge.

III.4.1.2. Principes de détection des décharges partielles

Le montage de mesure élémentaire est représenté à la Figure I - 13. Les éléments du montage sont :

- Une source haute tension sans décharge ***V***.
- L'échantillon à caractériser $\boldsymbol{C_e}$.
- Une impédance de mesure ***Z***.

- Un condensateur de couplage ***K***.
- Un amplificateur ***A***.
- Une unité d'observation ***O***

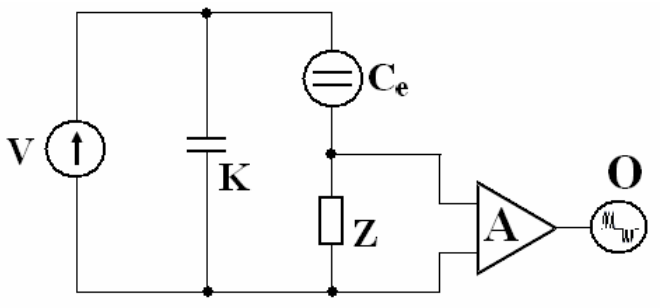


Figure I - 13 : Schéma de principe d'un système de détection élémentaire

La cellule de mesure (C_e) est connectée en série avec une impédance de mesure ***Z.*** Le condensateur de couplage *K* est un élément important du circuit. C'est un condensateur haute tension exempt de décharges qui fournit la tension de manière transitoire à la cellule en test lors des DP qui typiquement durent quelques ns. Son inductance parasite doit être nécessairement très faible et sa capacité importante. Lorsqu'une décharge se produit, un courant transitoire de quelque ns circule dans le circuit extérieur, qui correspond à une quantité de charge appelée charge apparente. Cette impulsion peut être mesurée à l'aide de l'impédance de mesure *Z*, souvent composée par un circuit RLC parallèle. 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.

III.4.2. Détection de décharges partielles par méthodes non électriques

Parallèlement à la détection électrique de décharges partielles, d'autres méthodes non électriques peuvent être utilisées pour détecter les DP. Ces méthodes reposent sur la détection de phénomènes physico-chimiques qui apparaissent lors de l'apparition des DP. Elles sont peu utilisées en raison de leur mauvaise sensibilité (excepté les mesures de lumière) ; de plus l'amplitude des décharges n'est pas mesurable. Ces méthodes sont basées sur :

- La mesure des variations de pression de gaz en présence de DP
- La mesure des variations de température
- La mesure des ondes électromagnétiques générées par les DP à l'aide d'une antenne.

- La détection acoustique [49] : Les DP dans l'air, comme la décharge de surface et la décharge couronne produisent souvent des ondes acoustiques (sonores et ultrasonores) perceptibles au voisinage de l'endroit où il y a la décharge. La détection acoustique permet de localiser la décharge et de mesurer également son énergie qui est proportionnelle au carré de l'intensité des signaux captés. Par contre, l'amplitude de décharges ne peut pas être mesurée, et la sensibilité de cette méthode ne permet de détecter que des grandes décharges (supérieure à 100pC) [45].

- La détection optique [45, 50] : Cette méthode de détection n'est applicable que pour les décharges près de la surface ou les décharges couronne. La lumière émise due à la décharge se situe généralement dans le domaine UV-visible. Si le milieu est transparent, la localisation des décharges est possible à l'aide d'une caméra ultra-sensible. Dans certains cas, l'intensité de la lumière émise mesurée avec un photo-multiplicateur est proportionnelle à l'amplitude de la décharge.

Dans notre étude, la détection et la mesure des DP est réalisée par voie électrique et optique.

IV. Phénomènes d'électroluminescence

Une DP s'accompagne toujours d'un phénomène lumineux. Cependant, il existe des matériaux électroluminescents pour lesquels de la lumière est induite sous contrainte électrique avant que le seuil de tension où les DP apparaissent soit atteint. Ce phénomène sera observé dans nos mesures, principalement dans l'AlN, et dans quelques liquides. Nous donnons ici quelques principes généraux sur l'électroluminescence.

IV.1. Définition

L'électroluminescence est un phénomène électro-optique durant lequel un matériau émet de la lumière en réponse à un courant électrique qui le traverse, ou à un fort champ électrique à ses bornes. Ce phénomène ne concerne pas l'émission de lumière stimulée par la température (thermoluminescence) ou de l'action de réactions chimiques (chimiluminescence) [51].

IV.2. Mécanisme du phénomène d'électroluminescence

L'électroluminescence est le résultat de la recombinaison radiative des électrons et des trous dans un matériau [51]. Il est admis que les quatre étapes suivantes interviennent successivement lors du phénomène d'électroluminescence (Figure I - 14) :

- Injection d'électrons et de trous respectivement à la cathode et à l'anode. Les charges doivent franchir ou traverser une barrière énergétique pour pénétrer dans le matériau. Les électrons excités libèrent leur énergie sous forme de photons. Deux mécanismes principaux rendent compte de l'injection de charges sous champ électrique dans les matériaux organiques : l'***injection***

thermoïonique (lorsque la barrière énergétique est petite) et l'***effet tunnel*** (lorsque la barrière énergétique est haute mais étroite).

- Transport des charges dans le matériau sous forme d'espèces chargées : après passage au travers de la barrière constituée par l'interface électrode/matériau organique, les charges (***polarons*** p^+ et p^-) se déplacent sous l'action du champ électrique.

- Recombinaison des porteurs de charge opposée et formation de l'exciton.

- Désactivation de l'exciton par voie radiative si l'état initial est un état moléculaire singulet (S), sinon par un chemin non radiatif dans le cas d'un état triplet (T).

Dans les matériaux électroluminescents, la lumière émise est proportionnelle à la densité de courant (du moins aux faibles tensions).

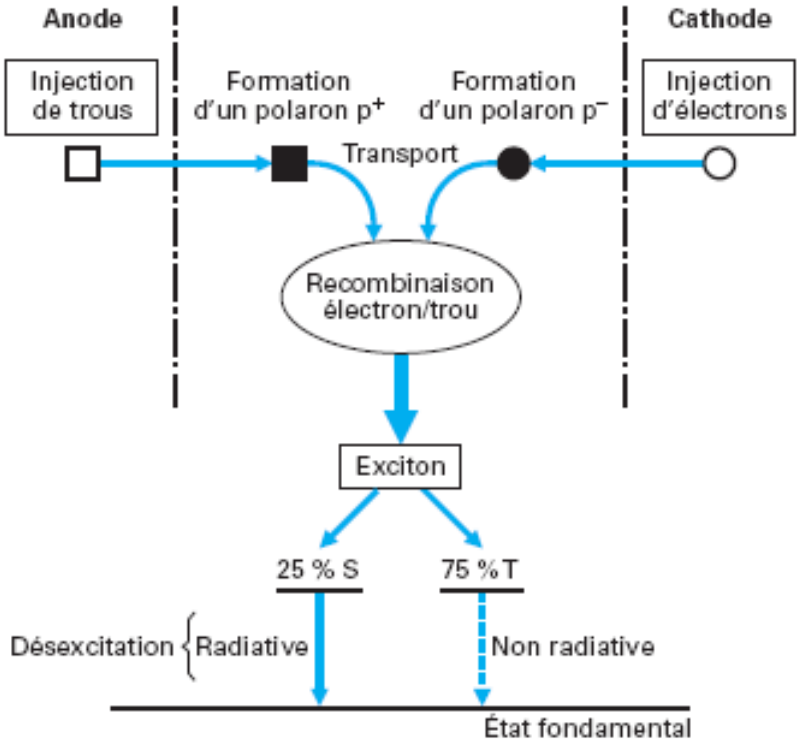


Figure I - 14 : Différentes étapes du processus d'électroluminescence [51]

IV.3. Matériaux électroluminescents

D'une manière générale, les matériaux électroluminescents sont divisés en deux groupes : les matériaux de faible masse molaire et les matériaux polymères [52].

En France, Laurent *et al* ont réalisé de nombreuses études sur l'électroluminescence de matériaux polymères en couche mince durant ces 20 dernières années [53, 54, 55]. Ils considèrent l'électroluminescence des matériaux polymères isolants comme indicateurs du vieillissement.

Le nitrure d'aluminium qui est utilisé dans les modules IGBT est une céramique semi-conductrice. Sa bande interdite de 6eV est large. Ce matériau est également utilisé pour fabriquer des diodes électroluminescentes. L'électroluminescence de la poudre d'AlN a été observée dans la gamme de fréquence du visible (400-700nm) [56] mais également dans l'UV (200-500nm) [57] à faible tension. En continu, l'électroluminescence de l'AlN est localisée près de la cathode ; elle diminue au cours du temps. Sous tension alternative, l'intensité instantanée de l'électroluminescence est en phase avec la tension. Son évolution dans le temps n'est pas sinusoïdale en raison du caractère non ohmique du cristal. La lumière émise sous polarisation négative est toujours plus intense que celle obtenue sous polarisation positive [56].

Dans les liquides, des études sur l'électroluminescence ont été réalisés dans le domaine très particulier des cristaux liquides, mais très peu d'études systématiques ont été consacrées au cas des liquides isolants tels que les hydrocarbures. Ce phénomène a été mentionné dans un certain nombre de liquides comme l'huile minérale de transformateur ou les hydrocarbures en présence de composés aromatiques comme l'anthracène [58], mais aucune étude détaillée consacrée à ce sujet n'a été publiée.

V. Techniques expérimentales

V.1. Matériaux diélectriques utilisés

V.1.1. Substrats

Dans notre étude nous avons utilisé des substrats de nitrure d'aluminium (AlN) d'alumine (Al_2O_3) et en verre-époxy (circuit imprimé). Les substrats d'AlN et d'Al_2O_3 ont été fournis par Stellar Industrie [59]. Ils sont fabriqués sous forme de plaques de taille 50x50x0.63mm^3. Les deux surfaces du substrat sont métallisées par une couche de cuivre de 48x48x0.3mm^3. Les données techniques de ces céramiques sont données dans le Tableau I - 2**.**

Matériaux	Constant diélectrique	Tan δ	CTE (ppm/°C)	Conductivité thermique (W/m°K)	Densité (gm/cm^3)
AlN	8.8 (à 1GHz)	5.10^{-4} (à 1GHz)	4.6	170	3.28
Al_2O_3	9.0 (à 1MHz)	2.10^{-4} (à 1MHz)	8.2	24	3.72
Epoxy	4.8 (à 1MHz)	0.032 (à 1MHz)	10 (axis X) 13 (axis Y)	-	1.94

Tableau I - 2 : Données techniques (fournisseur) des matériaux céramiques utilisés

Afin d'éviter les claquages par contournement, la surface de l'électrode côté haute tension est réduite (par gravure au perchlorure de fer) à une dimension plus petite (30x30mm^2) que celle de l'électrode basse tension. Dans certains cas, l'électrode haute tension peut être gravée pour obtenir une surface en forme de « peigne ». La forme en peigne permet d'augmenter le chemin sur lequel le champ électrique est appliqué et donc d'augmenter la probabilité de détecter de la lumière issue du substrat.

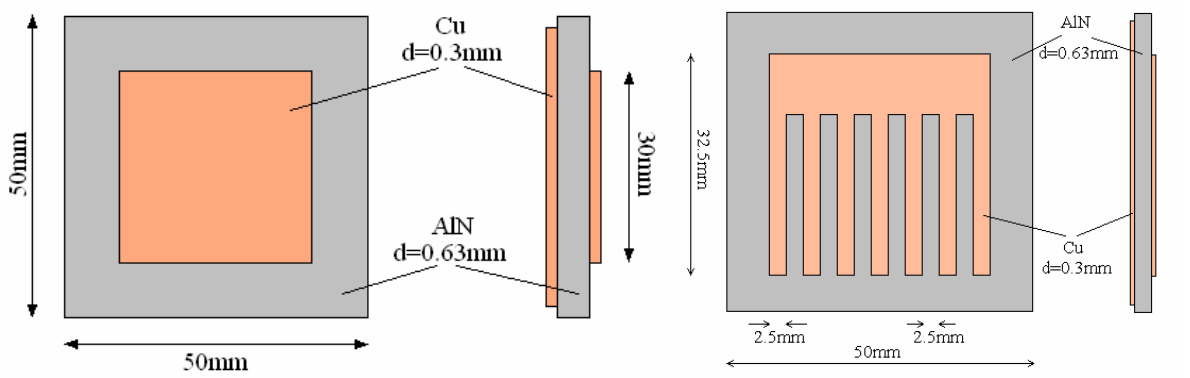


Figure I - 15 : Substrat avec des électrodes de forme carré et en peigne

V.1.2. Passivants

Le gel silicone employé dans cette étude est le SYLGARD 527 [60], fourni par Dow Corning®. Le SYLGARD 527 est du polydiméthylsiloxane de type RTV-2 (Room Temperature Vulcanizable). Avant sa synthèse, il se présente sous forme de bi-composants. Pour fabriquer le gel silicone utilisable dans nos études, ces deux composants sont mélangés dans un rapport 50-50% en volume et polymérisés 4h à 65°C selon les spécifications du fabricant.

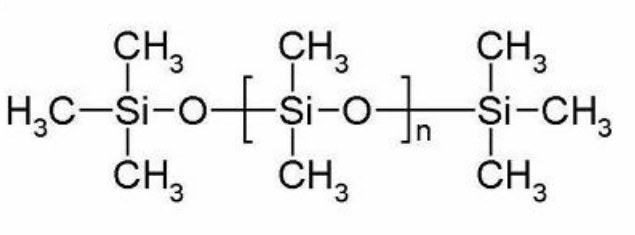


Figure I - 16 : Molécule de Polydiméthylsiloxanne

L'huile silicone Rhodorsil 47V350 a été utilisée comme passivant liquide de référence dans les mesures de décharges sur les substrats céramiques. Cette huile a également fait l'objet d'une caractérisation en spectroscopie diélectrique. L'huile silicone Rhodorsil 47V20 [61] de plus faible viscosité (20mm^2.s^{-1}) que la 47V350 (350 mm^2.s^{-1}) a été utilisée pour étudier l'influence du processus de conditionnement sur l'activité des décharges partielles. Le monomère de ces deux huiles est le poly (diméthyl siloxane).

D'autres huiles silicones de natures différentes ont également servi de moyens d'investigations pour étudier le comportement des substrats céramiques :

✓ l'huile silicone de Bayer® Baysilone PD5 synthétisé autour d'une molécule de phényl-méthyl-polysiloxane [62]

✓ l'huile silicone Rhodia D5, de viscosité $5mm^2.s^{-1}$ pour les études à basses températures entre -60°C et 0°C.

✓ le Jarylec® C101 qui est utilisé couramment pour l'imprégnation des condensateurs haute tension [63]. Le Jarylec ® C est constitué d'un mélange de benzylate-toluène et de di-benzylate-toluène liquides. Ce liquide est caractérisé par une très bonne tenue aux champs très élevés (plusieurs MV/cm) présents sur les bords d'armature de condensateurs au polypropylène, à 50Hz.

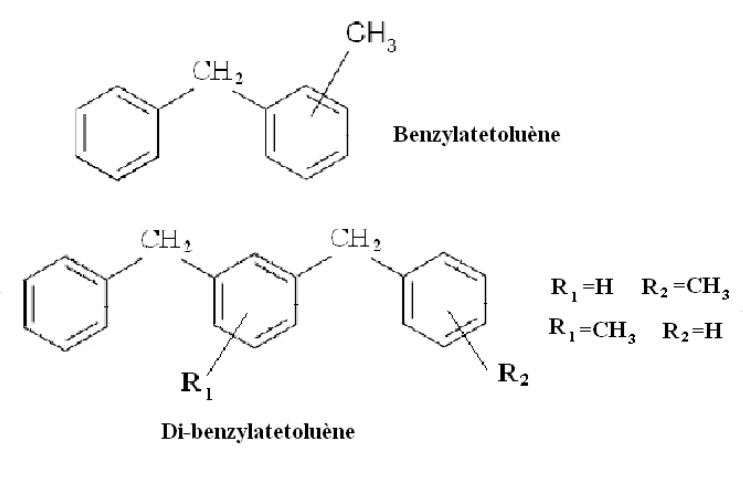


Figure I - 17 : Les composantes chimiques dans le Jarylec®C101 : benzylate-toluène et di-benzylate-toluène

✓ l'Ugilec ® T de la société Atochem [64], utilisé dans les transformateurs et pour l'imprégnation des condensateurs haute tension. Ce produit est composé d'un mélange de 40% de tricloro-benzène et de 60% de tétra-chloro-benzyltoluène. Par rapport aux autres liquides testés, celui-ci présente une permittivité sensiblement plus élevée. Elle est de 5,1.

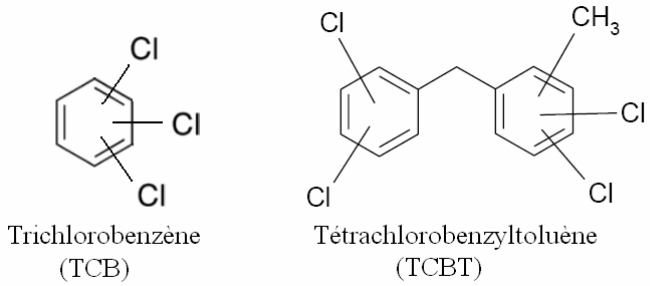


Figure I - 18 : Les composantes chimiques dans l'Ugilec

✓ L'huile minérale de transformateur Univolt 54 d'Exxon utilisée dans les transformateurs, les disjoncteurs et autres dispositifs électriques dans lesquels l'huile a deux fonctions : l'amélioration de l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur.

✓ L'huile de colza composée de 50% de triglycérides de colza oléique et de 50% d'ester éthyl-hexanolique de colza oléique. Cette huile biodégradable d'origine agricole spécialement formulée pour les applications électriques fait l'objet actuellement de nombreuses études, et trouve des applications dans le domaine des transformateurs moyennes tensions. Comme les huiles silicones, elle est caractérisée par une très bonne tenue à haute température (point de feu : 350°C).

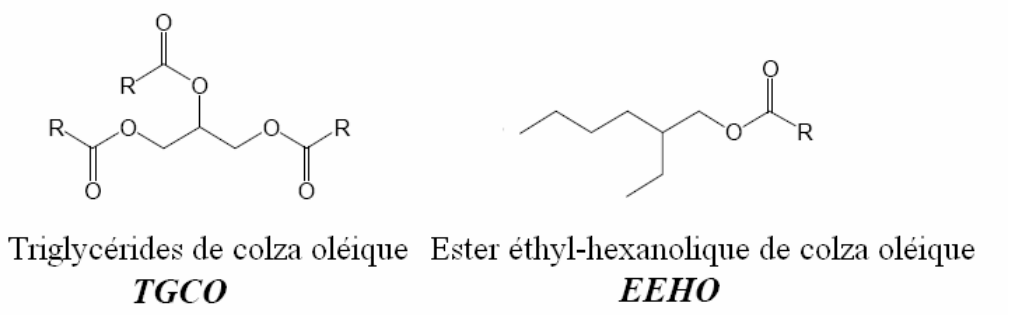


Figure I - 19 : Les composantes chimiques dans l'huile de colza

Les donnés techniques des liquides sont données dans le Tableau I - 3.

Matériaux	Viscosité (mm^2s^{-1})	Champ de claquage (kV/mm)	Constante diélectrique (à 100kHz)	Résistivité volumique (Ω.cm)	Perte diélectrique (à 100kHz)
Sylgard 527[60]	430	15	2.85	3.10^{15}	10^{-4}
Rhodorsil [61] 47V350/ 47V20	350 20	16	2.8	10^{15}	10^{-4}
Rhodia D5					
Baysilone PD5 [62]	5	22	2.5		0.0005
Jarylec C101 [63]	6.5	>35	3.66	$>10^{14}$	<0.004
Univolt 54	15	25	2.2		0.004
Ugilec T [64]	11	>25	5.1		<0.03
Huile de colza	17	46.9	2.82	$1,2.10^{10}$	0.0152

Tableau I - 3 : Principales caractéristiques des passivant utilisés

V.2. Cellules de mesure

V.2.1. Cellule de mesure des décharges partielles sur les substrats

La structure de la cellule de mesure des décharges partielles sur les substrats céramiques est donnée sur la Figure I - 20.

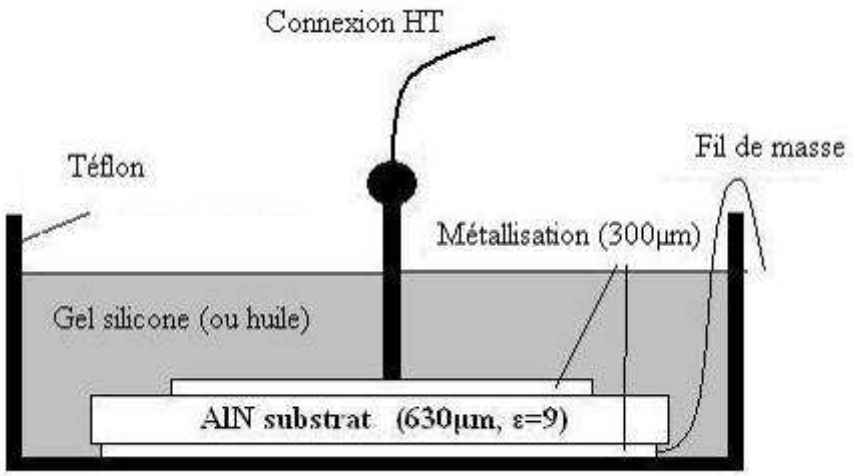


Figure I - 20 : Cellule de mesure des décharges partielles avec le substrat

L'échantillon testé est fixé sur une plaque de laiton dans un moule cylindrique en téflon. L'échantillon est gravé (selon les spécificités données dans V.1.1). Tout l'ensemble est noyé dans un passivant liquide ou du gel.

Pour assurer un bon contact avec le passivant, la surface du substrat est nettoyée avec de l'acétone et de l'alcool afin d'enlever les graisses et les contaminants. Ensuite, le passivant est versé dans le moule pour recouvrir la totalité de la surface de l'échantillon. La cellule de mesure est mise sous vide (10^{-2}mBar) pendant au moins 1h afin de retirer les bulles d'air formées pendant le remplissage. Le gel est synthétisé en mélangeant la résine de base et l'agent de réticulation en proportion égale. Après remplissage du moule et dégazage sous vide (10^{-2}mBar), le gel est polymérisé à pression atmosphérique. Le temps de polymérisation choisi est de 4 heures à 65°C selon les recommandations du fabricant.

V.2.2. Cellule de mesure des décharges partielles en géométrie pointe-plan

Pour étudier l'activité des décharges partielles dans les liquides et le gel indépendamment du substrat des mesures en géométrie pointe-plan sont nécessaires (Figure I - 21).

La cellule de mesure pointe-plan est composée d'un corps de section carrée en acier. L'électrode plane est une plaque de laiton, relié à la masse. La pointe est fixée sur une sphère en laiton maintenue par un support de téflon. La distance inter-électrodes est réglable entre 3 et 15mm. Les pointes utilisées ont un diamètre de 0,8 mm, l'angle au sommet est de 30° et le rayon de courbure de 5µm. La procédure pour remplir la cellule est similaire à celle présentée dans la partie V.2.1.

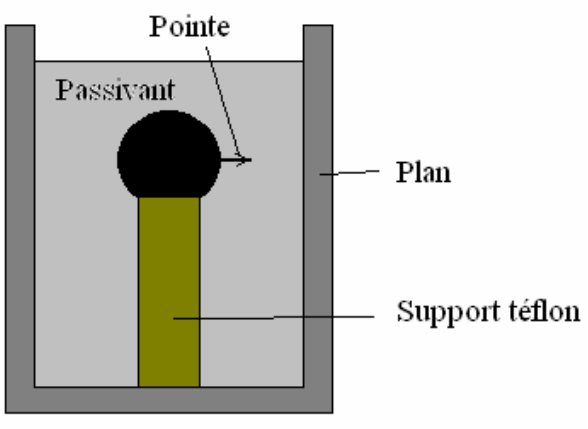


Figure I - 21 : Cellule de mesure en configuration pointe – plan

V.3. Sources d'alimentation haute tension

La source d'alimentation sinusoïdale Figure I - 22 se compose d'un générateur basse fréquence, d'un amplificateur de puissance (100W) et d'un transformateur 20V/20kV. Au-delà de 12 kV le transformateur génère des décharges partielles. Pour des PDIV supérieur à 10kV, nous utilisons un transformateur 100kV.

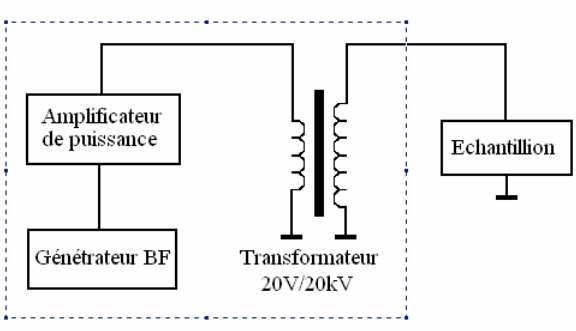


Figure I - 22 : Source de tension sinusoïdale

L'alimentation impulsionnelle haute tension (Figure I - 23) est construite autour d'un commutateur haute tension de type "push-pull" 60kV à semi-conducteur alimenté par une alimentation continue. Le temps de montée et de descente de l'impulsion aux bornes de l'échantillon peuvent être modifiés en insérant une résistance en série avec l'échantillon. Une tension continue peut également être superposée aux impulsions. Une capacité de découplage de 20nF en série avec l'alimentation impulsionnelle empêche la mise en parallèle directe des sources de tension.

Quelques caractéristiques de l'alimentation impulsionnelle sont décrites ci-dessous :

- Temps minimum de montée : 600ns.
- Fréquence de répétition de 0 - 10kHz.

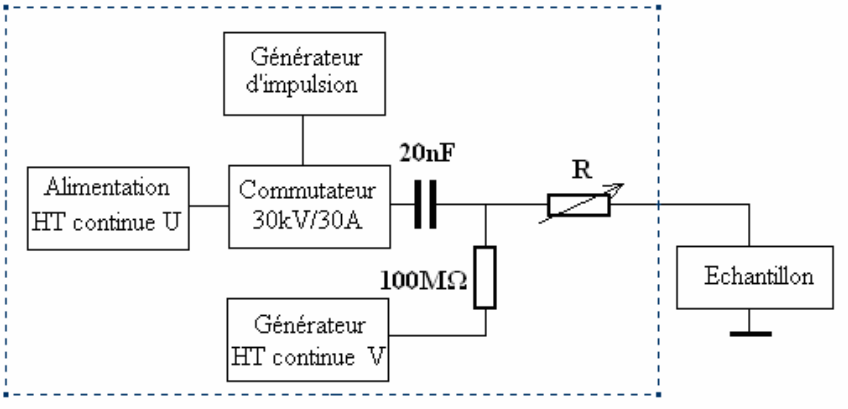


Figure I - 23 : Source de tension impulsionnelle avec ou sans composante continue

V.4. Mesure des décharges partielles

L'ensemble du système de mesure des DP est composé essentiellement de 4 parties (Figure I - 24) :

- Les sources d'alimentation alternative sinusoïdale ou impulsionnelle.
- La cellule de mesure.
- Le système de détection et de mesure électrique de DP.
- Le système de visualisation (caméra) de la lumière émise par les décharges et de mesure de l'intensité lumineuse (PM).

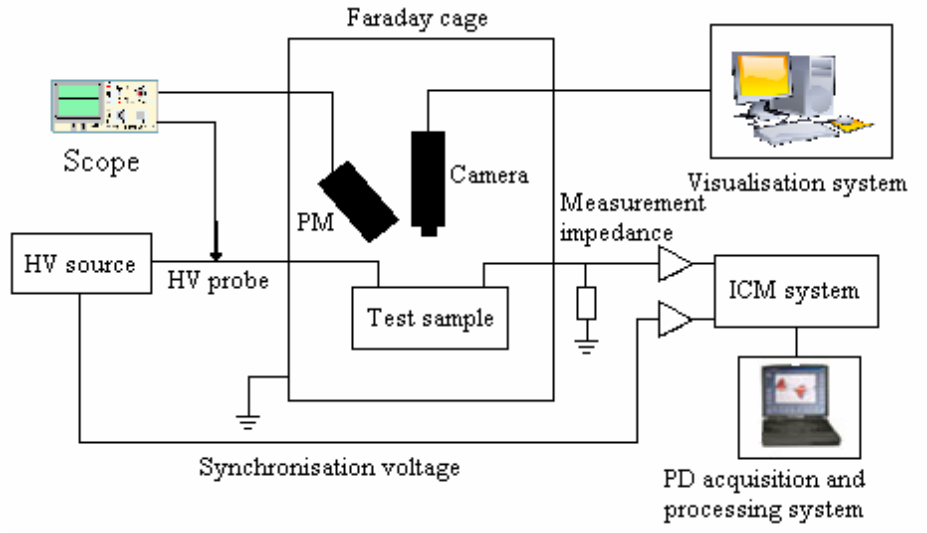


Figure I - 24 : Dispositif de mesure de décharges partielles.

L'ensemble du dispositif est placé dans une cage de Faraday totalement opaque à la lumière extérieure. Cette précaution est essentielle pour limiter les perturbations électromagnétiques et optiques extérieures, et obtenir un bruit de fond électrique et optique très faible. Pour les mesures de décharges partielles à basse température (jusqu'à -60°C), une enceinte climatique (Vöstch) a été utilisée en remplacement de la cage de Faraday. Seules les mesures de DP en alternatif ont pu être réalisées dans ce cas.

V.4.1. Système de détection électrique

Le système de détection et de mesures des décharges partielles est basé sur la mesure des impulsions de courants générées par les décharges. Quand une décharge se produit, une quantité de charges se déplace entre les électrodes (charge réelle). Ce mouvement de charges induit une baisse de tension aux bornes de l'échantillon. Cette baisse de tension est compensée par la circulation d'une charge dans le circuit externe à la cellule, appelée charge apparente. Elle est inférieure à la charge réelle qui ne peut pas être mesurée directement.

La détection des impulsions de charge apparente est basée sur l'utilisation d'un filtre RLC passe-haut. Il permet la détection d'impulsions rapides produites par les DP. Le courant capacitif 50Hz est fortement atténué. Le signal est ensuite injecté à l'entrée d'un amplificateur faible distorsion, à gain variable et à faible bruit, de bande passante 800kHz.

L'acquisition des signaux de décharges est réalisée à l'aide du système ***ICM system*** de la société Power Diagnostix Systems. Ce logiciel contient toutes les fonctions nécessaires pour commander l'instrument, éditer les paramètres d'installation pour acquérir des données et pour visualiser les résultats. Un exemple de distribution de charges résolue dans la phase est présenté sur la Figure I - 25.

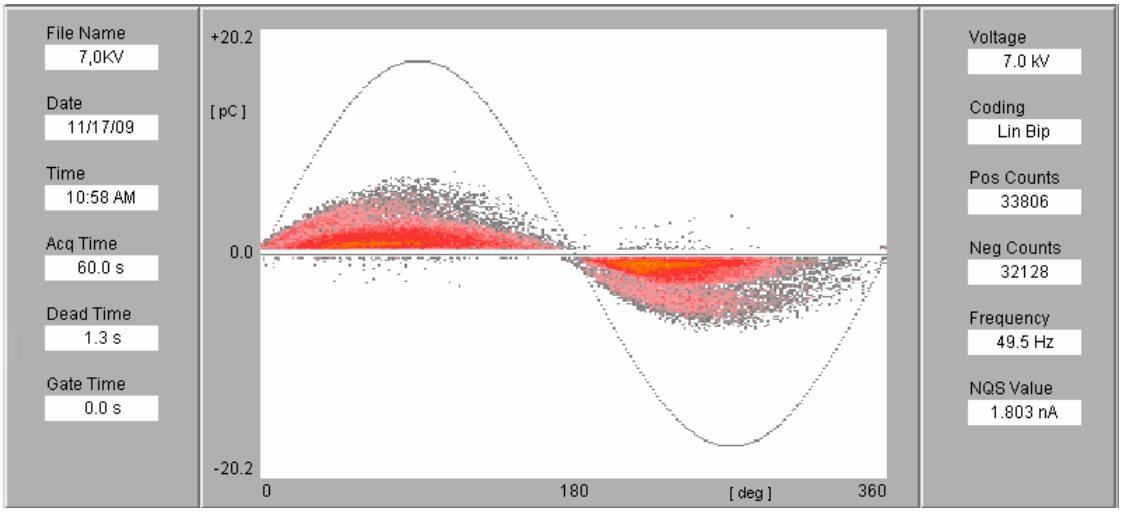


Figure I - 25 : Exemple de distribution des décharges mesurée par le système ICM

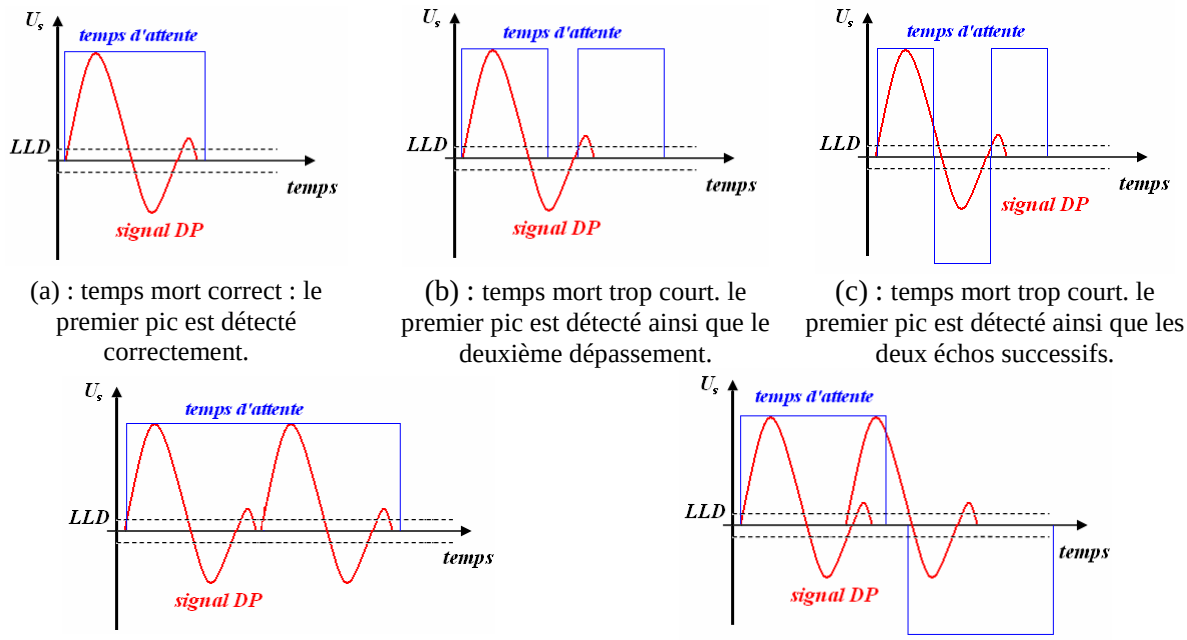
L'acquisition des mesures a été généralement faite sur 60s. Ce système de mesure permet de compter le nombre des charges positives et négatives et de calculer la valeur moyenne du courant généré par les décharges partielles. Le nombre de décharges est d'autant plus important que la couleur tend vers le rouge puis l'orange.

La sensibilité du système de détection est optimisée avec l'ajustement des paramètres suivants :

- **Les gains des deux amplificateurs** sont augmentés ou diminués en fonction de l'amplitude des décharges.

- **Le seuil de déclenchement de l'acquisition** (LLD : *low level discriminator*) est le seuil minimum à partir duquel l'acquisition débute.

- **Le temps d'attente (***dead time*). Si le seuil LLD est dépassé, une impulsion électrique est considérée comme étant une décharge. Le système stoppe l'acquisition pendant le temps mort pour traiter et enregistrer la DP. Pour éviter les erreurs de mesure, les deux paramètres doivent êtres réglés de façon cohérente l'un par rapport à l'autre. Pour de faibles décharges, le LLD doit être réglé juste au dessus du bruit de fond. Pour de grandes décharges, le seuil est réglé plus haut pour éviter la saturation du système, par contre les décharges de faibles amplitudes ne sont plus enregistrées. A un LLD donné, un temps d'attente trop court provoque l'enregistrement d'un signal parasite dû à l'oscillation de l'impédance RLC, tandis qu'un temps d'attente trop long entraîne une perte d'information. La Figure I - 26 montre quelques études de cas susceptibles d'apparaître expérimentalement.



(a) : temps mort correct : le premier pic est détecté correctement.

(b) : temps mort trop court. le premier pic est détecté ainsi que le deuxième dépassement.

(c) : temps mort trop court. le premier pic est détecté ainsi que les deux échos successifs.

(d) : temps mort trop long. La deuxième DP n'est pas détectée.

(e) : temps mort correct. le premier pic est détecté ainsi que l'écho de la 2ième DP. Une erreur sur l'amplitude de la 2ième DP apparaît. Son signe est erroné et son amplitude sous-estimée.

Figure I - 26 : Exemples d'acquisition de DP en fonction du choix du LLD et du temps d'attente

La mesure de DP est une mesure relative, qui dépend des valeurs des grandeurs électriques des composants du circuit. Avant chaque acquisition, une calibration de la mesure des décharges doit être réalisée en injectant aux bornes de la cellule d'étude une charge connue (1, 5, 10, 20, 50, ou 100pC, en fonction de la plage des valeurs attendues) délivrée par une unité de calibration (CAL1A).

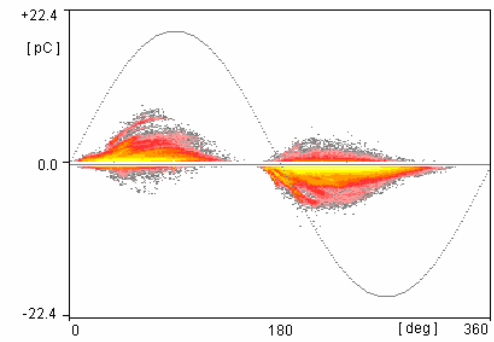


Figure I - 27 : Exemple d'acquisition de DPs quand la fréquence élevée de l'apparition des décharges produit des artefacts de mesure. Echantillon AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 à 7kV$_{eff}$.

V.5. Systèmes de détection optique

Les systèmes de détection et de mesure optique se composent d'une caméra à forte sensibilité et d'un photomultiplicateur, placés dans la cage de Faraday hermétique à la lumière extérieure (Figure I - 28).

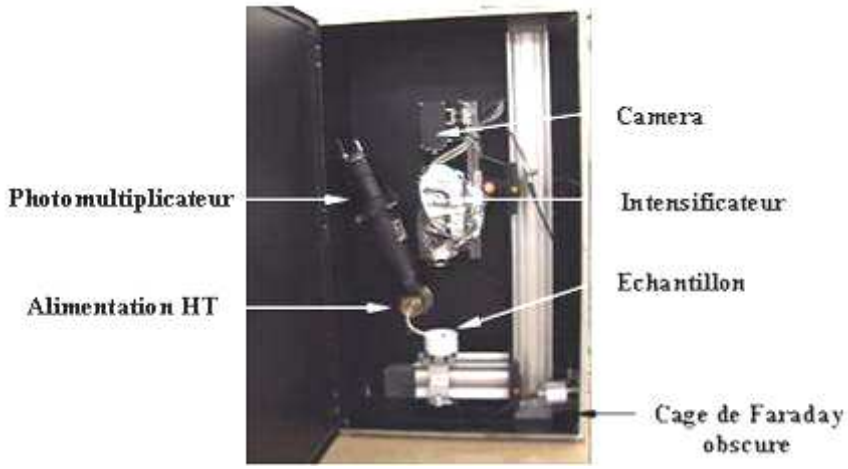
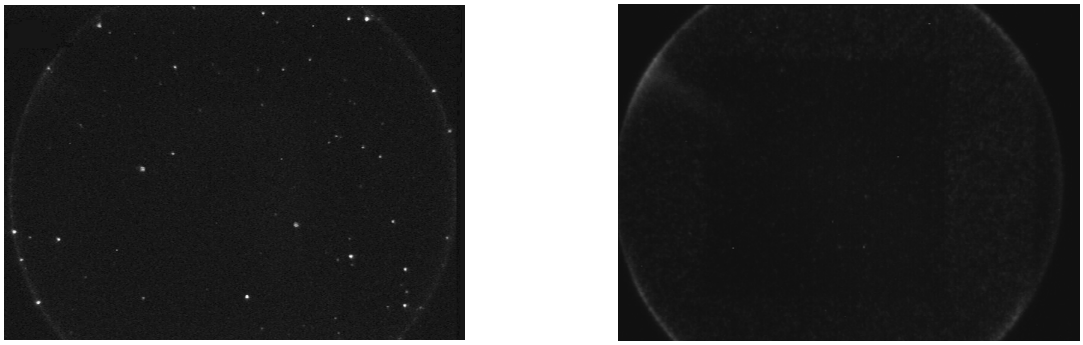


Figure I - 28 : Dispositifs de mesure optique

V.5.1. Caméra haute sensibilité

Le système de visualisation est constitué d'une caméra CCD en série avec deux intensificateurs d'images de type Thomson TH9304. La caméra est munie d'un objectif de grande ouverture (f=1,4). L'émission de lumière étant souvent de très faible intensité, la caméra est réglée de façon à capter le maximum de lumière. La sensibilité de la caméra est limitée par son bruit de fond intrinsèque. Il correspond à des spots lumineux distribués aléatoirement (Figure I - 29-a).

L'acquisition et le traitement des images sont réalisés par le logiciel GLOBAL LAB Image 2 de Data Transition via une interface DT3120 (Twin 8-bit A/Ds). Ce logiciel permet d'effectuer des moyennes sur les images et de réduire considérablement l'impact du bruit de fond. La Figure I - 29-b permet de comparer les images avant et après avoir effectué la moyenne.



(a) **(b)**

Figure I - 29 : Images obtenu dans le noir, a : avant et b : après avoir effectué une moyenne sur 100 images.

V.5.2. Photomultiplicateur

L'utilisation du PM permet de convertir le signal lumineux détecté en courant électrique. Ce PM est muni d'une lentille de focale 70mm. Les photo-électrons induits par la photo-cathode du PM sont collectés et multipliés dans le PM. La tension induite par ce courant est mesurée sur une impédance de type RC parallèle. La capacité C inclut les capacités parasites du PM, des câbles, et du système de mesure (par exemple oscilloscope). Suivant les valeurs de R et de C, la sensibilité, la bande passante, et le bruit de fond du PM varient fortement. En fonction de l'application recherchée, un compromis doit être trouvé entre ces grandeurs.

Avec une résistance de charge R élevée (1MΩ) et une capacité C élevée (2.2µF), le PM se comporte comme un intégrateur avec une constante de temps longue (2,2s). L'intensité moyenne de la lumière émise est mesurée, et cette mesure peut être encore améliorée en réalisant un moyennage numérique de nombreuses acquisitions. Dans ce cas, il est possible d'apprécier des variations d'intensité lumineuse moyenne largement inférieures au bruit de fond propre du PM (0,7 à 2 nA).

Dans certains cas, le temps d'intégration a été fortement réduit en diminuant la capacité C au maximum (capacités parasites), et en ajustant la valeur de R pour obtenir une bande passante compatible avec la mesure réalisée. La Figure I - 30 montre un exemple de mesure avec une bande passante réglée pour observer des variations à 50 Hz.

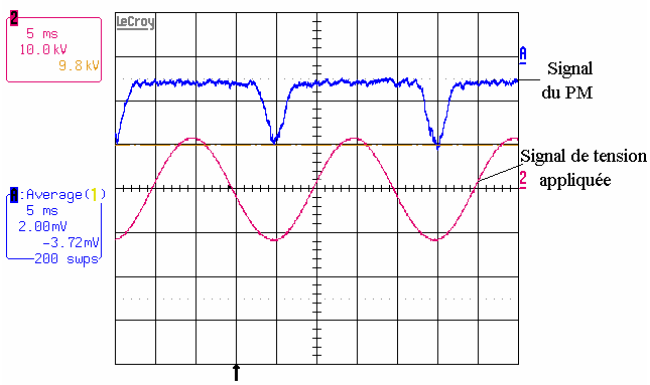


Figure I - 30 : Forme du courant PM enregistré sur l'oscilloscope avec un temps d'intégration court (C minimum, R = 1MΩ).

La sensibilité de détection est toutefois diminuée quand la résistance est réduite, et le bruit de fond du PM (constitué d'impulsions très courtes) peut devenir gênant. La forme typique d'une impulsion de photo-courant est présentée sur la Figure I - 31.

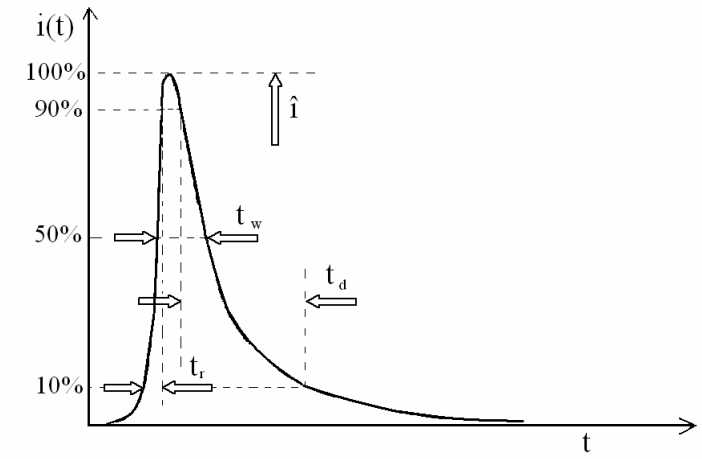


Figure I - 31 : Forme de l'impulsion de i_{PM}.

Les paramètres caractéristiques sont :

- L'amplitude de l'impulsion î.
- Le temps de montée t_r.
- Le temps de descente t_d.
- La largeur d'impulsion à mi-hauteur t_w.

Le PM étant un générateur de courant constitué d'impulsions rapides (1 photoélectron produit une impulsion de courant d'environ 1ns), l'allongement de la constante de temps RC se traduira essentiellement par l'allongement de t_d et t_w. Ceci peut être aisément observé en mesurant la forme des impulsions de bruit de fond du PM. A partir de ces mesures, pour enregistrer correctement l'intensité lumineuse sous tension impulsionelle avec des temps de montée de la tension variables, au chapitre II, nous avons utilisé les valeurs suivantes :

- Impulsion de temps de montée 0,6µs : $R_{//}$=1kΩ
- Impulsion de temps de montée 7µs : $R_{//}$=10kΩ
- Impulsion de temps de montée 80µs : $R_{//}$=100kΩ
- Impulsion de temps de montée > 560µs: pas de résistance en parallèle.

$R_{//}$ correspond à la valeur de la résistance mise en parallèle sur l'impédance d'entrée de l'oscilloscope (1MΩ)

V.6. Mesure par spectroscopie diélectrique haute tension

V.6.1. Principe de la mesure par spectroscopie diélectrique

Quand un isolant est soumis à un champ électrique ***E(t)*** dépendant du temps, un courant ***I(t)*** traverse le matériau. Ce courant est une image de la polarisation mais également de la conduction du matériau. La densité de courant ***J(t)*** est la somme des densités du courant de conduction $\sigma_0 E(t)$ et du courant de déplacement [65], le courant de diffusion est négligeable devant les autres courants :

$$J(t) = \sigma_o E(t) + \frac{dD(t)}{dt} \qquad \textbf{(Eq. I - 8)}$$

σ_0 représente la conductivité qui correspond au courant de conduction.

Aux basses fréquences, la conductivité résulte de la contribution de plusieurs mécanismes de conduction. Dans de nombreux matériaux isolants, la conduction est dominée par le transport des ions libres. La conduction ne provoque pas d'accumulation de charge ni de stockage d'énergie dans le matériau. Aux basses fréquences, l'effet de la conductivité ionique se traduit par une variation de ε'' proportionnelle à ***1/f*** **(**Figure I - 32**).** La conduction n'est pas le seul phénomène qui peut influencer le comportement du matériau aux basses fréquences : d'autres mécanismes de polarisation peuvent provoquer une variation importante de permittivité (Figure I - 33) : polarisation de charges d'espace, polarisation des électrodes et phénomène de dispersion à basse fréquence.

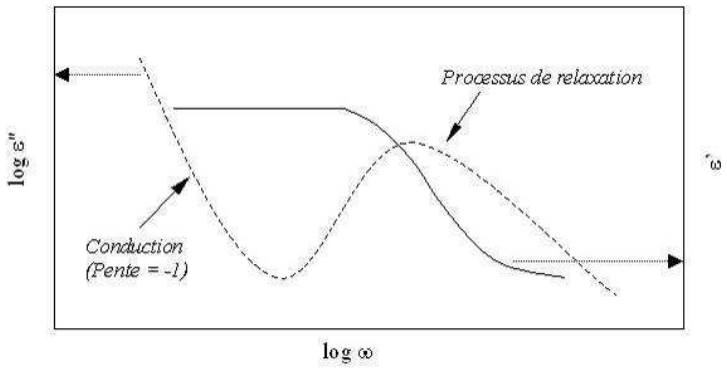


Figure I - 32 : Schéma représentatif des parties réelle (ε') et imaginaire (ε") de la permittivité complexe en fonction de la fréquence dans le cas d'une conduction ohmique

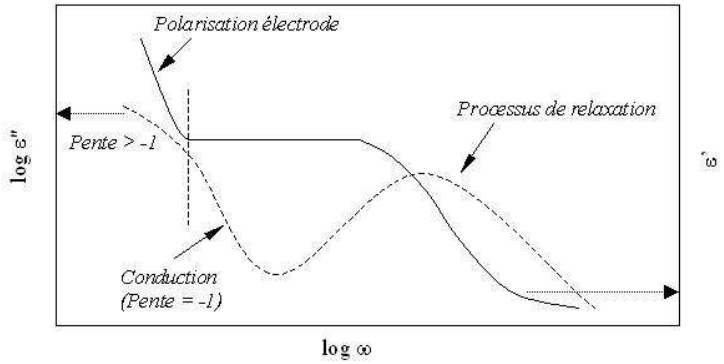


Figure I - 33 : Schéma représentatif des parties réelle (ε') et imaginaire (ε") de la permittivité complexe en fonction de la fréquence dans le cas d'une conduction non ohmique. Dans le dernier cas, la polarisation d'électrode est observée

Le principe de la spectroscopie d'impédance [66, 67] repose sur l'application d'une tension sinusoïdale et sur l'analyse de l'amplitude et du déphasage de la réponse en courant du matériau. La tension appliquée $U^* = U_o e^{j\omega t}$, génère un courant de même fréquence dans l'échantillon. Le rapport des amplitudes tension/courant définit le module de l'impédance $|Z_S|$. Le déphasage entre la tension et le courant complète l'information pour donner accès aux parties réelle et imaginaire de l'impédance complexe Z_S.

On a alors l'expression suivante :

$$Z_s^*(\omega) = Z'(\omega) + jZ''(\omega) = \frac{U(\omega)}{I(\omega)}[\cos(\varphi(\omega)) + j\sin(\varphi(\omega))] \qquad \textbf{(Eq. I - 9)}$$

L'échantillon peut également être considéré comme une admittance complexe parallèle $Y_P{}^*$ ou capacité complexe $C_P{}^*$ [68]. Dans ce cas, on écrit :

$$Z_S^*(\omega) = \frac{1}{Y_P^*(\omega)} = -\frac{j}{\omega.C_P^*(\omega)} = \frac{U^*(\omega)}{I^*(\omega)} \qquad \textbf{(Eq. I - 10)}$$

La permittivité complexe $\varepsilon^*(\omega)$ et $\tan\delta$ sont déterminées par :

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega) = -\frac{j}{\omega.Z_S^*(\omega)C_o} = -\frac{j.Y_P^*(\omega)}{\omega.C_o} = \frac{C_P^*}{C_o} \qquad \textbf{(Eq. I - 11)}$$

$$\tan(\delta(\omega)) = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = -\frac{Z'(\omega)}{Z''(\omega)} \qquad \textbf{(Eq. I - 12)}$$

Avec $C_o = A\varepsilon_o / d$ où A et d sont respectivement la surface et l'épaisseur de l'échantillon. ε_0 est la permittivité du vide.

Le but des mesures réalisées dans ce travail (chapitre IV) ne sera pas d'étudier en détail les phénomènes de polarisation et de conduction dans les matériaux utilisés, mais plutôt de voir s'il est possible de détecter et mesurer par spectroscopie diélectrique l'apparition de décharges partielles de très petites amplitudes, non mesurables par la technique classique de détection d'impulsions. En effet, l'apparition de DP se traduit par le passage d'un courant qui vient se superposer aux courants de base de polarisation et de conduction, et donc créer des pertes diélectriques supplémentaires.

V.6.2. Dispositifs de mesure

Dans ces travaux, les propriétés diélectriques (permittivité, facteur de dissipation) des substrats enrobés on été étudiés sur une gamme de fréquence de 5mHz à 50Hz, en fonction de la tension appliquée (de 20V à 8kV). L'utilisation d'une mesure sous haute tension est indispensable pour pouvoir se placer dans les conditions d'apparition des décharges partielles.

Le dispositif de mesure de spectroscopie diélectrique IDA 200 (Figure I - 34) de la société Programma permet de faire des mesures dans la gamme de fréquence de 0.1mHz à 1kHz. La tension appliquée est de 10V à 200V crête ($140V_{eff}$) et la plage de mesure en capacité varie de 10pF à 100mF. Une unité haute tension HVU associé au système IDA 200 permet d'obtenir des tensions de sortie jusqu'à 30kV crête, mais la gamme de fréquence est alors limitée de 0.1mHz à 100Hz.



(a)



(b)

Figure I - 34 : a : Dispositif Programma IDA 200 et b : IDA 200 HVU (High Voltage Unit)

La limite de mesure en $\tan\delta$ est de l'ordre de 10^{-4} mais l'incertitude des mesures dépend de la capacité de l'échantillon mesurée et de la fréquence (Figure I - 35). L'erreur de mesure sur tgδ avec nos cellules (de capacité environ 100pF) dans la gamme de fréquence 10^{-4}Hz - 10^{3}Hz est de l'ordre de 5.10^{-4}.

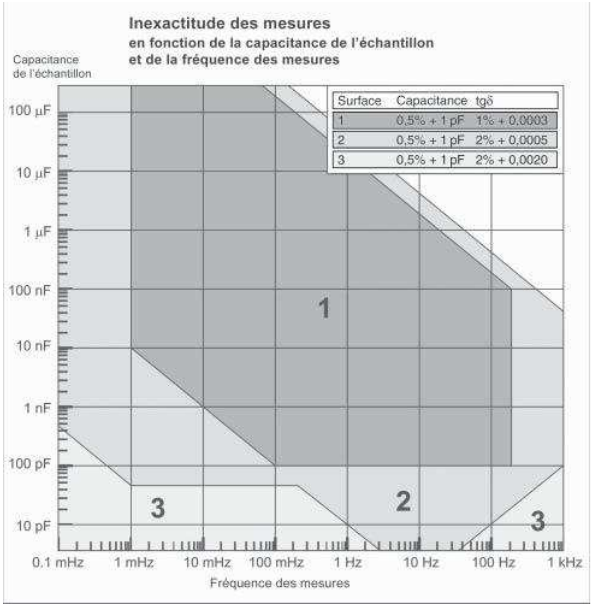


Figure I - 35. Précision des mesures en fonction de la fréquence et de la capacité de l'échantillon

CHAPITRE II : CARACTERISATION ELECTRIQUE ET OPTIQUE DES DECHARGES PARTIELLES SUR DES SUBSTRATS RECOUVERTS D'HUILE SILICONE

Dans la thèse de DO [6], le phénomène de décharges partielles sur des substrats d'AlN dans le gel silicone à été étudié. Nous avons vu dans le chapitre bibliographique que ces travaux n'ont pas permis d'identifier de manière certaine l'origine des décharges. Du point de vue expérimental, un des inconvénients du gel silicone vient de sa faible auto-cicatrisation. Sous l'action de décharges partielles répétées, des cavités apparaissent dans le gel silicone qui peuvent à leur tour être à l'origine de nouvelles décharges partielles. Il n'est donc pas possible de réaliser un grand nombre de mesures dans des conditions stables et reproductibles dans ces conditions.

Dans le but de mieux identifier l'origine des décharges partielles et de la lumière émise, nous présentons dans ce chapitre des mesures sur des substrats plongés dans de **l'huile silicone**. Ce liquide possède une composition proche du gel silicone (composé de plus de 80% de liquide), avec une viscosité qui peut varier très largement suivant le type d'huile utilisé. Le principal avantage expérimental est la capacité d'auto-cicatrisation caractéristique des liquides, ce qui offre la possibilité d'effectuer un grand nombre d'essais dans des conditions stables. Le remplacement du gel par un liquide sera également très intéressant dans le but de mieux comprendre l'origine des DP et de la lumière émise. Les mesures ont été effectuées principalement sur des substrats d'AlN sous tension alternative et impulsionelle, et un nombre plus limité d'essais a été également réalisé sur des substrats d'alumine (Al_2O_3) et de composites verre - époxy (circuit imprimé). Ces mesures nous permettront de mettre en évidence l'influence très grande de la nature du substrat sur l'activité de DP. L'influence de la nature du liquide sera étudiée dans le chapitre III.

I. Mesures préliminaires : photoluminescence et thermoluminescence du substrat d'AlN

Avant l'application de la tension sur un échantillon, une série de mesures préliminaires a été réalisée. Cela permet d'identifier les sources de lumière parasites qui peuvent influencer la détection

par voie optique des décharges partielles. La Figure II - 1 présente les mesures de l'intensité émise par le substrat d'AlN dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350. Cette cellule a été exposée à la lumière ambiante et les mesures de lumière émise ont été effectuées sans tension appliquée immédiatement après avoir mis la cellule dans l'enceinte de mesure à température ambiante (environ 20°C). L'enceinte est hermétique à la lumière extérieure. L'intensité lumineuse diminue rapidement dès les premières minutes, puis atteint un niveau stable après environ une heure, qui correspond au bruit de fond du PM. L'émission de lumière à température ambiante (20°C) est due à la photoluminescence de l'AlN [69]. Ce phénomène devient indétectable après mise dans l'obscurité pendant une heure.

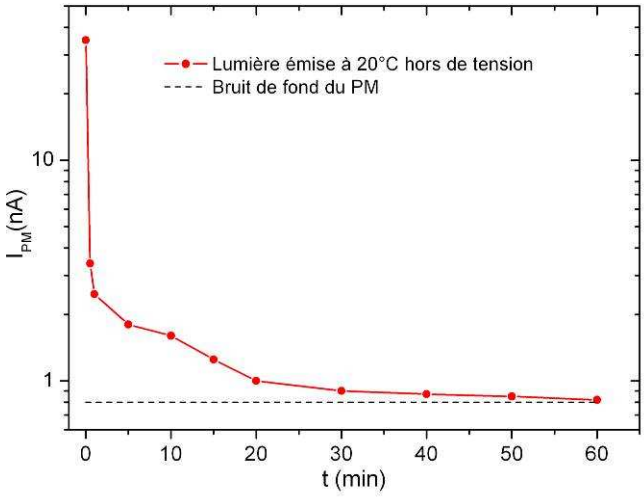


Figure II - 1 : Emission de lumière par le substrat d'AlN recouvert d'huile silicone au cours du temps à température ambiante (20°C). Aucune tension n'est appliquée

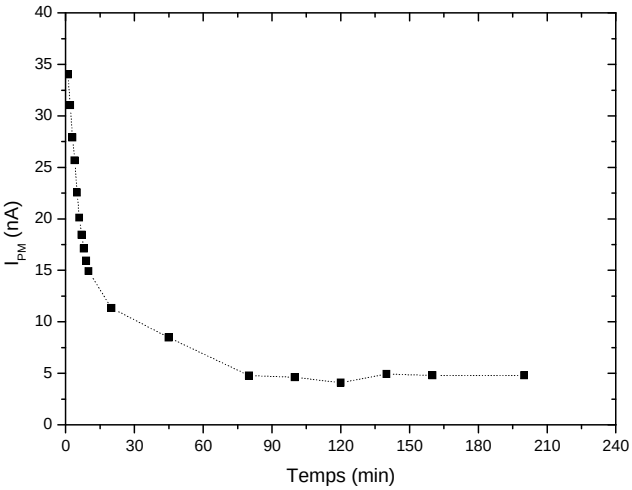
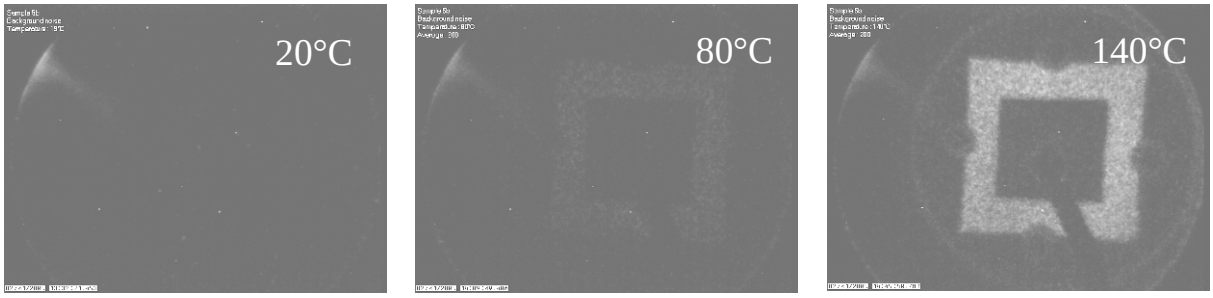


Figure II - 2 : Emission de lumière par le substrat d'AlN chauffé à 140°C. Aucune tension n'est appliquée [6]

L'évolution temporelle de la lumière a également été étudiée par Do à différentes températures dans [6]. Le substrat d'AlN a été mis dans l'obscurité à température constante sans application de la tension jusqu'à ce que la lumière ne soit plus détectable. Le chauffage du substrat à 140°C provoque à

nouveau une émission de lumière (Figure II - 2 et Figure II - 3). Celle-ci diminue rapidement puis se stabilise après 100 minutes. Cette valeur d'équilibre est plus élevée que le bruit de fond du PM. L'origine physique de la lumière peut être attribuée à la superposition de phénomènes de thermo- et photo-luminescence. La cinétique de décroissance de $\boldsymbol{I_{PM}}$ varie avec la température.

L'étude des décharges partielles par voie optique nécessite donc de tenir compte des phénomènes de photoluminescence et de thermoluminescence. Nous avons donc laissé la cellule dans le noir pendant suffisamment longtemps pour éviter de mesurer la photoluminescence. Le bruit de fond du PM a été soustrait à toutes les courbes qui seront présentées par la suite.



(a) (b) (c)

Figure II - 3 : Image du substrat d'AlN hors tension. La zone noire interne de forme carrée représente l'électrode de cuivre [6]. a : 20°C, aucune lumière n'est émise. b : 80°C, faible lumière émise. c : 140°C , forte émission issue du substrat

II. Dispersion du comportement des substrats d'AlN

De nombreux substrats (DBC) d'AlN ont été caractérisés durant ce travail. Ces substrats proviennent tous du même fournisseur. Nous avons mis en évidence une dispersion importante du comportement entre ces différents substrats, que nous illustrons ici par quelques exemples.

II.1. Protocoles de mesures électriques et optiques

Les mesures de décharges partielles sur le substrat d'AlN ont été réalisées sous tension alternative 50 Hz. La tension appliquée a été augmentée par paliers successifs jusqu'à une dizaine de kV. Durant chaque palier, les mesures optiques et électriques ont été réalisées simultanément. Le substrat recouvert d'huile est d'abord dégazé sous vide pendant 1h, et placé dans le noir une durée suffisamment longue avant de mener une campagne de mesures.

L'enregistrement électrique des DP a été effectué pendant 60s en utilisant le système de détection et d'acquisition ICM. Le bruit de fond de détection est de 0,2 pC. Les résultats sont illustrés par la distribution des décharges partielles positives et négatives en fonction de la phase. A partir de ces données, le courant moyen de décharges ($\boldsymbol{I_{DP}}$) est calculé. Il correspond à la somme des charges libérées par les DP, divisée par la durée d'acquisition.

Le système de visualisation permet la localisation des zones de lumière émises par les DP. Un moyennage numérique d'une série de 100 images a été effectué pour supprimer le bruit de fond de la caméra et obtenir une très haute sensibilité, comparable à celle du photomultiplicateur. Nous avons également mesuré l'intensité de la lumière émise en utilisant un photomultiplicateur (PM) chargé sur une impédance RC parallèle. La constante de temps est réglée à 2s pour obtenir la valeur moyenne de l'émission de lumière. L'intensité lumineuse moyenne est proportionnelle au photo-courant moyen noté $\boldsymbol{I_{PM}}$. La sensibilité de ces mesures est uniquement limitée par le bruit de fond du PM, d'environ 2nA. Le bruit de fond étant fluctuant, il a été systématiquement mesuré et soustrait dans tous les résultats présentés, pour faciliter la comparaison entre les différentes séries de mesures.

La Figure II - 4 montre la courbe de réponse du photomultiplicateur utilisé (BURLE 8575), ainsi que le taux de transmission de la lentille de focalisation, mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre UV – visible. Ceci nous permet de calculer la courbe de réponse du système optique complet (PM + lentille). La lumière émise est détectée dans la gamme 330 – 550nm.

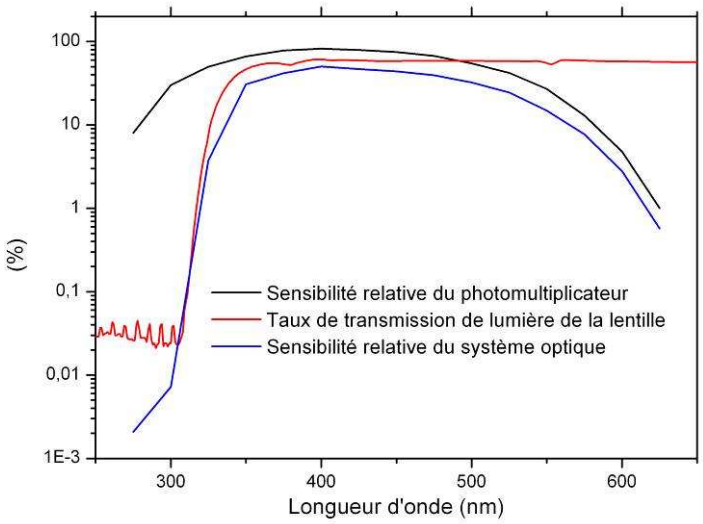


Figure II - 4 : Réponse du système optique $T_{\%}$ en fonction de longueur d'onde, déduit de la sensibilité relative du PM $T_{\%PM}$ et de taux de transmission de lumière de la lentille $T_{\%lens}$ ($T_{\%}=T_{\%PM}.T_{\%lens}$)

II.2. Mesures électriques et optiques

Sur la Figure II - 5 et la Figure II - 6, nous présentons les valeurs moyennes $\boldsymbol{I_{DP}}$ et $\boldsymbol{I_{PM}}$ mesurées sur différents échantillons (AlN1, AlN2 et AlN8) recouverts d'huile silicone Rhodorsil 47V350. Les conditions d'essai sont identiques (température ambiante, tension alternative 50Hz). La Tension d'Apparition de Décharges Partielles (TADP) correspond à la tension pour laquelle les premières DP d'amplitude supérieure à 0.2pC (bruit de fond) sont détectées. L'échantillon AlN1 possède une faible TADP (vers $3kV_{eff}$) ce qui indique la présence de défauts. La majorité des TADP mesurées sur les « bons » substrats sont autour de $5kV_{eff}$. Dans les mêmes conditions, la détection d'une émission de lumière par le PM (Figure II - 6) est observée pour des tensions inférieures à la

TADP. Nous reviendrons sur ce point dans les chapitres suivants. Le courant moyen $\boldsymbol{I_{DP}}$ varie fortement entre les trois échantillons.

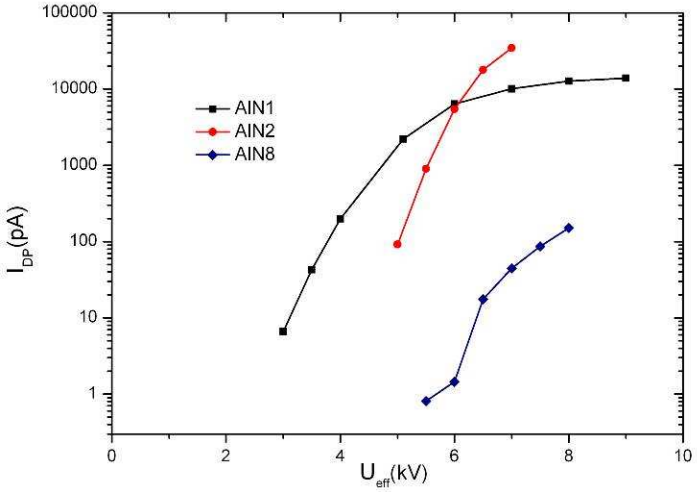


Figure II - 5 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} sur différents substrats d'AlN dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 en fonction de la tension appliquée. Echantillon AlN 1 test 7, AlN 2 test 2 et AlN 8 test 2

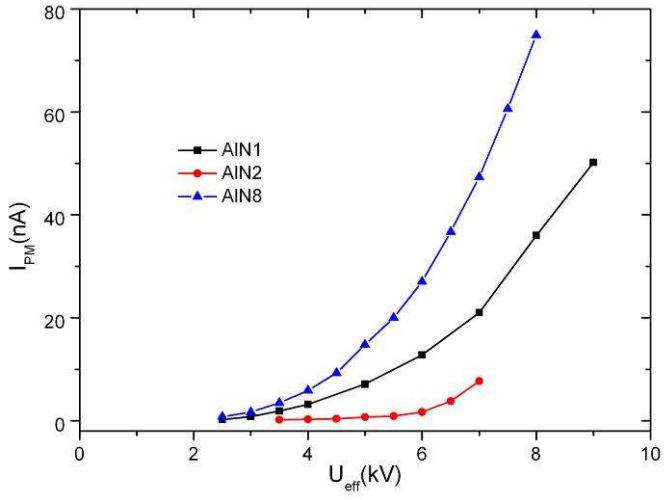


Figure II - 6 : Evolution du photo-courant moyen I_{PM} dans les conditions de la figure II-5 (échantillon AlN 1 test 7, AlN 2 test 2 et AlN 8 test 2). La position du PM pour AlN8 est verticale par rapport au substrat, pour les autres de 45°. La sensibilité est donc un peu plus élevée pour les mesures avec l'AlN8

Les distributions de charges résolues en phase (Figure II - 7 à Figure II - 9) obtenues à $7kV_{eff}$ diffèrent d'un substrat à l'autre. Le nombre de décharges entre deux substrats peut varier de 2 décades, la charge maximale d'une décade. Par exemple, sur l'AlN2 de grandes décharges (Figure II - 8) jusqu'à 70 pC sont détectées, à comparer à celles plus petites obtenues sur les deux autres substrats (<10 pC, Figure II - 7 et Figure II - 9). Ceci est corrélé à la valeur élevée de $\boldsymbol{I_{DP}}$ sur le substrat AlN2 : jusqu'à plus de 30nA, au lieu de 150pA sur le substrat AlN8. Le substrat AlN1 caractérisé par une TADP faible présente également un courant $\boldsymbol{I_{DP}}$ élevé (jusqu'à 10 nA), mais son augmentation avec la

tension est beaucoup moins rapide que pour le substrat AlN2. Ces exemples illustrent donc une très large dispersion du comportement entre les substrats sur les valeurs de TADP, de charge maximale mesurée, mais également sur l'évolution de « l'activité moyenne » de DP (évaluée par $\boldsymbol{I_{DP}}$) en fonction de la tension. Il n'apparaît par exemple aucune corrélation évidente entre la valeur de TADP et la valeur de $\boldsymbol{I_{DP}}$ mesuré à plus haute tension.

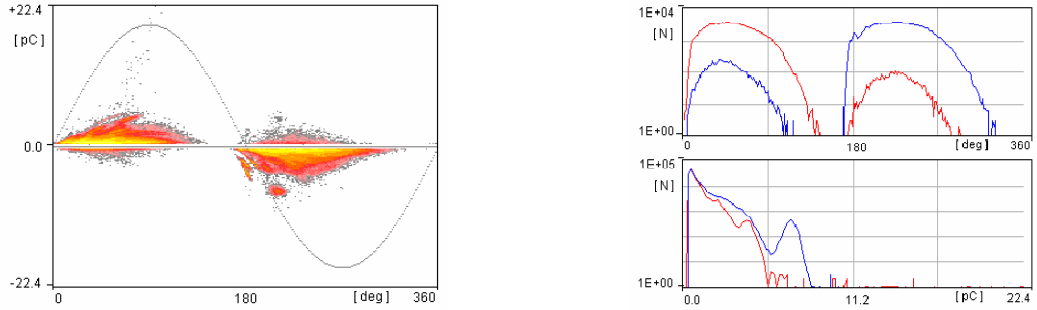


Figure II - 7 : Distribution des décharges en fonction de la phase (la couleur correpond aux nombres de décharges), nombre de décharges en fonction de la phase et nombre de décharges en fonction de la charge (la couleur rouge représente les charges positives, la couleur bleue les charges négatives). Echantillon AlN1 dans l'huile silicone 47V350 à 7kV$_{eff}$

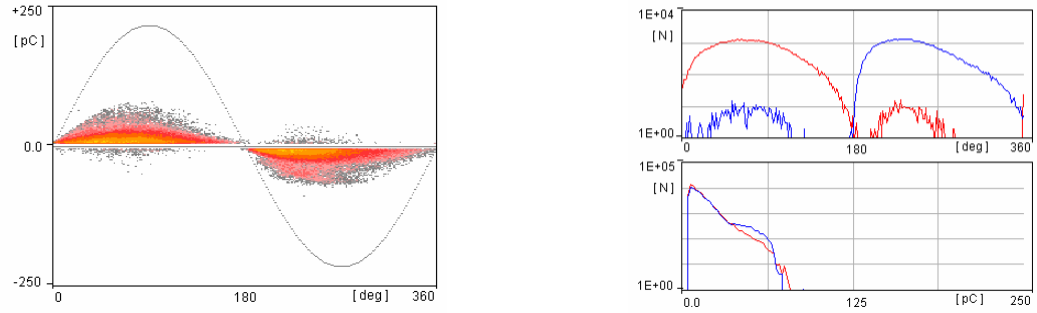


Figure II - 8 : Distribution et nombre de décharges en fonction de la phase. Echantillon AlN2 dans l'huile silicone 47V350 à 7kV$_{eff}$.

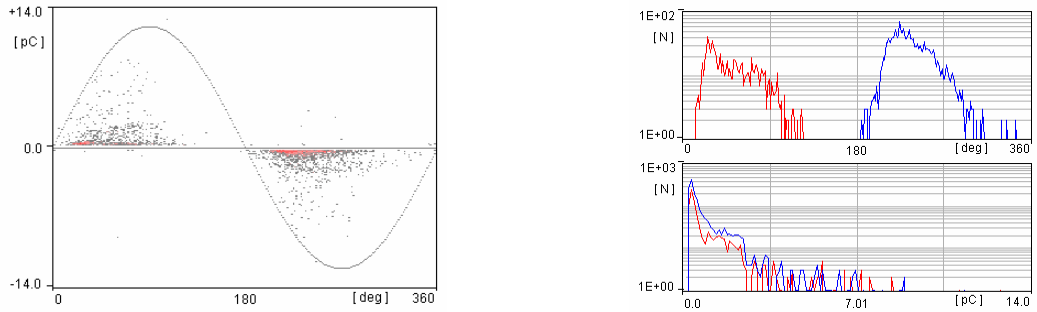


Figure II - 9 : Distribution et nombre de décharges en fonction de la phase. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone à 7kV$_{eff}$

Dans la majorité des cas, une symétrie est observée entre les alternances positive et négative dans les distributions de décharges résolues en phase. Les distributions de charges sont en avance de phase sur la tension. Cette avance de phase est clairement marquée pour les substrats AlN1 et AlN8. La détection de décharges de signes opposées à la tension dans les Figure II - 7 à Figure II - 9 n'a pas

de signification physique, et est due à un artefact du système de détection (détection des oscillations de la réponse impulsionnelle du filtre RLC). Dans certains cas (substrat AlN1, Figure II - 7) l'existence de plusieurs « paquets » distincts de DP sur la distribution indique que différents mécanismes de DP se produisent simultanément sur l'échantillon.

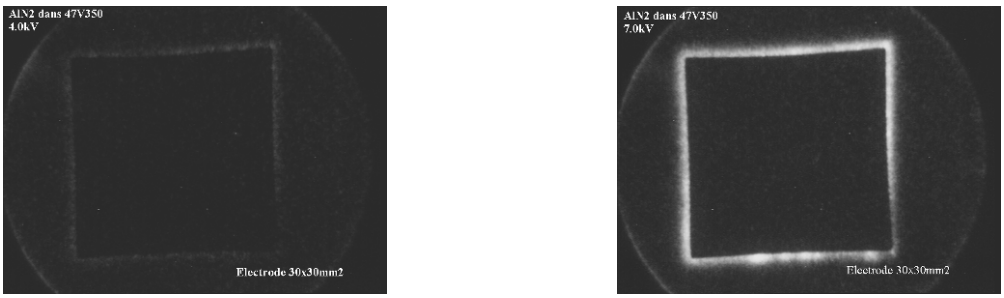
II.3. Visualisation de lumière

Sur les images obtenues pendant les mesures électriques de DP, des points lumineux de grande luminosité sont détectés autour de la métallisation pour l'AlN1 (Figure II - 10), caractérisé par une TADP faible. Avec l'échantillon AlN2, la zone d'émission lumineuse (Figure II - 11) est plus homogène autour de l'électrode métallisée. Sur l'échantillon AlN8, une émission très homogène est enregistrée (Figure II - 12).



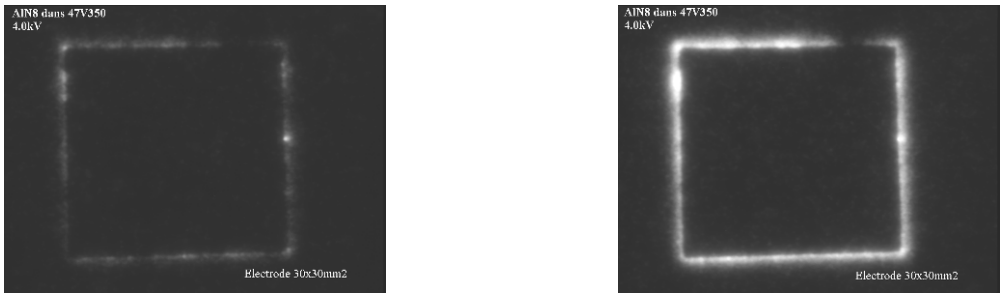
(a) (b)

Figure II - 10 : Localisation de la lumière émise sur le substrat AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, a : 4kV$_{eff}$ et b : 7kV$_{eff}$



(a) **(b)**

Figure II - 11 : Localisation de la lumière émise sur le substrat d'AlN2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350n a : 4kV$_{eff}$ et b : 7kV$_{eff}$



(a) (b)

Figure II - 12 : Localisation de la lumière émise sur le substrat AlN8 dans l'huile silicone, a : 4kV$_{eff}$ et b : 7kV$_{eff}$.

II.4. Corrélation avec la forme du bord de la métallisation

L'observation par microscopie optique a permis d'établir une corrélation entre la présence de points lumineux sur certains substrats (par exemple AlN1, Figure II - 10) et la présence d'irrégularités au bord de la métallisation après leur gravure au perchlorure de fer. La Figure II - 13 montre l'exemple du substrat AlN1. Les substrats qui donnent une émission de lumière homogène (Figure II - 11 et Figure II - 12) montrent un bord de métallisation après gravure beaucoup plus régulier (Figure II - 14 et Figure II - 15). La présence d'irrégularités peut favoriser l'augmentation locale du champ électrique due à l'effet de pointe. Il n'a pas été possible d'identifier clairement l'origine de ces irrégularités, qui peuvent soit provenir de défauts initiaux dans la couche de cuivre, soit du procédé de gravure.

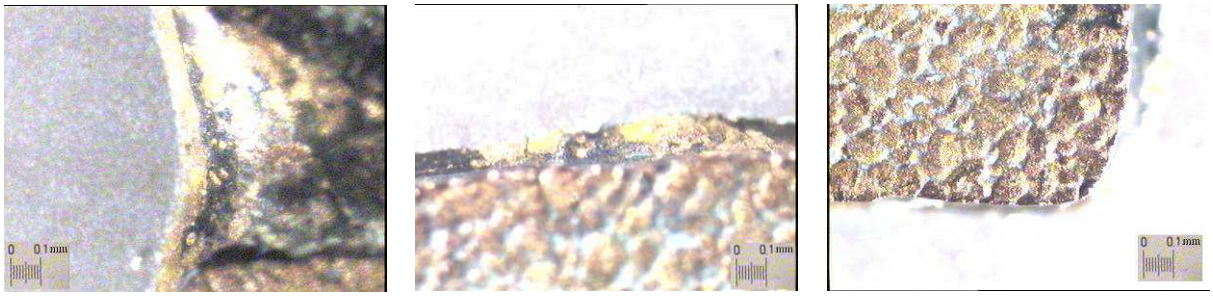


Figure II - 13 : Observation par microscopie des irrégularités au bord de la métallisation de l'AlN1

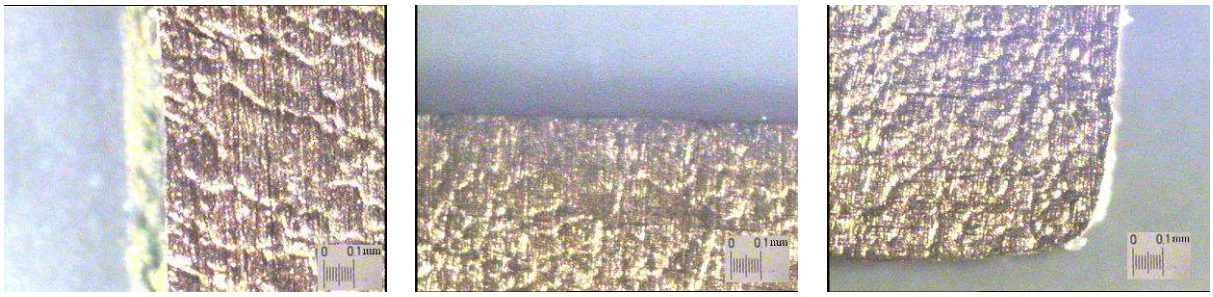


Figure II - 14 : Observation du bord de métallisation du substrat AlN2 sous microscope

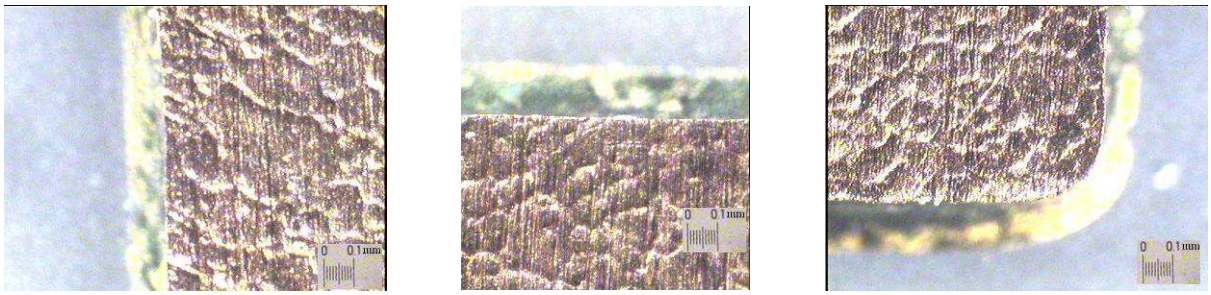


Figure II - 15 : Observation du bord de métallisation du substrat AlN8 sous microscope

II.5. Origine de la lumière mesurée

Il est intéressant d'observer que pour les trois substrats précédents, il n'y pas de corrélation quantitative entre les mesures de $\boldsymbol{I_{PM}}$ et $\boldsymbol{I_{DP}}$ (Figure II - 5 et Figure II - 6). Il existe même une tendance inverse : le substrat 8 qui donne un courant $\boldsymbol{I_{DP}}$ beaucoup plus faible est celui qui émet le plus de

lumière, et le substrat 2 qui donne le courant le plus élevé est celui qui émet le moins de lumière. Cela ne serait pas le cas si la lumière détectée correspondait à toutes les DP mesurées électriquement. La visualisation montre que la lumière détectée provient de la zone de « point triple » métal/céramique/liquide, comme déjà observé par Do [6] avec du gel silicone.

Une hypothèse peut être déduite de ce constat. Les « défauts » à l'origine des courants de DP élevés mesurés sur les substrats 1 et 2 sont localisés soit profondément à l'intérieur de la céramique, soit sous la métallisation. Ainsi la lumière émise par ces défauts n'est pas détectée. Ces défauts pourraient par exemple être constitués par des cavités dans la céramique, ou par le décollement de la métallisation. Le taux de transmission de lumière d'un substrat d'épaisseur 630µm mesuré par le spectrophotomètre UV – visible est donné sur la Figure II - 16. Le taux de transmission de lumière en fonction de l'épaisseur (Figure II - 17) a été déduit à partir de la loi d'absorption du matériau :

$$d\phi(\lambda, x) = -\alpha\phi_O dx \qquad \textbf{(Eq. I - 13)}$$

Le taux de transmission de lumière d'un matériau d'épaisseur ***x*** est déterminé par :

$$T(\lambda, x) = \frac{\phi(\lambda, x)}{\phi_O} = e^{-\alpha x} \qquad \textbf{(Eq. I - 14)}$$

- T : taux de transmission de lumière du matériau.
- λ : longueur d'onde.
- ϕ_O , ϕ : flux de lumière incident et flux sortant du matériau d'épaisseur x.
- α : coefficient d'atténuation de lumière.

Ces calculs montrent que la lumière émise par un « défaut » (par exemple une cavité) situé jusqu'à environ 10 µm sous la surface sera transmise pratiquement sans atténuation. A 100µm, environ 30% de la lumière sera transmise. En revanche, à 630µm (défaut sur la face opposée) l'atténuation est très forte (environ 1/1000 de la lumière transmise). Ces mesures permettent de conclure que des défauts situés dans l'AlN à plusieurs dizaines de µm sous la surface pourront être détectés par le PM ou la caméra.

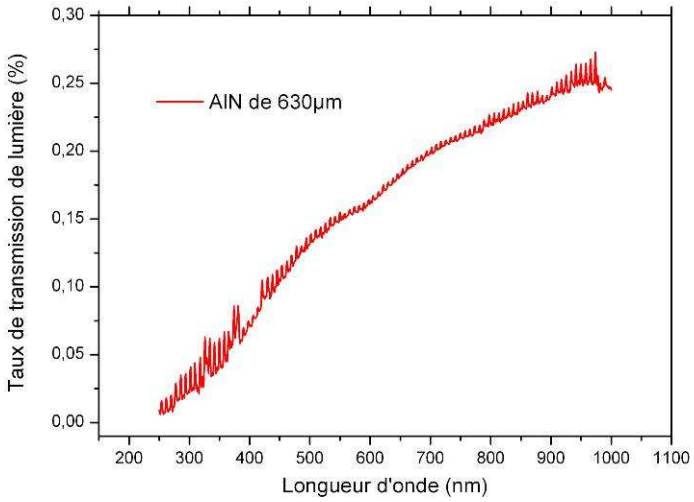
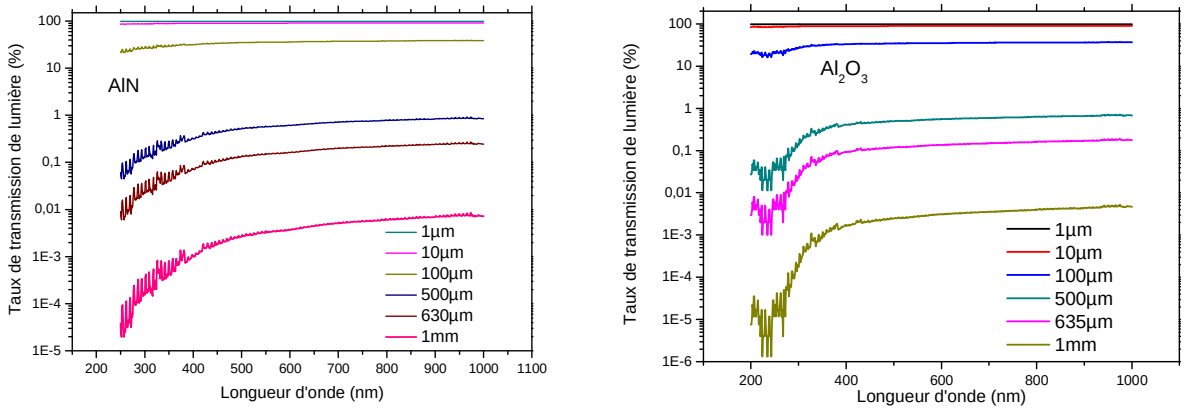


Figure II - 16 : Taux de transmission de lumière d'un substrat d'AlN de 630nm, mesuré avec un spectrophotomètre UV-visible



(a) (b)

Figure II - 17 : Taux de transmission de la lumière calculé pour le substrat AlN et Al_2O_3 pour différentes épaisseurs.

II.6. « Bons » et « mauvais » substrats

Les mesures réalisées sur une série de substrats identiques (Tableau II - 1) donnent des indications sur la méthode qui pourrait être utilisée pour caractériser leur qualité par des mesures non destructives de DP, et éventuellement des mesures optiques, avec le substrat immergé dans un liquide.

La TADP mesurée avec une sensibilité de détection élevée (0,2 pC) donne un premier classement des substrats : le substrat 2 possède une TADP élevée, mais il est également caractérisé par une forte amplitude des DP. La mesure de l'amplitude maximum des DP et du courant moyen I_{DP} en fonction de la tension permet une meilleure caractérisation. Les substrats défectueux 1 et 2 sont caractérisés par des valeurs très élevées de $\boldsymbol{I_{DP}}$, ce qui est clairement observé sur la Figure II - 18 qui regroupe l'ensemble des mesures. On voit que les courbes des « bons » substrats (AlN 4 à 8) sont regroupées autour d'une tendance unique (avec une certaine dispersion), et que les substrats

défectueux 1 et 2 sont nettement en dehors de cette tendance. Les « bons » substrats présentent des distributions de DP semblables à celle donnée sur la Figure II - 9, avec une amplitude maximum <10pC. Dans la norme IEC 1287 il est demandé lors des tests des substrats d'obtenir une charge maximale de 10 pC ce qui est vérifié sur les « bons » substrats que nous avons caractérisés.

Il serait nécessaire de valider le classement entre « bons » et « mauvais » substrats en étudiant la corrélation entre les mesures de DP et la fiabilité à long terme, ce qui n'était pas l'objectif de cette étude.

Echantillon	AlN1	AlN2	AlN4	AlN5	AlN6	AlN7	AlN8
Type de l'huile silicone utilisée	47V350	47V350	47V20	47V20	47V350	47V350	47V350
TADP (kV) (sensibilité : 0,2pC)	3	5	4	5	5	4	5.5
I_{DP} à 7kV$_{eff}$	10080	34570	62.76	162.5	149.3	100.7	44.7

Tableau II - 1 : Liste des échantillons utilisés

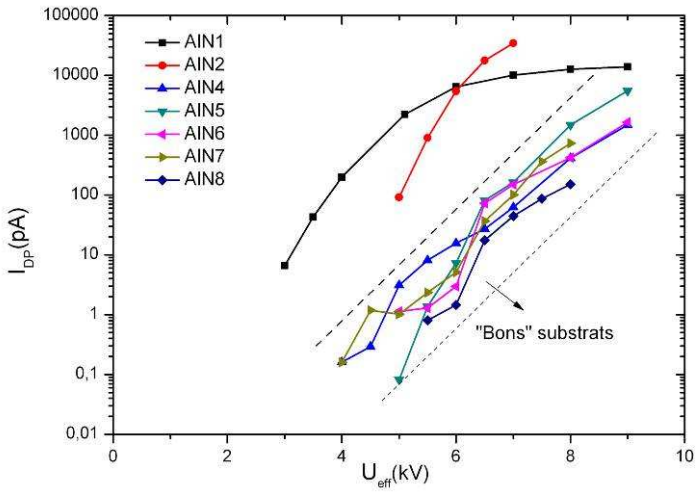


Figure II - 18 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée sur différents échantillons

Le rapport I_{PM} / I_{DP} (Figure II - 19) confirme que la lumière émise par les DP dans le cas des bons substrats (AlN4 à 8) est beaucoup mieux détectée qu'avec les substrats AlN1 et 2. Malgré une certaine dispersion, les substrats 4, 5, et 6 présentent une tendance comparable. La lumière émise par le substrat 8 est plus élevée, mais ceci est dû à une modification du dispositif pour mieux collecter la lumière avec ce substrat (PM dans l'axe de l'échantillon). Cela confirme qu'avec les « bons » substrats, les DP sont plutôt localisées dans la zone visible au niveau du point triple, et que pour les

substrats 1 et 2 il est très probable que des DP de grandes amplitudes ne soient pas détectées par le système optique (localisation sous la métallisation). L'imagerie permet de détecter et localiser certains types de défauts, en particulier ceux associés à des irrégularités du bord de la métallisation (Figure II - 10).

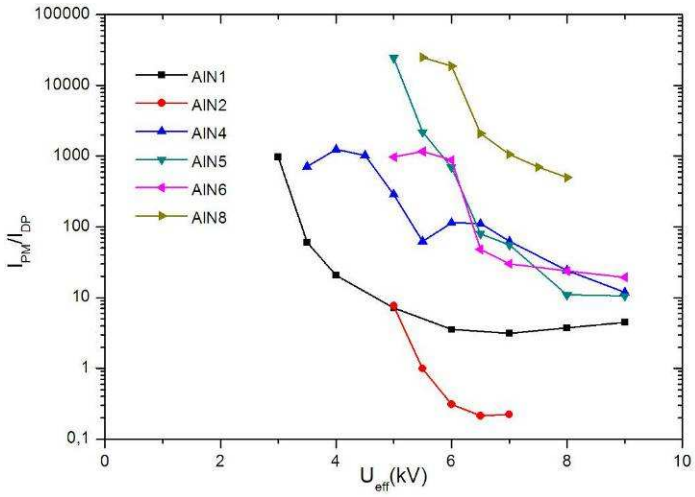


Figure II - 19 : Rapport I_{PM}/I_{DP} sur différents échantillons testés. Aucune mesure de I_{PM} sur l'AlN7 n'a été effectuée

Dans toute la suite de ce travail, les mesures visant à identifier l'origine des DP seront effectuées avec des « bons substrats » comme le substrat AlN8, caractérisés par une TADP élevée (environ 5kV), une amplitude maximum de DP ≤10pC, et un I_{DP} peu élevé (quelques centaines de pA).

III. Caractérisation électrique et optique de « bons » substrats d'AlN sous tension alternative

III.1. Décharges partielles et lumière émise

Le comportement typique d'un « bon » substrat est illustré sur la Figure II - 20. L'échantillon AlN8 est recouvert par l'huile silicone Rhodorsil 47V350.

La tension efficace seuil d'apparition des décharges (TADP) sur l'échantillon testée est de 5,5kV$_{eff}$ (bruit de fond de 0.2pC). Au-delà de la TADP, le courant de décharges I_{DP} augmente rapidement avec la tension. Une tension appliquée trop importante conduit à la dégradation irréversible du substrat. La tension appliquée est donc limitée à 8kV$_{eff}$.

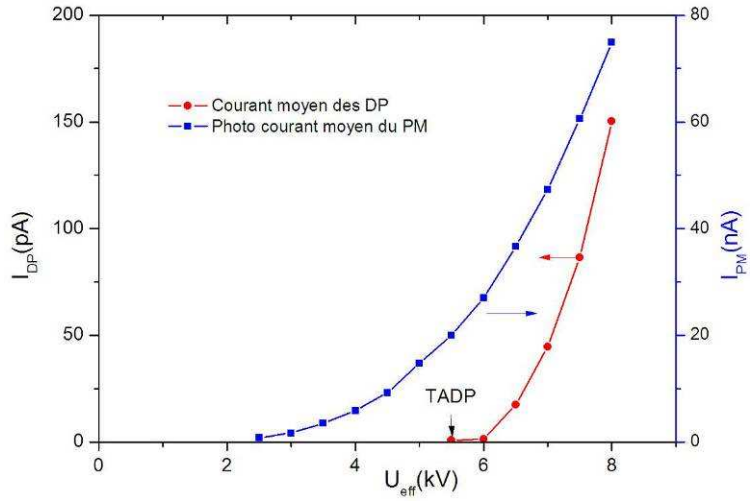


Figure II - 20 : Evolution du photo-courant moyen (I_{PM}) et du courant moyen de décharges (I_{DP}) en fonction de la tension alternative 50Hz. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 après conditionnement (dégazage à température ambiante)

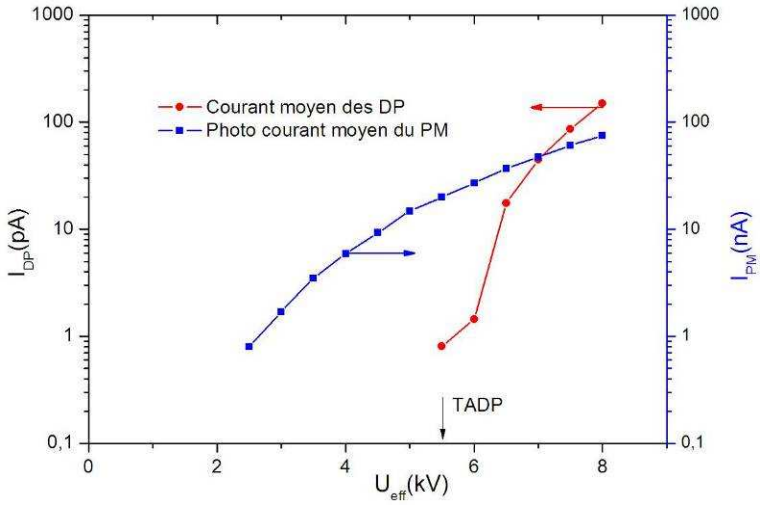


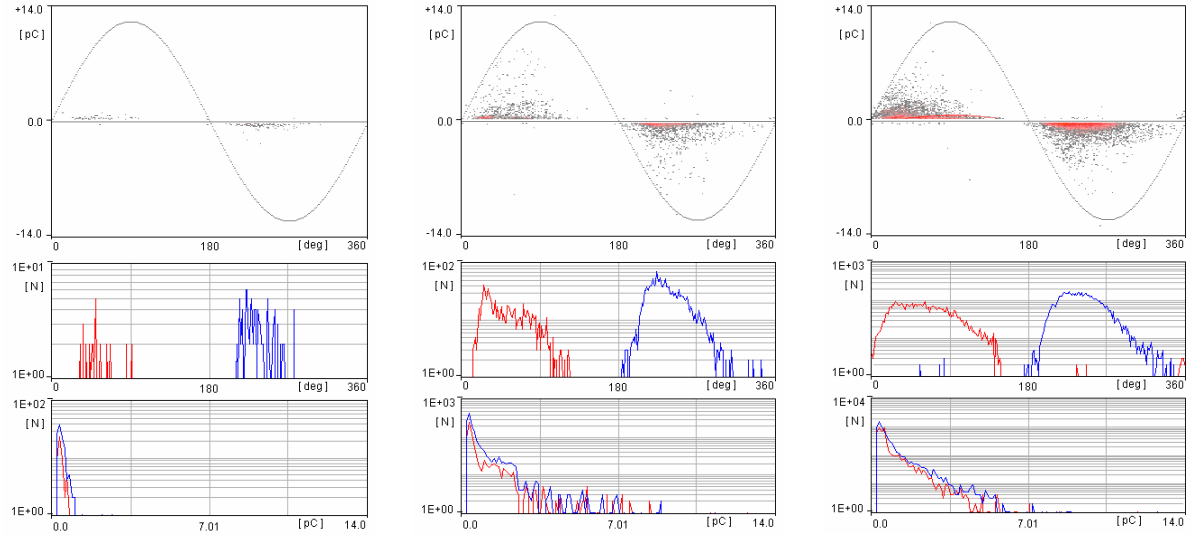
Figure II - 21 : figure II-20 présentée en échelle logarithmique

La forme de la distribution de décharges partielles ne change pas lors de l'augmentation de tension (Figure II - 22). Les DP de faibles amplitudes (<10pC) apparaissent symétriquement sur l'alternance positive et négative. Leur nombre est maximum pendant des dV/dt positif et négatif (dans les intervalles 0 - 90° et 180 - 270°).

Le nombre et l'amplitude des décharges mesurées augmentent avec la tension appliquée (Figure II - 23 et Figure II - 24). Les nombres de décharges positives et négatives mesurés par l'ICM sont identiques. L'amplitude maximale des décharges est estimée à partir des distributions N(Q) (Figure II - 22).

Au niveau des mesures optiques, la lumière émise commence à être détectée par le PM à une tension nettement inférieure à la TADP (vers 2,5kV sur la Figure II - 20). L'observation par la caméra

montre le long du bord de l'électrode métallisée une lumière homogène et stable dans le temps (Figure II - 25).



(a) (b) (c)

Figure II - 22 : Distribution des décharges en fonction de la phase à 6kVeff (a), à 7kVeff (b) et à 8kVeff(c). Echantillon AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (test 2)

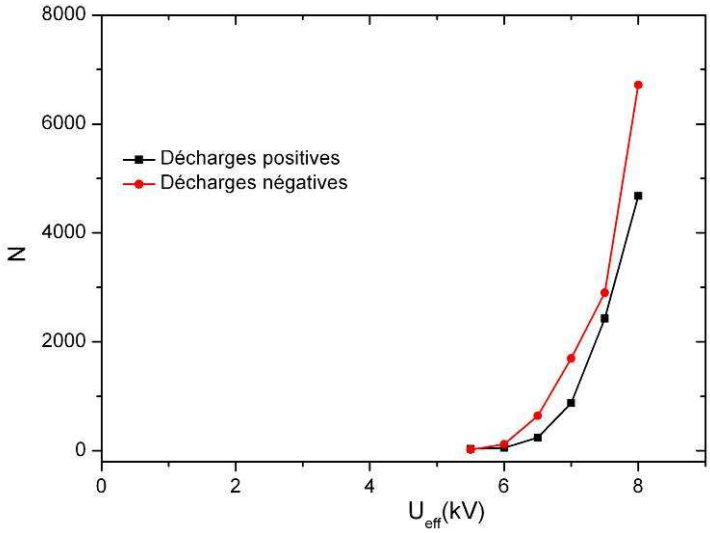


Figure II - 23 : Nombre des décharges positives et négatives en fonction de la tension appliquée (AlN8)

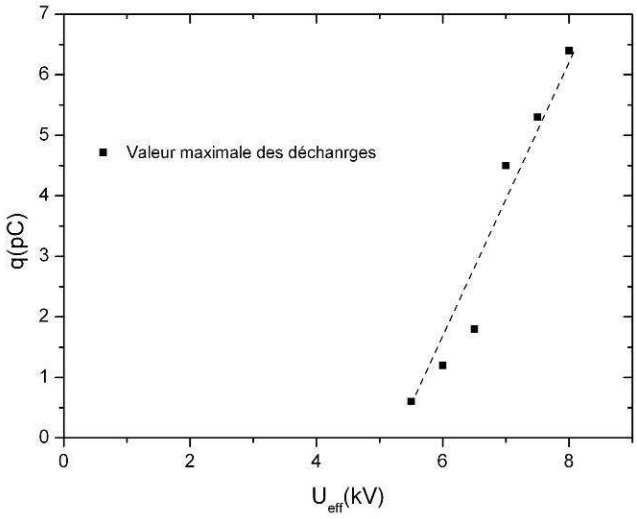
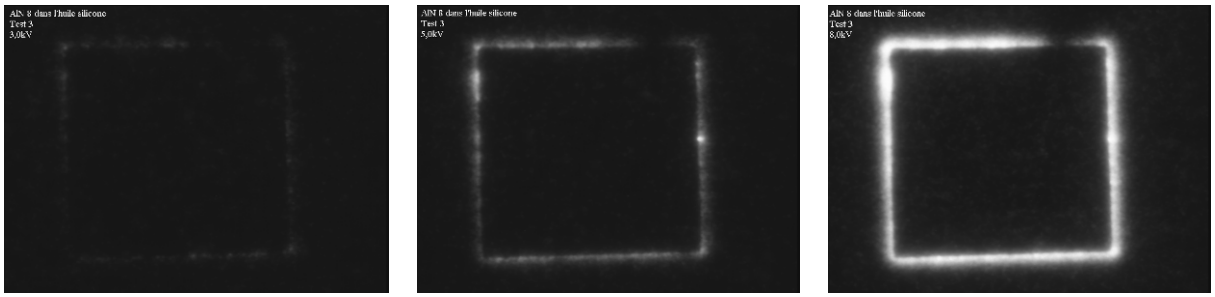


Figure II - 24 : Estimation de la valeur maximale des décharges en fonction de la tension appliquée. Echantillon AlN8 dans l'huile silicone 47V350 (test 2). Cette valeur est estimée à partir des distributions N(Q) des DP



(a) 3kV (b) 5kV (c) 8kV

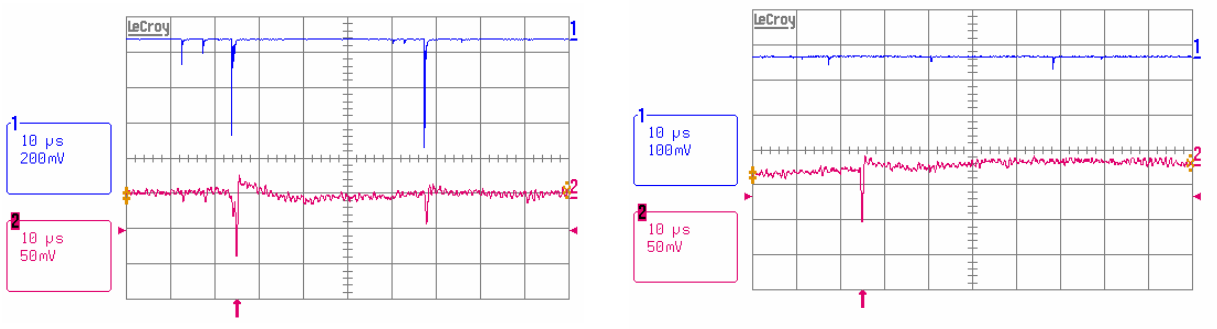
Figure II - 25 : Lumière issue de l'AlN8 recouvert de Rhodorsil 47V350. a : 3kV$_{eff}$. b : 5kV$_{eff}$. c : 8kV$_{eff}$

III.2. Signification de I_{PM} et de I_{DP}

La détection de lumière à bas niveau est limitée par le bruit de fond du système de mesure. Le bruit de fond du PM étant de 0.7 à 2 nA, on peut apprécier (après moyennage des mesures sur une centaine de valeurs) des variations significatives supérieures à 0,1nA. Lorsque le photomultiplicateur est utilisé avec une résistance de charge faible (par exemple 1kΩ), sa sensibilité diminue et sa bande passante augmente.

Au dessus de TADP, pour des DP d'amplitude suffisante il devient alors possible d'observer la corrélation temporelle entre les DP et l'émission de lumière (Figure II - 26-a). Lorsqu'une DP est détectée électriquement, une impulsion de lumière est également mesurée. Le ratio entre l'amplitude du photo-courant et le courant de décharge n'est pas stable. Il apparaît également des décharges qui ne sont pas corrélées à une émission de lumière (Figure II - 26-b) ; les décharges ont probablement lieu dans des zones masquées par le volume de la céramique ou la métallisation. Par ailleurs, le bruit de

fond du PM correspondant à une somme de petites impulsions de photo-courants, il est parfois difficile de discriminer facilement les DP des impulsions associées au bruit de fond du PM. Il sera d'autant plus difficile de mesurer les petites DP à partir des photo-courants que la bande passante sera élevée.



(a) (b)

Figure II - 26 : Exemple corrélation DP – lumière. 1 : photo-courant issu du PM. 2 : courant traversant l'impédance de mesure de l'ICM. Substrat AlN8 dans l'huile silicone à 7kV$_{eff}$

La mesure du photo-courant moyen $\boldsymbol{I_{PM}}$ (Figure II - 21) donne plusieurs indications intéressantes :

- à basse tension, la courbe de I_{PM} ne permet pas de déterminer une tension seuil d'apparition de la lumière. On peut donc supposer que de la lumière existe toujours à des tensions inférieures à celles utilisées ici, avec une intensité trop faible pour être détectée ;
- autour de la TADP, il n'existe pas de discontinuité sur la courbe de lumière émise ;
- I_{PM} et de I_{DP} suivent des lois de variation différentes.

La TADP dépend du bruit de fond de détection électrique, cette valeur ne constitue donc pas un seuil réel d'apparition de DP. On peut supposer que des DP de très petites amplitudes, inférieures au seuil de détection (<0,2pC), peuvent également exister en dessous de la TADP. Cela peut avoir des conséquences importantes sur la signification du courant moyen $\boldsymbol{I_{DP}}$. En effet, $\boldsymbol{I_{DP}}$ est calculé en faisant la somme de toutes les DP enregistrées, supérieures au seuil de 0,2 pC. Si de nombreuses petites DP d'amplitudes inférieures à ce seuil existent également et ne sont pas prises en compte, cela peut conduire à largement sous-estimer le courant moyen réel dû aux DP, particulièrement aux faibles valeurs de tensions appliquées, ainsi les seuils observés sur les caractéristiques $\boldsymbol{I_{PM}(V)}$ et $\boldsymbol{I_{DP}(V)}$ seraient différents.

Ceci pourrait être à l'origine de la variation différente observée pour $\boldsymbol{I_{PM}}$ et $\boldsymbol{I_{DP}}$. En effet, le PM utilisé avec une faible bande passante, contrairement à la mesure de DP, intègre la totalité de la lumière émise. Dans la plupart des mesures, le rapport $\boldsymbol{I_{PM}/I_{DP}}$ (Figure II - 19) prend une valeur élevée aux tensions proches de TADP, puis diminue et tend vers une valeur constante à haute tension (dans ce cas la lumière mesurée devient proportionnelle au courant de DP calculé). Ceci est cohérent avec la

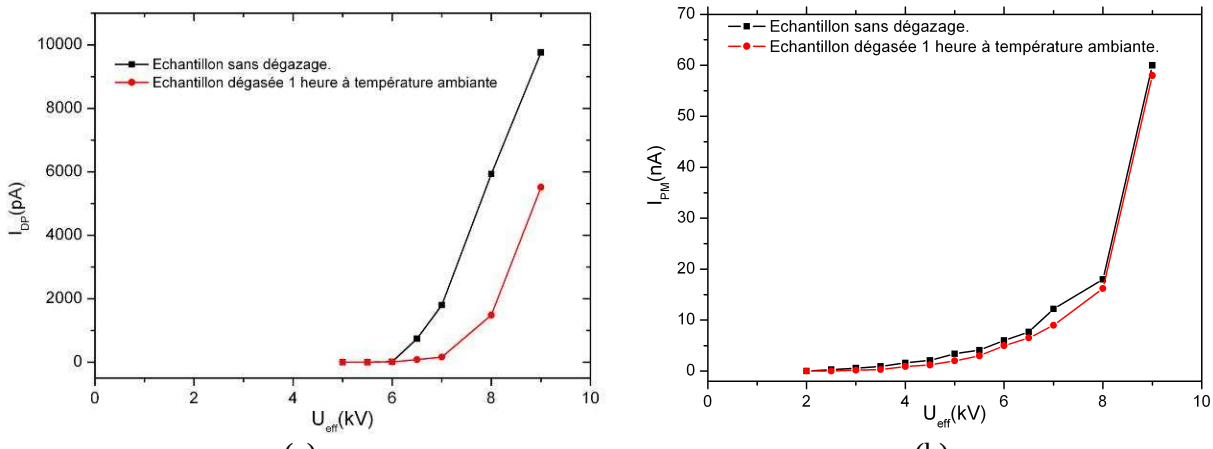
conclusion que I_{DP} serait largement sous-estimé aux tensions proches de TADP, si de nombreuses petites DP non mesurées existent. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre consacré aux mesures de spectrométrie diélectrique à haute tension (par son principe, ce type de mesure permet d'intégrer la totalité du courant dû aux pertes diélectriques et aux décharges partielles).

III.3. Influence du dégazage

L'objectif de ces essais est de vérifier l'influence du dégazage de l'objet en test sur le mécanisme de décharges. Des mesures ont été réalisées sur le substrat AlN5 plongé dans de l'huile silicone (Rhodorsil 47V20). Lors du premier essai, la cellule de mesure remplie d'huile silicone non dégazée est mise sous tension. La TADP a été identifiée à $5kV_{eff}$ (Figure II - 27). La tension a été limitée à $9kV_{eff}$, correspondant au régime de décharges « réversibles ». Dans ce régime, la présence de DP ne modifie pas de manière irréversible les propriétés de l'objet en test. Après le conditionnement sous vide pendant 1 heure (20°C, 10^{-2}mBar), on observe que I_{DP} diminue sensiblement (Figure II - 27 a). La diminution de la lumière émise est plus limitée (Figure II - 27-b). Les distributions restent similaires dans leurs formes (Figure II - 28). Le nombre de DP est nettement réduit (environ une décade après dégazage), alors que la charge varie peu (inférieures à une dizaine de pC).

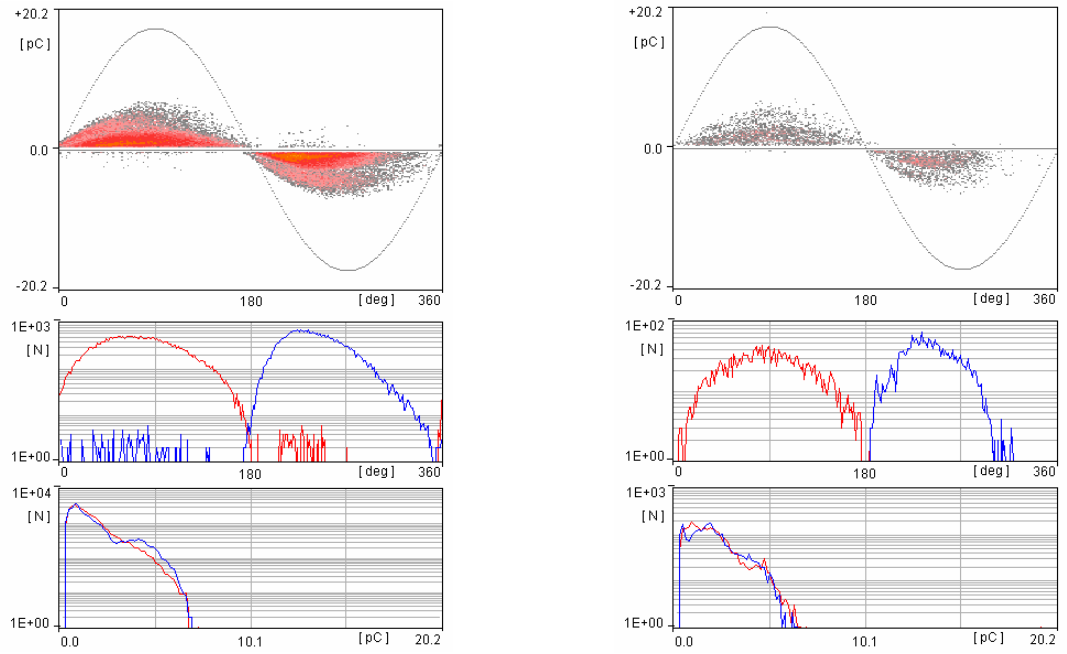
Le changement de niveau de I_{DP} est très probablement lié à la disparition de cavités gazeuses dans lesquelles les DP sont favorisées. Ces cavités pourraient se situer dans le liquide, mais également au sein de la céramique. En effet, la céramique réalisée par frittage présente une certaine porosité [70, 71]. Des observations réalisées par microscopie électronique ont en effet révélé des pores proches de la surface extérieure, avec des tailles de pores de l'ordre du µm (Figure II - 29). On peut supposer que la mise sous vide permet le remplissage par le liquide de pores proches de la surface extérieure, et débouchant sur cette surface.

La procédure de dégazage est donc nécessaire pour diminuer et stabiliser l'activité des DP, et celle-ci est donc systématiquement utilisée par la suite.



(a) (b)

Figure II - 27 : Influence du dégazage (20°C, 10^{-2}mBar) sur a : le courant de décharge I_{DP} et b : photo-courant. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, test 1 et test 2



(a) (b)

Figure II - 28 : Distribution des décharges sur le substrat sous différents conditions. a : sans dégazage (test1). b : dégazage 1 h à 20°C (test 2). Echantillon AlN5 dans l'huile silicone 47V20

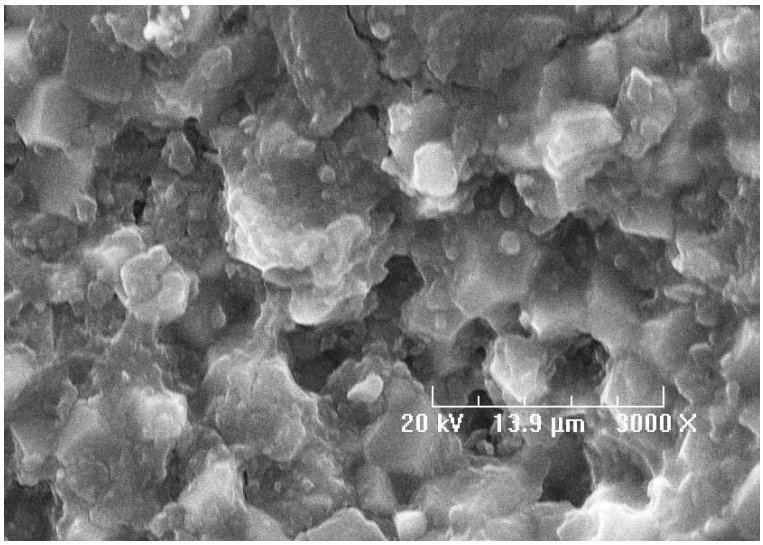


Figure II - 29 : Observation de la surface de l'AlN sous microscope électronique à balayage

III.4. Tentative « d'imprégnation » de la céramique

Les mesures précédentes ont permis de mettre en évidence une diminution sensible du niveau de DP quand le substrat est mis sous vide à température ambiante. Dans cette partie, nous avons tenté de voir si en adoptant une procédure plus efficace proche de celle employée pour l'imprégnation de condensateurs ou de câbles, il est possible d'obtenir une réduction encore plus importante du niveau de DP, ce qui pourrait avoir des conséquences intéressantes pour les applications. Pour cela, le substrat

AlN5 a été placé dans une huile silicone de faible viscosité (20ctS, Rhodorsil 47V20 ®), à chaud (150°C), et en réalisant des cycles de mise sous vide / pression atmosphérique. La Figure II - 30 montre qu'à 150 °C, la viscosité de l'huile chute à 4ctS, ce qui est très favorable pour sa pénétration dans des pores très fins. En outre, cette procédure sous température élevée permet d'éliminer l'eau éventuellement présente.

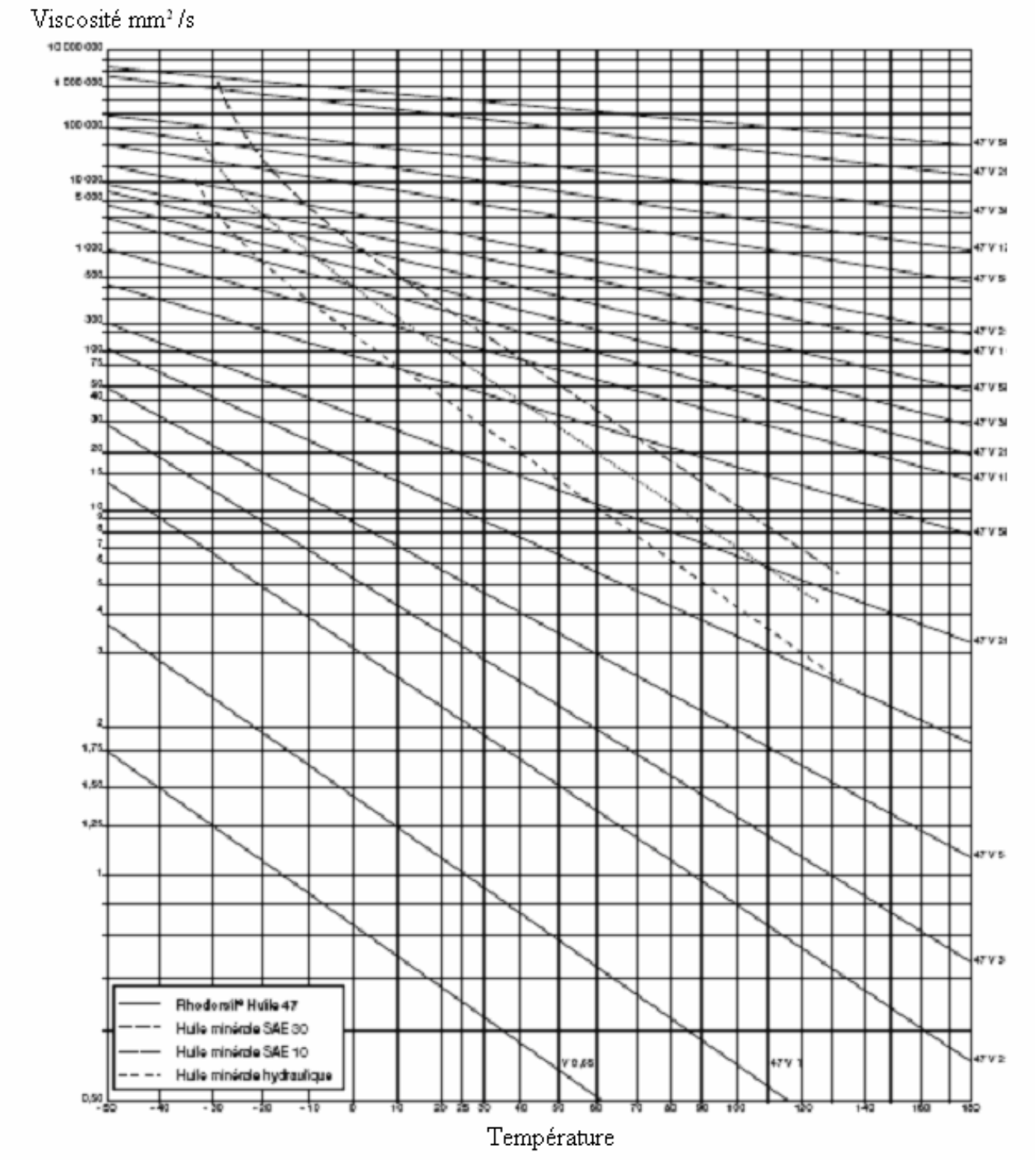


Figure II - 30 : Variations de la viscosité en fonction de la température pour les huiles Rhodorsil type 47V [61]

La loi de variation de la viscosité entre -50°C et +250°C pour les huiles 47V20 à 47V1000 est donnée par :

$$\eta = \eta^{O} \exp[B(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^{\circ}})] \qquad \textbf{(Eq. I - 15)}$$

$\eta_{[mm^2/s]}$: viscosité du liquide à la température T.

η^O : viscosité du liquide à 25°C

T : température en K.

T^O : 298 K

B : 1683 K.

La cellule a été initialement dégazée à température ambiante pendant 1h avant le premier test. Ensuite, un dégazage à 150°C a été effectué, et le niveau de DP a été contrôlé périodiquement. Les mesures de DP ont été réalisées à température ambiante en refroidissant l'échantillon. La TADP reste stable pendant ces essais (Figure II - 31). Par contre, le conditionnement réalisé provoque une diminution sensible de l'intensité du courant de décharges $\boldsymbol{I_{DP}}$. La distribution des charges résolue en phase (Figure II - 33) montre que le dégazage à chaud à pour effet de diminuer fortement le nombre de décharges (d'environ un ordre de grandeur). Par contre, la charge maximale mesurée évolue peu ; elle reste autour de 5 à 7pC. La forme de la distribution reste relativement stable quel que soit le test. La diminution la plus importante est observée lors du traitement initial (1h @ 20°C, Figure II - 27), suivi du traitement à chaud (1h @ 150°C), et elle ralentit ensuite nettement. La lumière émise par l'échantillon varie moins, comme dans les mesures précédentes (Figure II - 32).

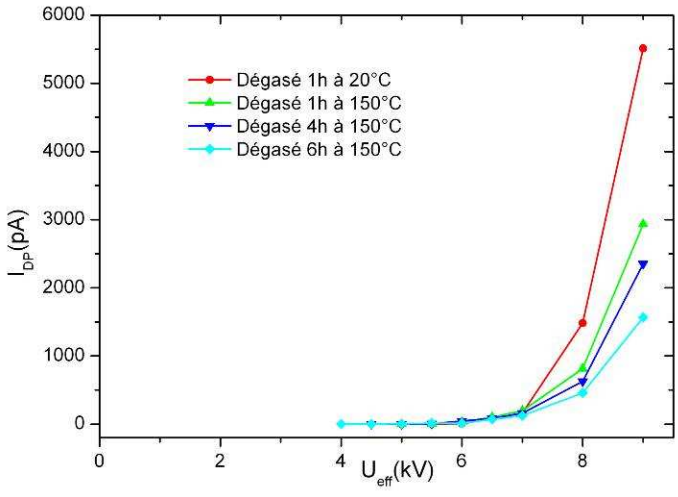


Figure II - 31 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée sous l'influence du dégazage à haute température. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, conditionné à 150°C

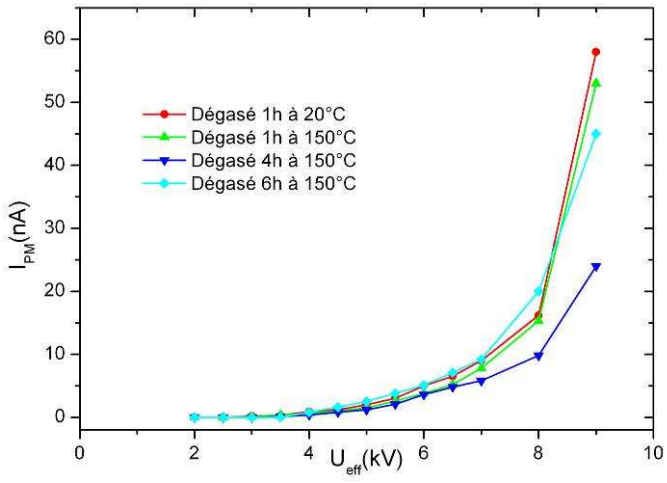
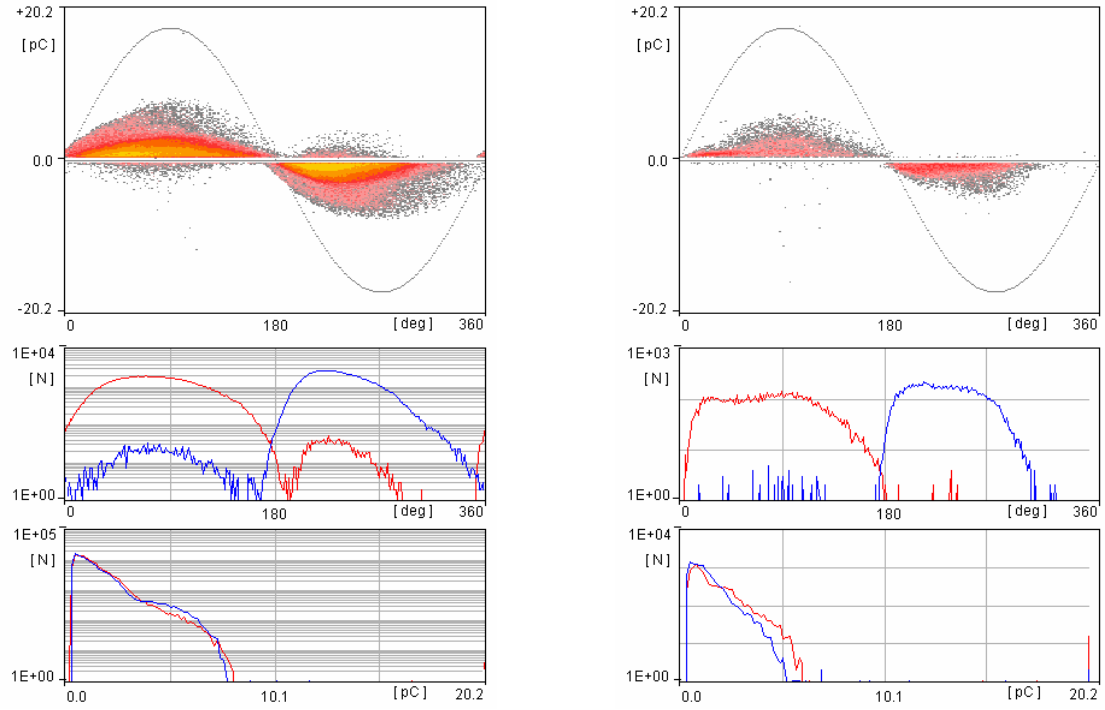


Figure II - 32 : Evolution du photo-courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée sous l'influence du dégazage à haute température. Echantillon AlN 5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20, conditionné à 150°C



(a) (b)

Figure II - 33 : Distribution des décharges à 8kV_{eff}, a : après 1h de dégazage à 20°C et b : 6h de dégazage à 150°C. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone 47V20

Ces essais montrent qu'une procédure d'imprégnation efficace permet de diminuer nettement le niveau de DP : I_{DP} à 9kV passe de 10nA (Figure II - 27) à 1,5nA à la fin du traitement (Figure II - 31). Il n'est toutefois pas possible d'éliminer totalement les DP, ni de faire baisser leur valeur maximale. Pour des raisons pratiques, nous avons conservé la procédure initiale (1h sous vide à 20°C) dans tous les essais.

III.5. Reproductibilité

De nombreuses séries de mesures ont été répétées plusieurs fois pour vérifier la reproductibilité de nos résultats. Par exemple, pour le substrat AlN5 recouvert d'huile silicone Rhodorsil 47V20 et dégazé une heure à 150°C, trois séries de mesures ont été effectuées : une immédiatement après le dégazage, puis 1 heure et 16 heures plus tard. L'échantillon est mis hors tension entre les différentes mesures.

Nous donnons l'évolution du courant de décharges $\boldsymbol{I_{DP}}$ (Figure II - 34) et du photo-courant $\boldsymbol{I_{PM}}$ (Figure II - 35) en fonction de la tension appliquée au cours des essais. La TAPD augmente peu entre les trois tests, elle passe de $4kV_{eff}$ pour les deux premiers essais à $4,5kV_{eff}$ pour la dernière série de mesures. Le courant moyen des décharges reste stable au cours du temps. La distribution des décharges ne varie pas (Figure II - 36).

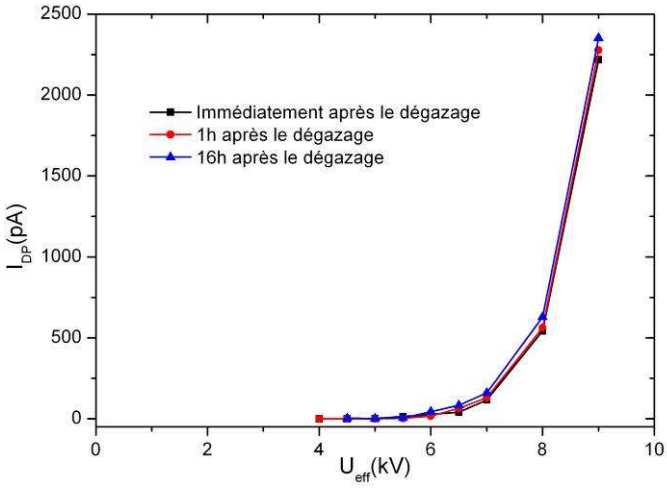


Figure II - 34 : Evolution du courant de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée au cours des essais. Echantillon AlN5 dans 47V20, test 6, 7 et 8

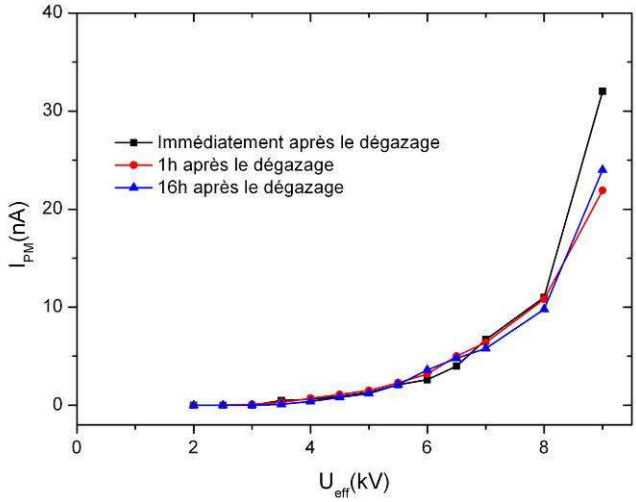
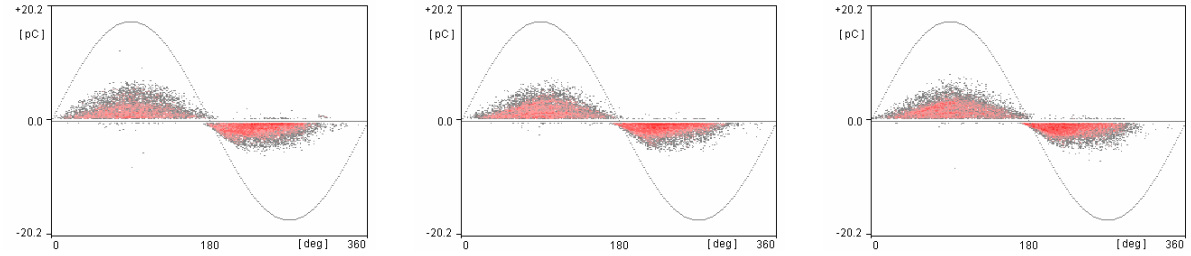


Figure II - 35 : Evolution de photo-courant I_{PM} au cours des essais. Echantillon AlN5 dans 47V20 – Test 6, 7 et 8

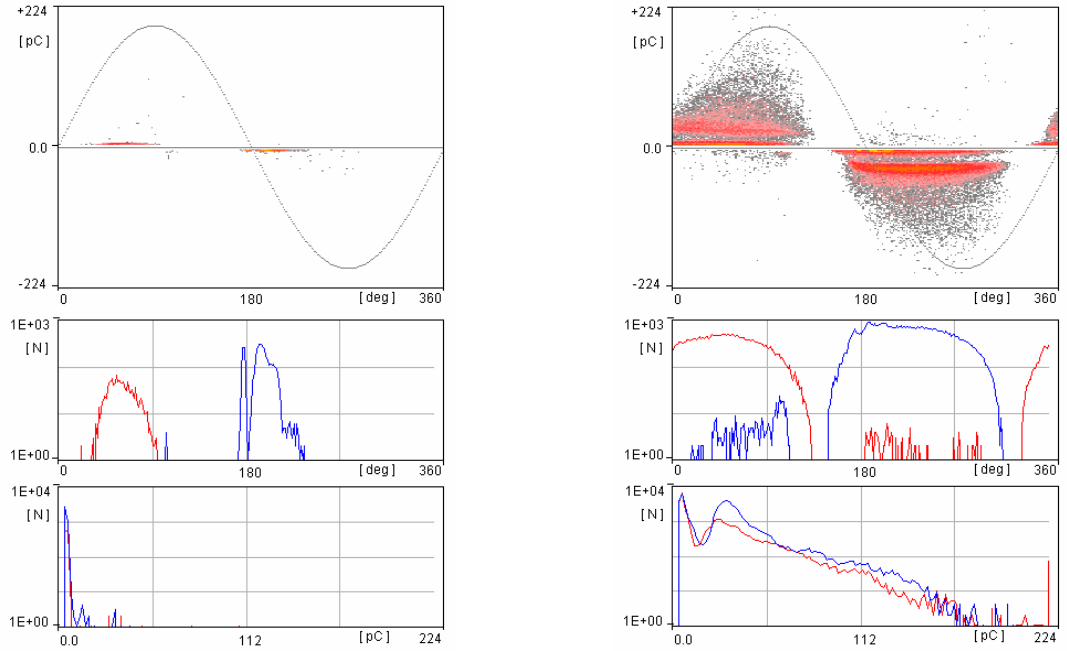


(a) Test 6 (b) Test 7 (c) Test 8

Figure II - 36 : Evolution de la distribution des décharges à 8kV$_{eff}$ au cours des trois essais : a : immédiatement après le dégazage, b : 1 heure après le dégazage et c : 16 heures après le dégazage. Mesures effectuées à température ambiante. Echantillon AlN5 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V20 – Test 6, 7 et 8

III.6. Dégradations irréversibles

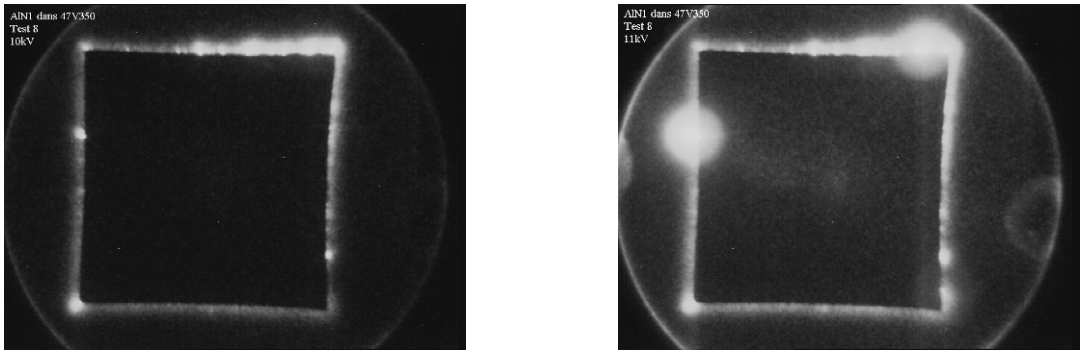
Sur l'échantillon AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, la transition entre les petites DP précédentes (< 10pC) très stables et reproductibles, et des grandes DP est mise en évidence entre 10 et 11 kV (Figure II - 37). La charge augmente considérablement et devient supérieure à 100pC. Ceci est corrélé à l'apparition de quelques taches lumineuses très intenses (Figure II - 38-b) au bord de l'électrode.



(a) (b)

Figure II - 37 : Distribution des DP a : 10kV$_{eff}$ et b : à 11kV$_{eff}$. Echantillon AlN1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, test 8

La mesure ultérieure de $\boldsymbol{I_{DP}}$ (test 9, Figure II - 39) montre que la TADP diminue fortement après l'observation des spots lumineux ; elle passe de 3 kV_{eff} à 2,3 kV_{eff}. La dégradation constatée pendant le test 8 est donc irréversible. Les mesures de $\boldsymbol{I_{PM}}$ (Figure II - 40) le confirment, les photo-courants augmentent considérablement. Entre 10kV et 11kV nous pouvons conclure qu'un seuil de dégradation irréversible est mis en évidence. Le même type de comportement avait été observé par DO [6] avec des substrats d'AlN recouverts de gel silicones. L'origine de la dégradation (céramique ou huile) n'est pas facilement identifiable. Cependant, le liquide possédant un caractère « auto-cicatrisant » (contrairement à un gel), la céramique serait dégradée de manière irréversible par les grandes décharges observées. L'augmentation considérable de lumière émise montre également que les défauts créés sont localisés à proximité de la surface extérieure de la céramique.



(a) (b)

Figure II - 38 : Lumière émise par l'objet pour a : 10kV_{eff} et b : 11kV_{eff}. Echantillon AlN 1 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 – Test 8

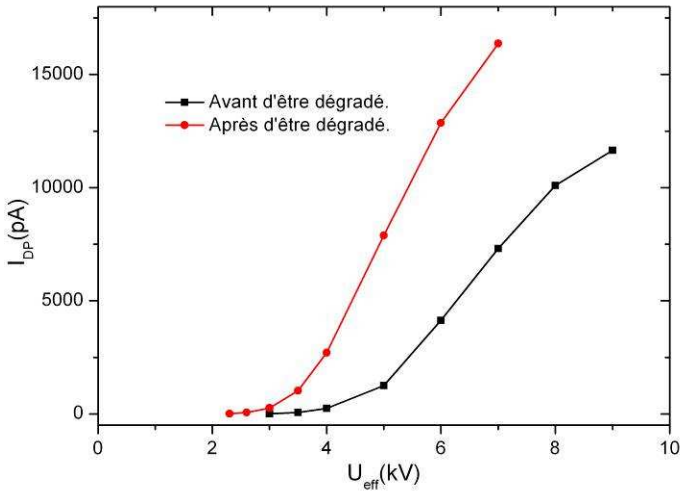


Figure II - 39 : Evolution du courant de décharges sur le substrat AlN1 en fonction de la tension appliquée avant et après dégradation. Echantillon. AlN1 – Test 7 et 9

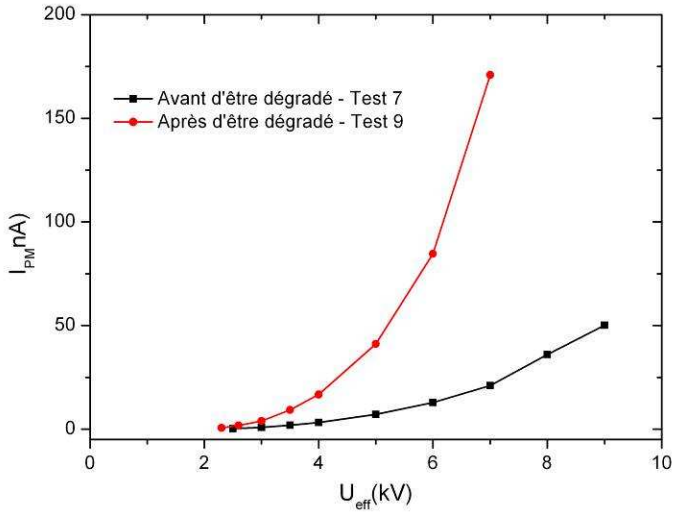
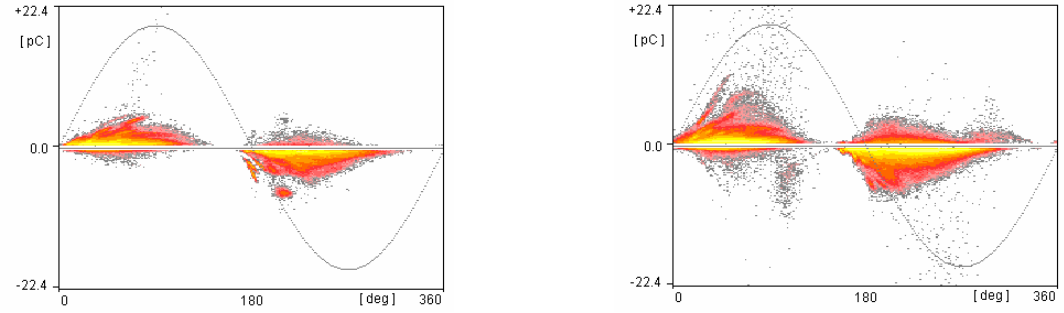


Figure II - 40 : Evolution du photo–courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée sur le substrat avant et après dégradation. Echantillon AlN1 – Test 7 et 9



(a) (b)

Figure II - 41 : Distribution des décharges sur le substrat à 7kV_{eff} avant (a) et après (b) dégradation. Echantillon AlN 1 - Test 7 et test 9.

III.7. Influence de la température.

Le paramètre température n'a pas été étudié de manière systématique dans ce travail. Nous présentons ici quelques mesures réalisées dans le domaine des basses températures. Ces essais ont été réalisés pour fournir une base de comparaison à des essais identiques visant à mesurer le comportent d'un gel silicone à très basse température (application à l'aéronautique).

La cellule de test composée du substrat d'AlN et de l'huile silicone (Baysilone PD5 ® ou Rhodia D5, viscosité 5 cSt) a été mise dans une enceinte climatique, dans laquelle la température est ajustable sur la plage -70°C à 20°C. Des mesures préliminaires avec un thermocouple ont permis de constater que la thermalisation de la cellule à -60°C, nécessite 1h. Seules des mesures de DP électriques ont pu être réalisées dans cette enceinte.

L'évolution du courant de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée à différentes températures entre -50°C et +20°C sur deux échantillons (AlN-S_1 et AlN-S_2) est représentée sur les

Figure II - 42 et Figure II - 43. Ces deux échantillons correspondent à un « bon » substrat (AlN-S_2, $\boldsymbol{I_{DP}}$ < 1nA) et à un substrat avec un courant plus élevé (AlN-S_1, $\boldsymbol{I_{DP}}$ >10nA). La température a très peu d'effet sur la TADP, et son influence sur le courant $\boldsymbol{I_{DP}}$ est faible et contradictoire (augmentation à basse température sur S_2, et diminution sur S_1). Ces mesures soulignent une nouvelle fois la dispersion de comportement entre les substrats. L'effet inversé de la température met toutefois en évidence le fait que des mécanismes de DP d'origines différentes existent probablement dans les « bons » et les « mauvais » substrats. Entre 20 °C et -50°C la viscosité de l'huile augmente d'un facteur 10 (Figure II - 30), ceci indique que la viscosité a très peu d'effet sur le régime de DP. Ceci rejoint les observations réalisées avec des huiles beaucoup plus visqueuses comme la 47V350 (350 cSt). Ces conclusions sont à rapprocher de celles de DO [6] qui a montré que pour des substrats immergé dans un gel, l'effet de la température est négligeable entre 20°C et 180°C.

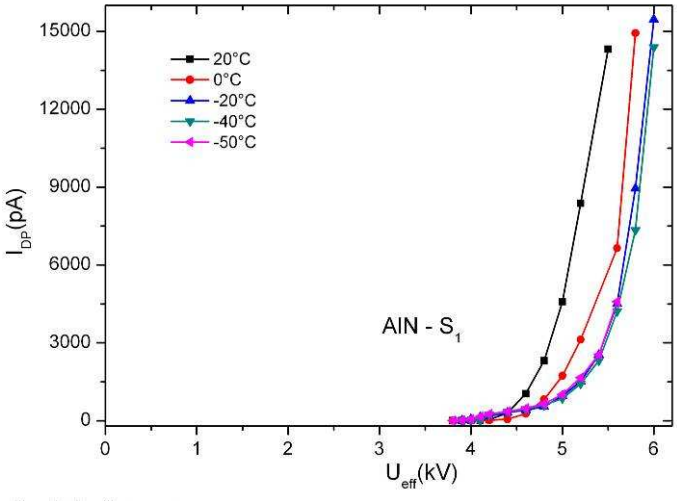


Figure II - 42 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée à différentes températures de 20°C à -50°C. Echantillon AlN-S_1 dans l'huile silicone Baysilone PD5

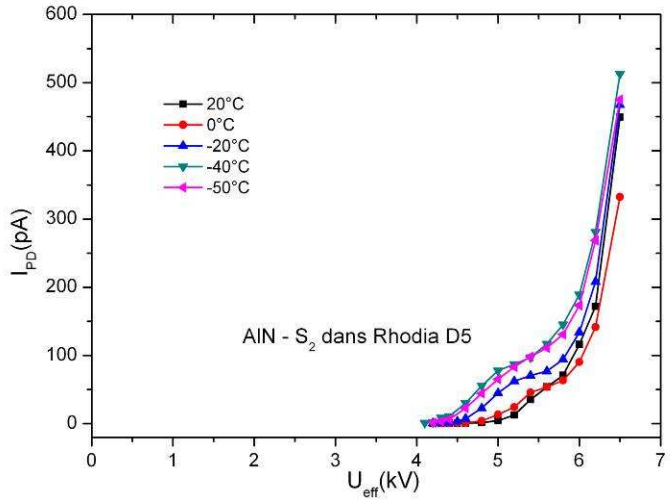


Figure II - 43 : Evolution du courant de décharges partielles I_{DP} en fonction de la tension appliquée à différentes température de 20°C à -50°C. Echantillon AlN – S_2 dans l'Huile Rhodia D5

III.8. Discussion : comparaison avec les mesures dans le gel silicone et origine des DP

Dans son étude des substrats enrobés de gel silicone, M. T. Do [6] avait observé trois régimes différents, et proposé les hypothèses suivantes :

- en dessous de TADP : émission de lumière due à l'électroluminescence du substrat ;

- au dessus de TADP : décharges partielles « réversibles » de petites amplitudes (<10pC), attribuées à l'apparition de « streamers lents » dans le gel (cavités de quelques µm) ;

- à partir d'un seuil de tension (environ $10kV_{max}$) : décharges partielles de grandes amplitudes (>100pC) créant des dégradations irréversibles, attribuées à des streamers filamentaires rapides dans le gel.

Les mesures réalisées ici avec de l'huile silicone sont pratiquement identiques à celles que M. T. Do [6] avait obtenues dans les mêmes conditions avec du gel silicone. L'amplitude des DP, leur répartition, et la lumière émise sont similaires. Ceci montre que le mécanisme de décharge est très peu influencé par la nature du matériau d'enrobage, ce qui contredit les mécanismes proposés par Do :

- un matériau est auto-cicatrisant (huile silicone), et pas l'autre (gel silicone). Dans le gel en géométrie pointe-plan, DO a montré que la présence de DP conduit très rapidement à l'apparition de micro-cavités permanentes. Ce n'est pas le cas dans les liquides, ou les DP génèrent des cavités d'une durée de vie de quelques µs [72]. Le fait que les DP « réversibles » ne soient pas affectées par la nature du matériau d'encapsulation met en doute l'hypothèse que ces DP ont effectivement lieu dans le matériau d'encapsulation. De plus les DP sur les substrats sont très stables, contrairement à celles mesurées en géométrie pointe-plan dans le gel. Nous verrons dans le chapitre suivant que les DP en géométrie pointe-plan dans l'huile silicone sont également très différentes de celles observées sur les substrats ;

- si la lumière émise en dessous de TADP est due seulement à l'électroluminescence des matériaux (mécanisme de nature différente d'un mécanisme de décharge), il est étonnant de constater qu'il n'existe aucune discontinuité sur la courbe de lumière émise en dessous et au dessus de la TADP. Etant donné que la valeur de TDAP est déterminée par le bruit de fond de la mesure (0,2pC), on peut également supposer qu'il peut exister des DP de très petites amplitudes en dessous de TADP (<0,2 pC, non mesurées), qui pourraient également provoquer une émission de lumière. Nous verrons dans la partie suivante que la lumière mesurée dans le cas des substrats AlN dans l'huile silicone n'est pas uniquement due à des DP;

- l'influence de la mise sous vide montre que des DP peuvent exister dans des pores à la surface de la céramique, à proximité de la zone du point triple. Etant donné que l'AlN possède une certaine transparence (Figure II - 17), cela suggère que des DP pourraient également exister à

l'intérieur de la céramique en raison de sa structure frittée (présence de pores), et être observées jusqu'à des profondeurs de plusieurs dizaines de µm. Ce mécanisme permettrait également d'expliquer la grande homogénéité de la répartition de la lumière sur les « bons » substrats, ainsi que la stabilité inhabituelle des DP (un matériau céramique étant beaucoup moins dégradé par les DP qu'un polymère ou un liquide).

Nous verrons dans la suite que l'ensemble des autres mesures réalisées (influence de la nature du solide, du liquide) convergent pour valider l'hypothèse de décharges internes à l'AlN, qui n'avait pas été envisagée précédemment, et sur laquelle il n'existe aucune référence bibliographique.

Etant donné l'intérêt de la mesure optique pour détecter des DP de faible intensité avec une onde de tension de forme quelconque (ce qui n'est pas possible par mesure électrique), nous avons étudié plus en détail cette émission de lumière dans le paragraphe qui suit.

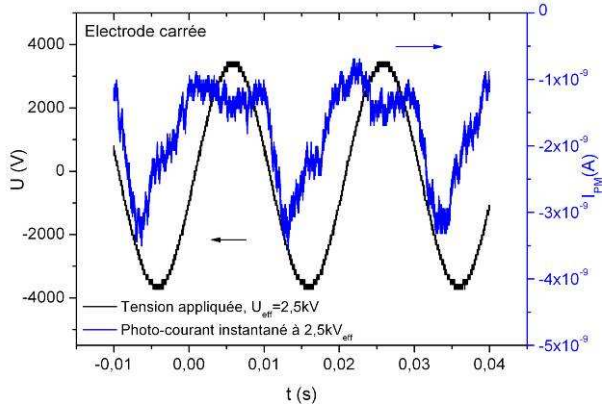
IV. Mesures temporelles de l'émission de lumière par un substrat d'AlN sous tension alternative, impulsionnelle et continue

Jusqu'à présent, les mesures optiques ont consisté à mesurer la quantité moyenne de lumière émise, en intégrant le signal du photomultiplicateur avec une constante de temps longue (2s), et en réalisant un moyennage numérique de nombreux enregistrements. Ceci offre l'avantage de réaliser des mesures avec une grande sensibilité, proche du bruit de fond du PM. Dans cette partie, nous avons réalisé des mesures en diminuant le temps d'intégration du PM, ce qui permet de distinguer les phénomènes se produisant durant les deux alternances sous tension alternative, ou pendant les fronts de montée sous tension impulsionelle. Des mesures ont été réalisées avec des échantillons en forme de « peigne » pour maximiser la longueur de la zone d'émission de lumière (bord d'électrode).

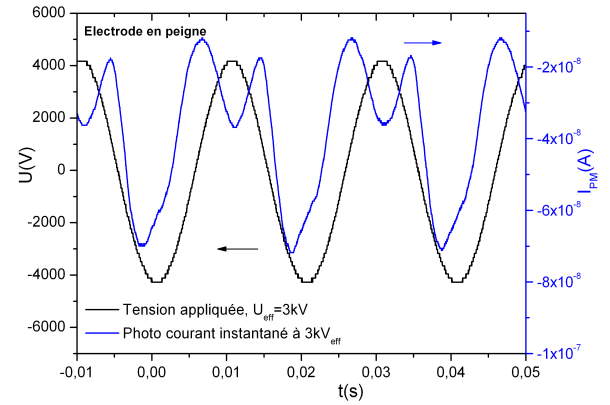
IV.1. Mesures sous tension alternative

L'évolution temporelle du photo-courant du substrat AlN8 (électrode de forme carrée) pour différentes tensions est donnée sur la Figure II - 44 - a, et celle du substrat AlN SD (électrode de forme de « peigne ») sur la Figure II - 44 - b. Le photo-courant délivré par le PM est de signe négatif. Le substrat en forme de peigne présente logiquement une émission de lumière plus élevée. Dans tous les cas, une forte dissymétrie de l'émission lumineuse est observée : la lumière émise lors de l'alternance négative est plus importante que lors de l'alternance positive. Pendant l'alternance positive, la lumière est pratiquement en phase (légèrement en avance) par rapport à la tension, de manière comparable aux décharges partielles. En polarité négative, l'émission de lumière est nettement en avance de phase par rapport à la tension : son maximum est généralement situé au passage par zéro de la tension, c'est-à-dire quand le dV/dt est maximum. Ceci ne correspond pas à l'enregistrement des DP, généralement

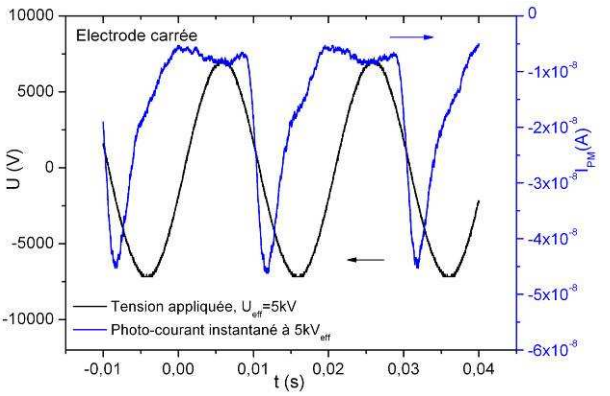
symétrique entre les deux alternances. Ceci montre que l'émission de lumière n'est pas simplement reliée à l'activité des DP, et que d'autres phénomènes interviennent dans le processus d'émission de lumière. La Figure II - 45 montre la différence entre les valeurs maximum du photo-courant mesuré pendant les deux alternances.



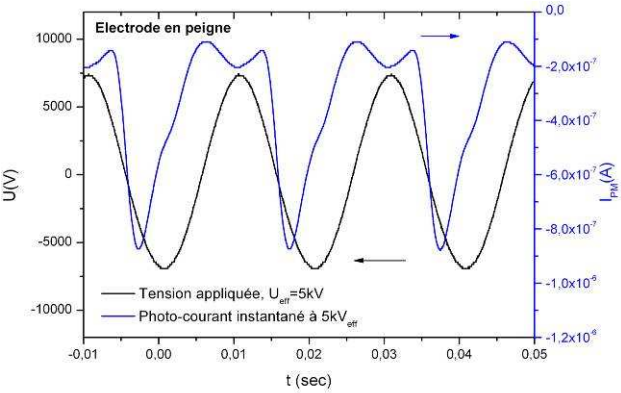
(a1) – $2.5kV_{eff}$ < TADP



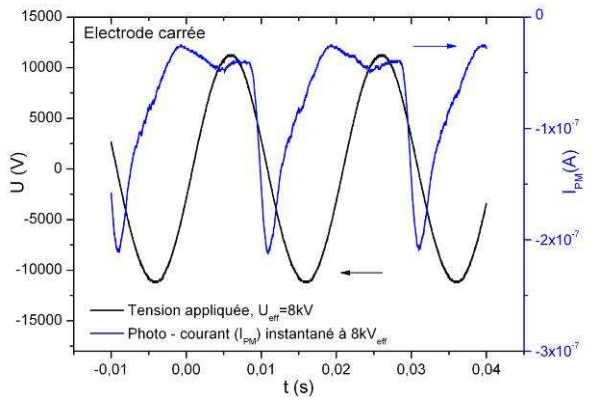
(b1) – $3kV_{eff}$ < TADP



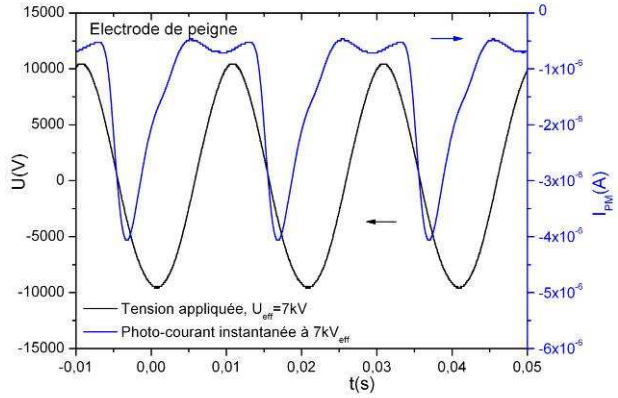
(a2) – $5kV_{eff}$ ≈ TADP



(b2) – $5kV_{eff}$ ≈ TADP



(a3) – $8kV_{eff}$ > TADP



(b3) – $8kV_{eff}$ > TADP

Figure II - 44 : Forme du photo-courant instantané sur le substrat AlN8 (électrode carrée – colonne a) et sur le substrat AlN – SD (électrode en forme de « peigne » - colonne b) dans l'huile 47V350 (moyenne de 200 enregistrements)

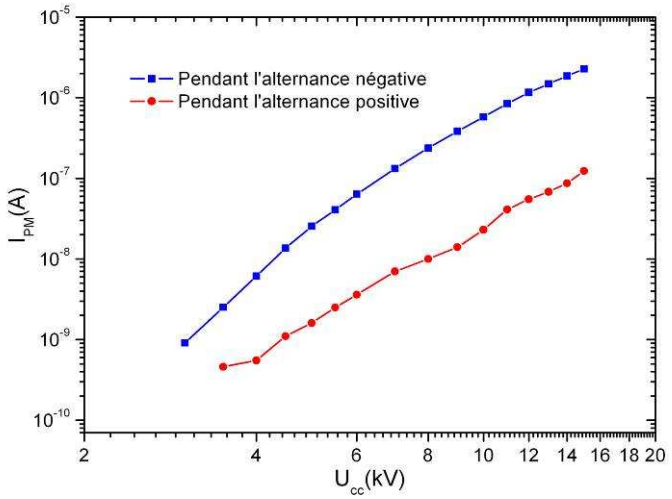


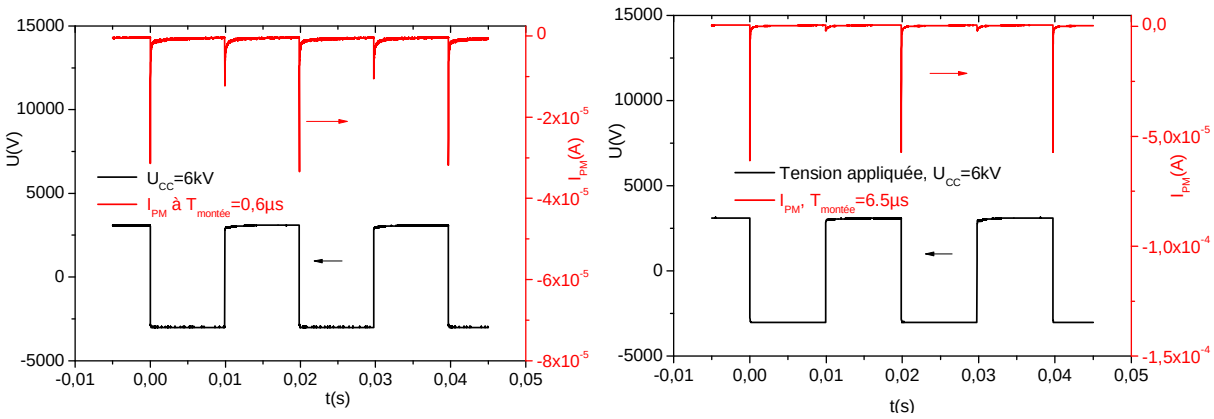
Figure II - 45 : Evolution de la valeur maximale du photo-courant pendant les alternances positive et négative. Echantillon AlN-SD d'électrode en forme de « peigne » dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350.

IV.2. Mesures sous tension impulsionnelle

La Figure II - 46 montre l'évolution temporelle du photo-courant mesuré sur l'échantillon AlN-SD (peigne) sous tension carrée bipolaire 6 kV_{cc} à 50Hz. Le temps de montée varie entre 600ns et 4,3 ms. Dans tous les cas, l'émission est maximum pendant le dV/dt négatif. La valeur instantanée du photo-courant, considérablement plus élevée que sous tension alternative, est d'autant plus élevée que le temps de montée est court. Avec le temps de montée le plus élevé, soit 4,3ms, la réponse du PM se rapproche de celle obtenue en sinusoïdal. La Figure II - 47 montre la forme du signal du PM enregistré pendant le temps de montée de la tension. Dans des conditions identiques, la forme et l'intensité du signal sont nettement différentes pendant les dV/dt négatifs et positifs, ce qui montre que les mécanismes d'émission de lumière sont différents dans les deux cas.

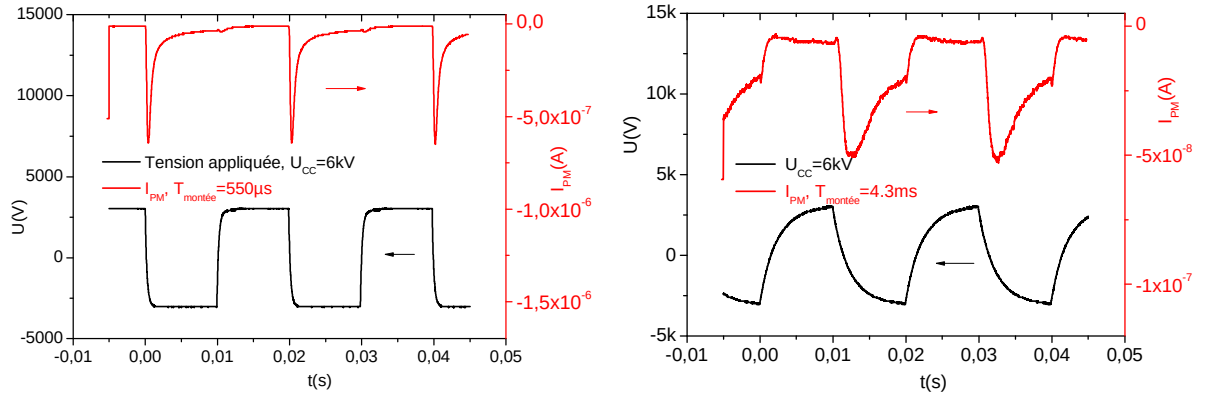
En polarité positive, l'émission de lumière (beaucoup plus faible) se produit plutôt pendant le palier de tension, alors que dans l'autre polarité elle se produit essentiellement pendant le dV/dt négatif.

La Figure II - 48 montre les valeurs maximales du courant du PM (I_{PMmax}) en fonction de la tension pour les différents temps de montée. Il existe pratiquement une décade de différence entre les courants mesurés pendant les deux polarités (sauf pour le temps de montée le plus long 4,3 ms), et la valeur maximum du courant augmente d'environ quatre décades quand $t_{montée}$ décroit de trois décades (4,3ms à 6,5 µs). Le courant moyen I_{PM} (qui intègre toute la lumière en polarité positive et négative) (Figure II - 49) augmente de presque une décade entre 4,3 ms à 6,5 µs, ce qui montre que l'émission de lumière est globalement favorisée avec des temps de montée courts.



(a) $T_{montée}$ = 0.6µs

(b) $T_{montée}$ = 6.5µs



(c) $T_{montée}$ = 550µs

(d) $T_{montée}$ = 4.3ms

Figure II - 46 : Photo-courant instantané sous tension impulsionnelle à 6kV$_{CC}$, 50Hz, pour différents temps de montée (moyenne de 200 enregistrements). Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350

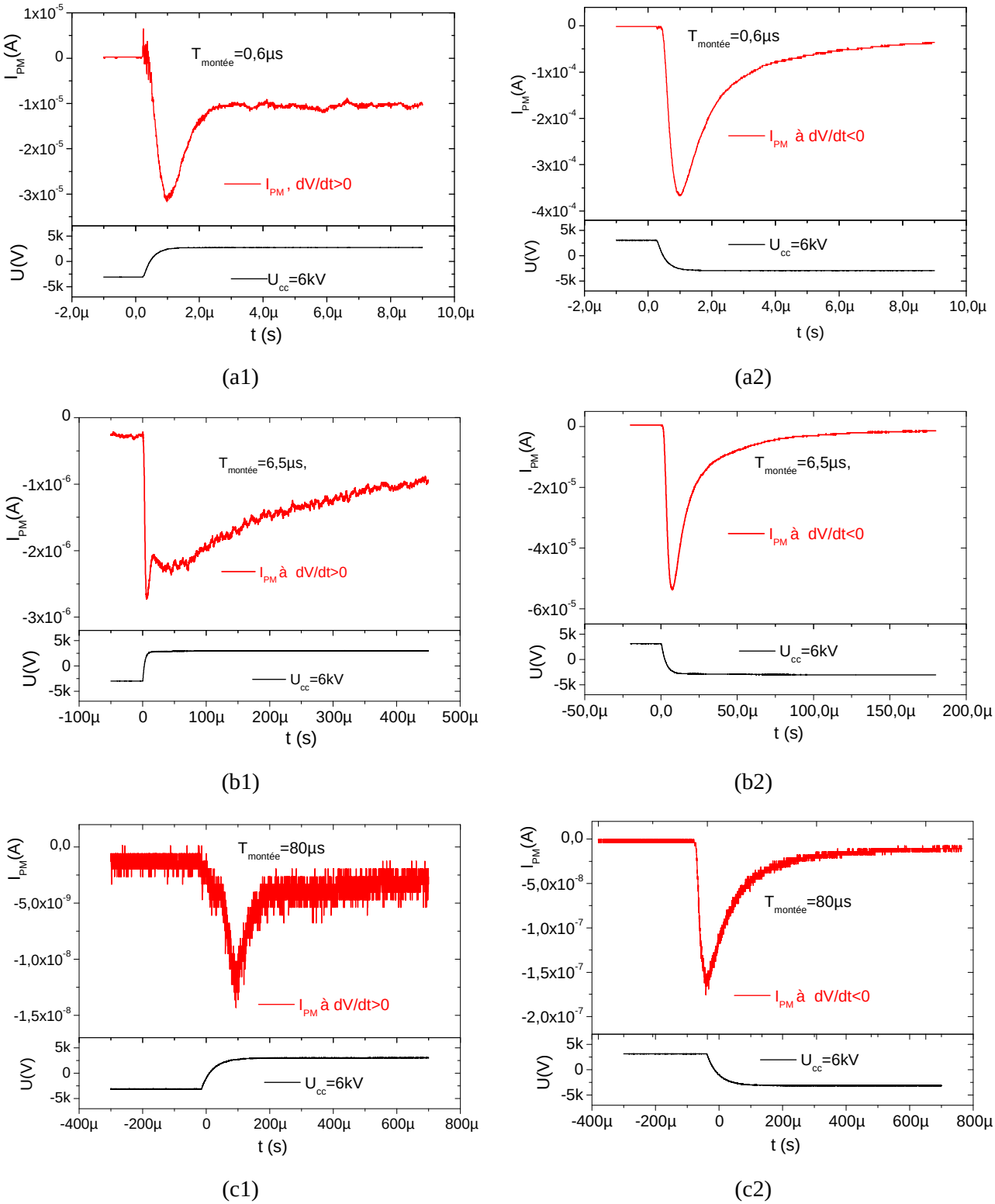


Figure II - 47 : Photo-courant instantané sous tension impulsionnelle à 6kV$_{CC}$, 50Hz, pour différents temps de montée. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (moyenne de 200 enregistrements). a : T$_{montée}$= 0.6µs, résistance de charge de 1kΩ. b : T$_{montée}$ =6.5µs, résistance de charge de 10kΩ. c : T$_{montée}$=80µs, résistance de charges de 100kΩ

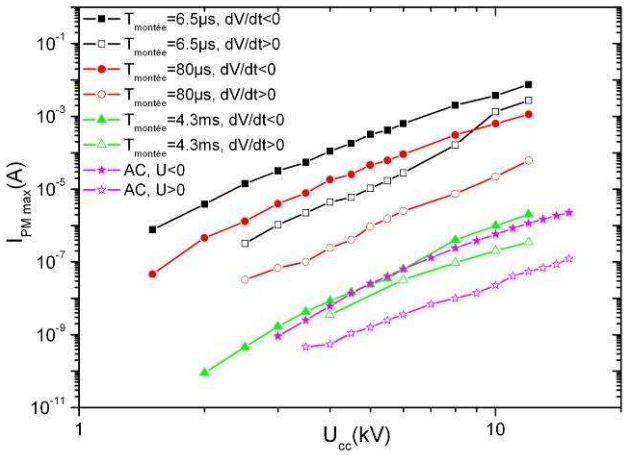


Figure II - 48 : Intensité maximale du photo-courant I_{PMmax} pendant le dV/dt en fonction de la tension appliquée pour différents temps de montée sous tension impulsionnnelle et AC à 50Hz. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone 47V350

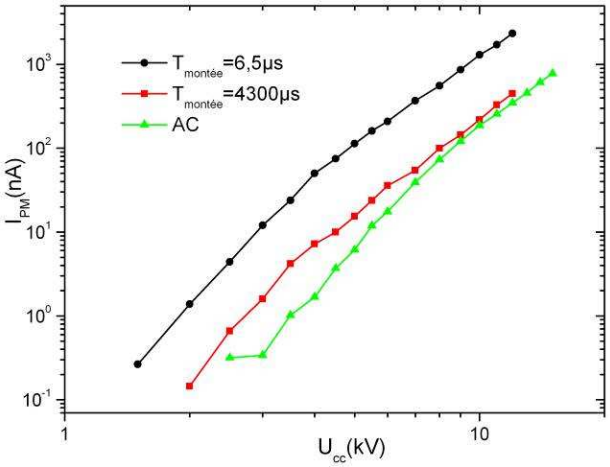


Figure II - 49 : Intensité moyenne du photo-courant I_{PM} en fonction de la tension appliquée pour différents temps de montée. Forme de la tension : AC ou impulsionnelle. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350

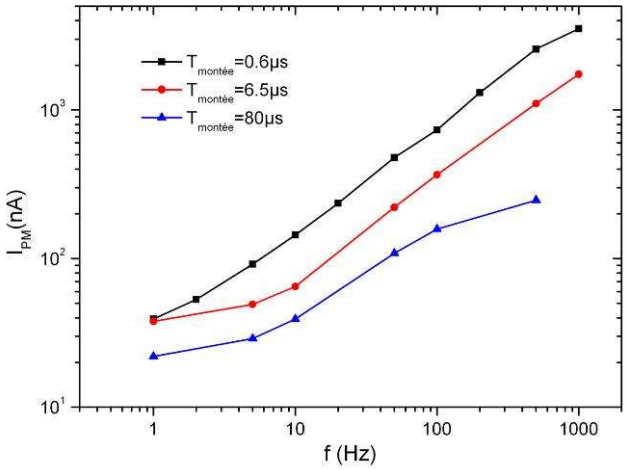


Figure II - 50 : Variation fréquentielle du photo-courant I_{PM} à différents temps de montée à 6kV$_{cc}$ sous tension impulsionnelle. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350

La valeur moyenne du photo-courant à $6kV_{CC}$ en fonction de la fréquence entre 1Hz et 1kHz est présentée sur la Figure II - 50. Le photo-courant détecté par le PM est d'autant plus élevé que la fréquence est grande. L'augmentation du temps de montée induit une diminution de lumière, ce qui est cohérent avec ce qui précède.

Une tension continue de +3kV et -3kV superposée à la tension impulsionnelle bipolaire (de temps de montée 6.5µs) n'a aucune influence sur l'émission de lumière (Figure II - 51). Ce résultat est cohérent avec le fait que la lumière est émise essentiellement pendant les dV/dt négatifs, et est comparativement beaucoup plus faible (voire négligeable) sous tension constante.

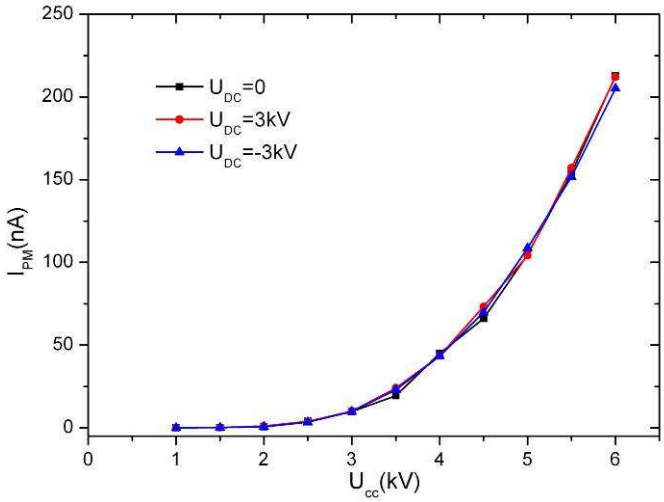


Figure II - 51: Réponse du PM sous contrainte impulsionnelle (50Hz t_r=6,5µs) avec superposition d'une composante continue. Echantillon AlN-SD (électrode en forme de « peigne ») dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350

IV.3. Commentaires sur les mesures d'émission de lumière avec un substrat d'AlN

Les mesures réalisées dans cette partie mettent en évidence le fait que l'émission de lumière par un substrat d'AlN recouvert d'huile silicone n'est pas simplement corrélée à l'existence de décharges partielles :

- sous tension alternative, une large dissymétrie existe entre les deux polarités, alors que les mesures de DP sont généralement symétriques ;

- sous tension alternative, une émission de lumière intense est observée pendant le dV/dt négatif, avec une position dans la phase qui n'est pas corrélée aux décharges partielles ;

- les mesures sous tension impulsionnelle montrent également une large dissymétrie, que ce soit sur l'intensité ou sur la variation temporelle de l'émission de lumière (Figure II - 47).

La corrélation entre les DP et l'émission de lumière (Figure II - 26) montre qu'une partie de la lumière émise provient bien des décharges partielles, mais il existe clairement un autre mécanisme d'émission. Cette émission de lumière est très probablement liée à l'électroluminescence du matériau AlN, et peut être également influencée par la présence de nombreuses autres espèces chimiques dans les substrats frittés, tel que Y2O3- CaO [73, 74]. En effet, l'AlN est un matériau semiconducteur à grand gap (6,2 eV), et ses propriétés d'électroluminescence ont été reportées soit sur des mono-cristaux d'AlN [57], soit sur des poudres [56], dans diverses géométries du champ électrique. Ce matériau sous formes d'alliages avec d'autres espèces fait l'objet de nombreuses études pour réaliser des diodes électroluminescentes UV [75]. Des mesures de lumière réalisées sur des poudres mettent en évidence des propriétés lumineuses proches de celles observées ici : lumière émise essentiellement pendant les dV/dt négatifs [56].

Il est intéressant de remarquer que même si différents mécanismes d'émission de lumière existent dans les deux polarités, les variations d'intensité en fonction de la tension ont une forme comparable dans tous les cas (Figure II - 48).

Dans son étude réalisée avec un gel silicone, Do [6] avait fait l'hypothèse que la lumière pouvait provenir de l'électroluminescence de l'AlN en dessous de TADP, et des décharges partielles dans le gel au dessus de TADP. Les mesures présentées dans les parties suivantes montrent que ces hypothèses ne sont pas correctes :

- les mesures réalisées avec divers matériaux d'encapsulation au chapitre III confirmeront le fait que les DP mesurées se produisent en réalité dans la céramique, et non pas dans le matériau d'encapsulation ;

- les essais réalisés dans le paragraphe suivant sur un autre matériau (Al_2O_3) de structure comparable (céramique frittée) ne présentant pas de propriétés d'électroluminescence suggèrent que des DP de très petites amplitudes sont également à l'origine de la lumière mesurée en dessous de TADP.

V. Caractérisation des décharges partielles et de l'émission lumineuse sur des substrats d'Al_2O_3 dans l'huile silicone

Dans le but d'étudier l'influence de la nature du substrat sur l'activité des décharges partielles et de l'émission de lumière, nous avons réalisé un certain nombre de mesures complémentaires dans l'huile silicone 47V350 sur deux autres matériaux :

- l'alumine (Al_2O_3), matériau céramique disponible dans une forme identique à l'AlN (substrat métallisé d'épaisseur 630 µm);

- un composite verre / époxy (circuit imprimé double face), de nature complètement différente (matrice polymère).

V.1. « Bon » et « mauvais » substrats d'Al_2O_3.

Deux types d'échantillons d'Al_2O_3 ont été testés : électrode haute tension de forme carrée (Al_2O_3 – S1 et S3), et en forme de peigne (Al_2O_3 – S2). Le protocole de mesures est identique à celui utilisé sur les substrats d'AlN. Quoique beaucoup moins nombreux, les résultats indiquent aussi deux « catégories » de substrats « bons » et « mauvais ».

La Figure II - 52 présente l'évolution du courant moyen de décharges $\boldsymbol{I_{DP}}$ sur deux substrats :

- le substrat Al_2O_3 – S1 (« mauvais » substrat) montre des grandes décharges (jusqu'à 90pC à $6kV_{eff}$-Figure II - 53 - a) et un courant moyen de décharges élevé (10nA à $8kV_{eff}$) ;

- les substrats Al_2O_3 – S2 et Al_2O_3 – S3 (« bon » substrat) montrent des petites décharges (<10 pC, Figure II - 53 – b et c) et un courant plus faible.

Contrairement à l'AlN, une certaine dissymétrie des distributions de décharges est observée

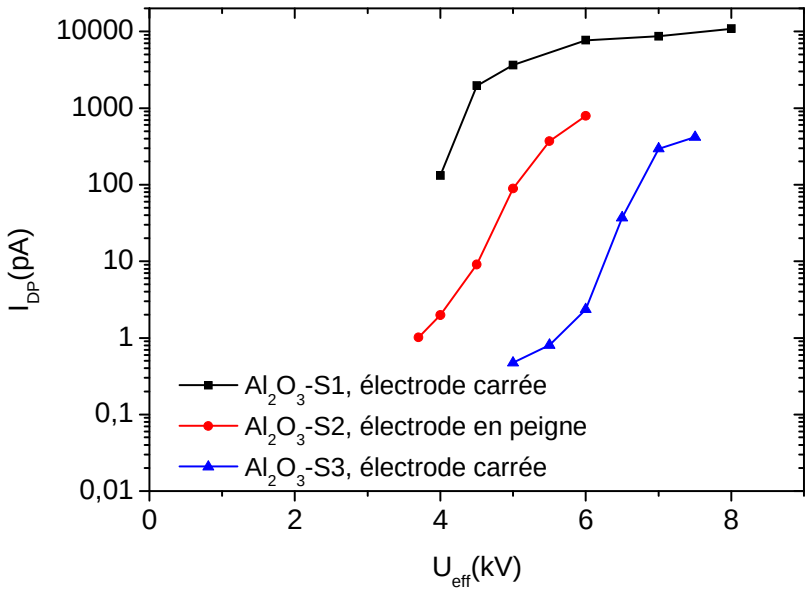
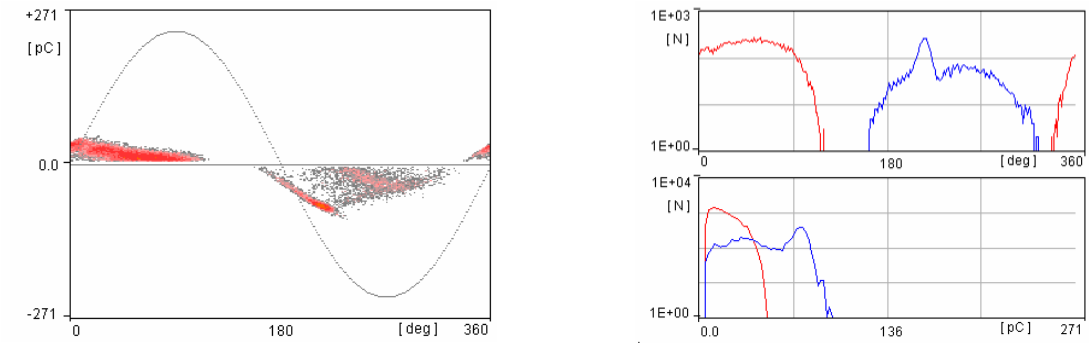
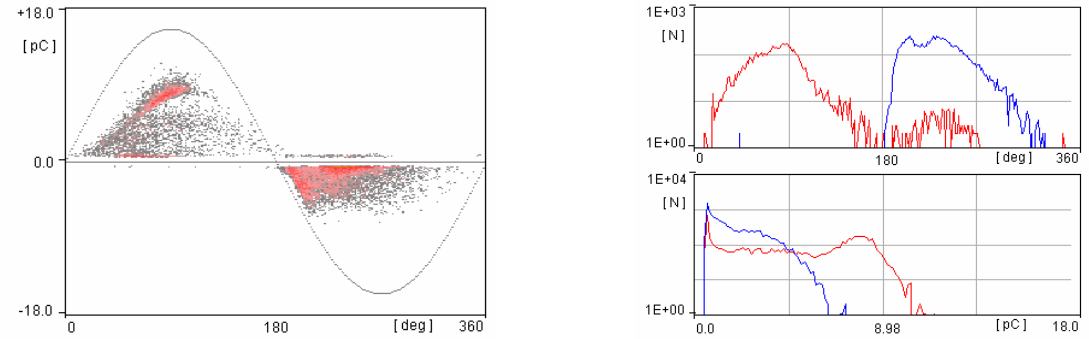


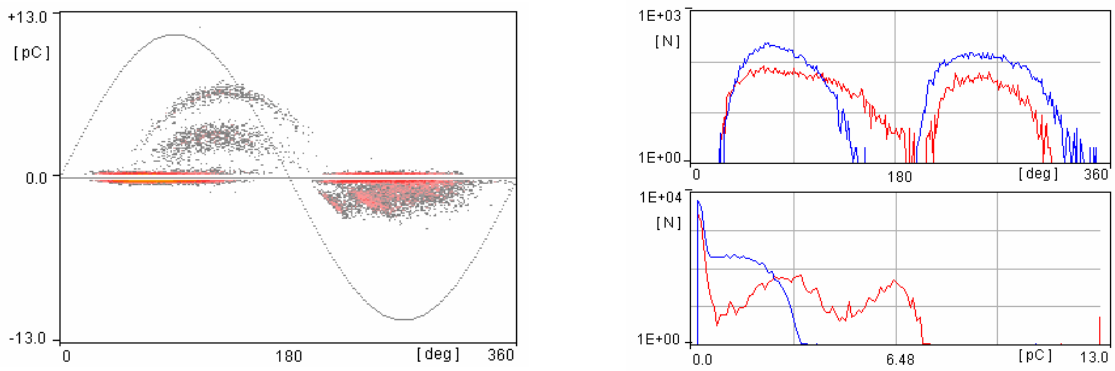
Figure II - 52 : Evolution du courant de décharges sur les substrats Al_2O_3 – S1, Al_2O_3 –S2 et Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350



(a) : Echantillon Al_2O_3 – S1



(b) Echantillon Al_2O_3– S2



(c) Echantillon Al_2O_3– S3

Figure II - 53 : Distribution des décharges et nombre des décharges à 6kV$_{eff}$ sur différents substrats. a :Al_2O_3 – S1. b : Al_2O_3 – S2. c : Al_2O_3 – S3.

V.2. Caractérisation d'un « bon » substrat d'Al_2O_3.

V.2.1. Sous tension AC 50Hz.

Les Figure II - 54 à Figure II - 59 montrent les mesures réalisées sur le substrat Al_2O_3 – S2. Par rapport aux substrats d'AlN, plusieurs différences importantes sont observées :

- la lumière émise est beaucoup plus faible (Figure II - 54) : la limite de détection du PM (quelques 0,1 nA) est atteinte pour une tension (2,5 kV) juste en dessous de TADP (3,5 kV) ;

- la lumière est émise sous forme de points lumineux multiples (Figure II - 56), au lieu d'une émission d'apparence continue avec les bons substrats d'AlN ;

- le photo-courant instantané (Figure II - 57) est quasiment identique dans les deux polarités, et présente une distribution dans la phase comparable à celle des DP (légèrement en avance de phase avec la tension).

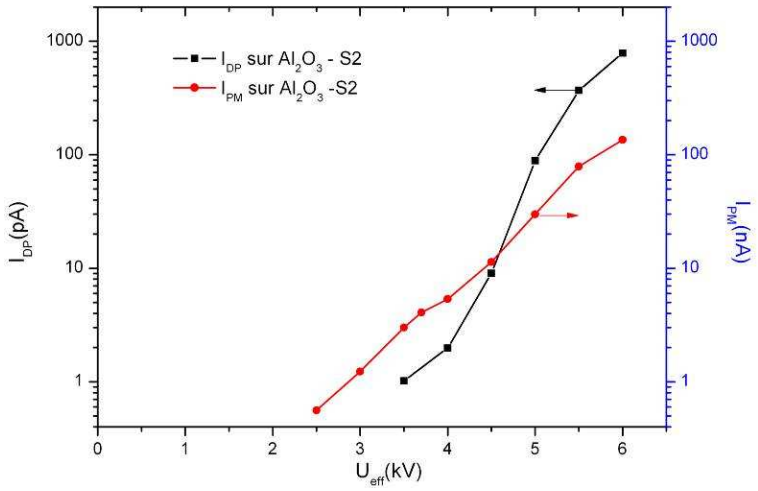
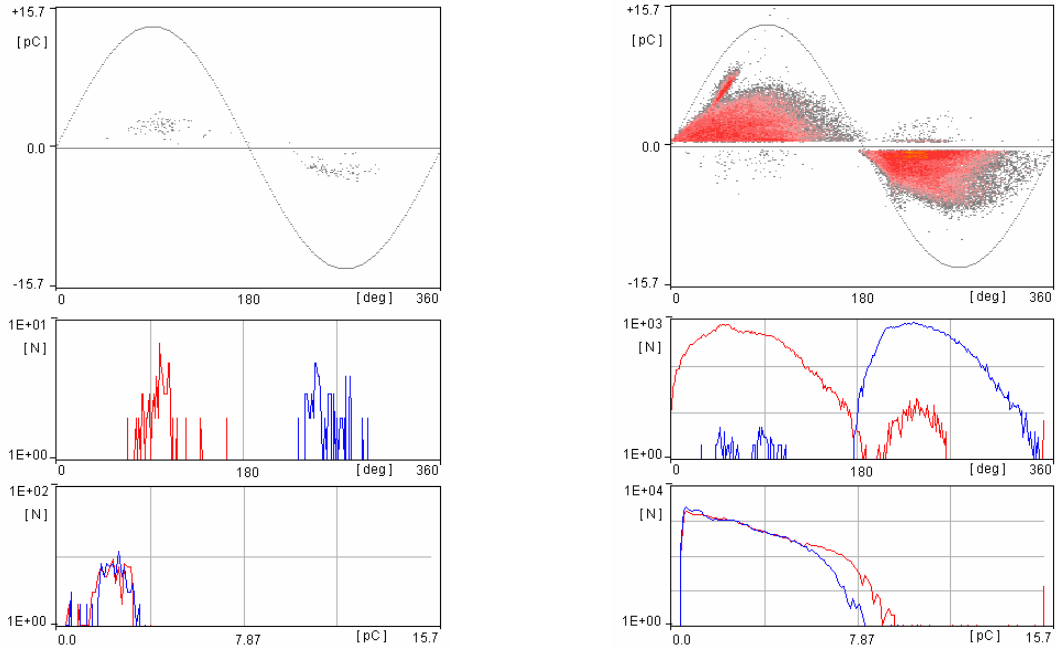
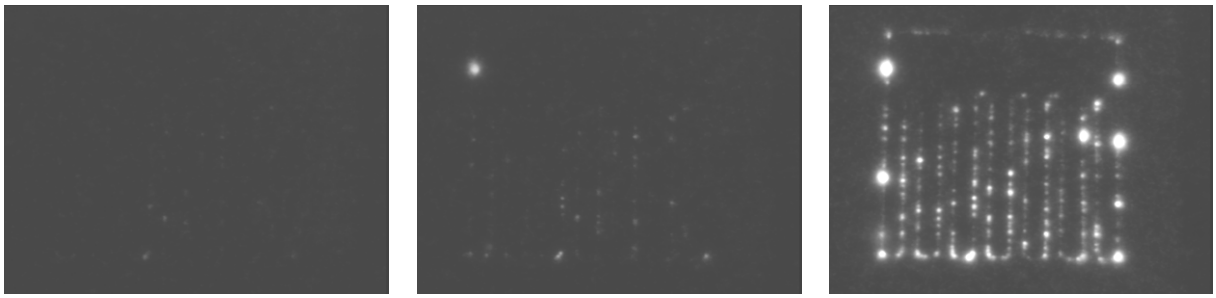


Figure II - 54 : Evolution du courant de décharges I_{DP} et du photo-courant I_{PM} sur l'échantillon Al_2O_3 – S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350, tension AC 50Hz



(a) (b)

Figure II - 55 : Distribution des décharges sur le substrat Al_2O_3 – S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz à 3.6kV_{eff}



(a) (b) (c)

Figure II - 56 : Localisation de la lumière émise sur le substrat Al_2O_3- S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz. a : 3.7kV$_{eff}$. b : 4.5kV$_{eff}$. c. 6.0kV$_{eff}$

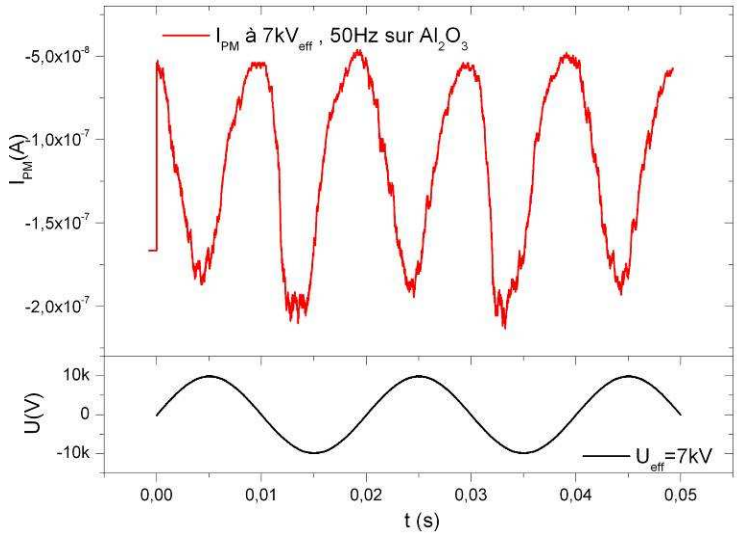
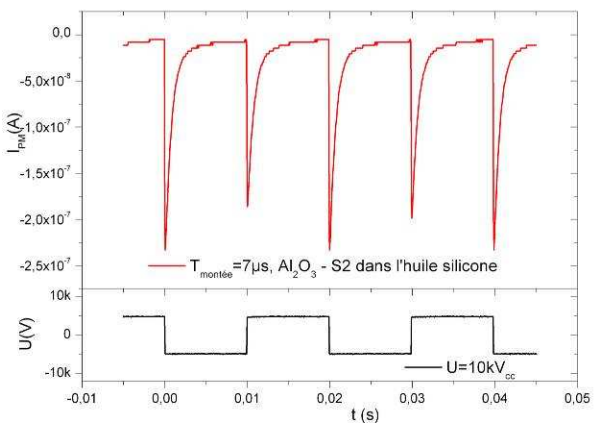


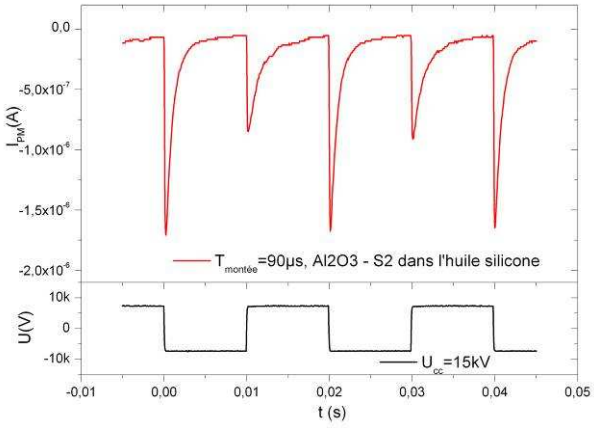
Figure II - 57 : Photo-courant instantané sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension AC 50Hz à 7kV$_{eff}$ (moyenne de 200 enregistrements)

V.2.2. Sous tension impulsionnelle

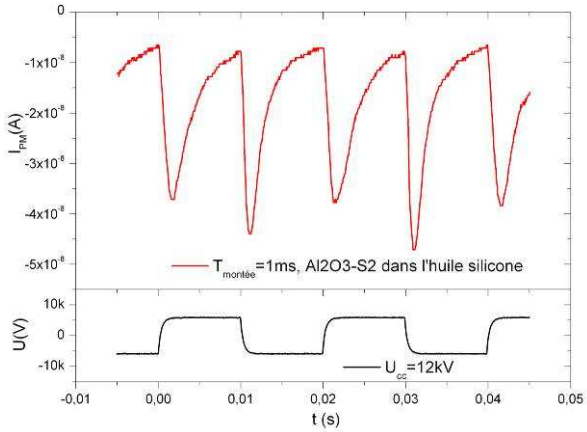
Les Figure II - 58 et Figure II - 59 montrent les mesures réalisées sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension impulsionelle. Par rapport aux substrats d'AlN, la dissymétrie entre les deux polarités a pratiquement disparu. Comme pour l'AlN, le courant moyen I_{PM} est plus élevé avec un temps de montée rapide, mais cette augmentation est plus faible dans le cas de l'Al_2O_3.



(a) 10kV$_{cc}$, T$_{montée}$=7µs



(b) 15kV$_{cc}$, T$_{montée}$ =90µs



(c) 12kV$_{cc}$, T$_{montée}$=1ms

Figure II - 58 : Photo-courant instantané (trace rouge) sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension impulsionnelle 50Hz (moyenne de 200 enregistrements)

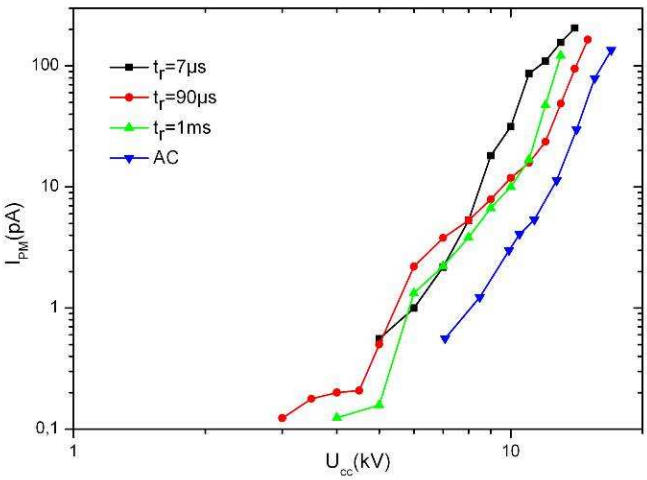


Figure II - 59 : Evolution du courant moyen de PM sur le substrat Al_2O_3 – S2 sous tension impulsionnelle et alternative 50Hz

V.3. Comparaison avec l'AlN

Les Figure II - 60 et Figure II - 61 résument les différences essentielles entre l'Al_2O_3 et l'AlN pour deux substrats de formes identiques (« peigne »). Bien que le courant de DP soit plus élevé dans l'échantillon d'Al_2O_3 (Figure II - 60), la lumière émise est plus faible d'environ deux décades (Figure II - 61) et la différence entre les valeurs maximum du photo-courant dans les deux polarités est beaucoup moins marquée sur l'Al_2O_3.

Comme l'AlN, l'Al_2O_3 est transparent à la lumière (Figure II - 17). La lumière détectée provient du volume du matériau. Par ailleurs, l'Al_2O_3 est un matériau isolant qui ne présente pas de propriétés d'électroluminescence connues comparables à celles de l'AlN. Il est par conséquent très probable que la lumière mesurée provient de DP situées très profondément dans la céramique. Ceci est cohérent avec les observations suivantes :

- la lumière détectée est beaucoup plus faible que dans le cas de l'AlN (de nombreuses décharges internes ne sont pas vues) ;

- un nombre beaucoup plus réduit de sites de décharges sont visibles, sous forme de points discontinus (Figure II - 56) ;

- la lumière mesurée dans l'Al_2O_3 présente une bonne corrélation avec les DP (Figure II - 57). L'électroluminescence absente dans l'Al_2O_3 ne supperpose pas à la lumière générée par les décharges partielles.

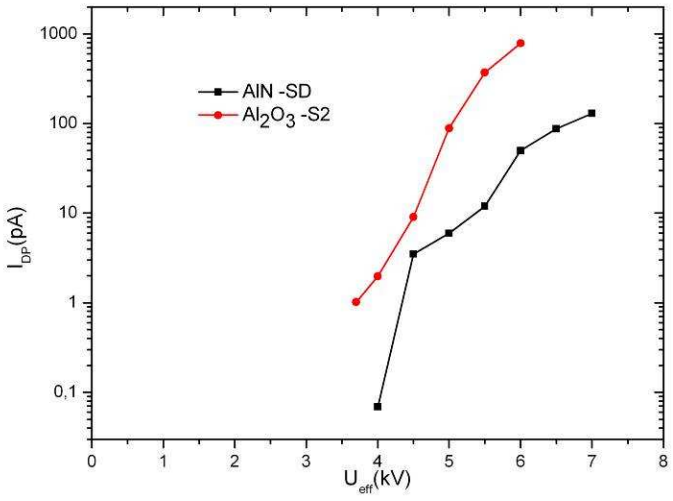


Figure II - 60 : Comparaison des courants de décharges sur les substrat AlN-SD et Al_2O_3 –S2 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz

Comme dans l'AlN, de la lumière est observée à des tensions inférieures à laTADP (Figure II - 54). Cependant celle-ci est très faible et la détection est rapidement limitée par le bruit de fond du PM. Ceci suggère toutefois l'existence de DP de très faibles amplitudes (< 0.2 pC) en dessous de TADP.

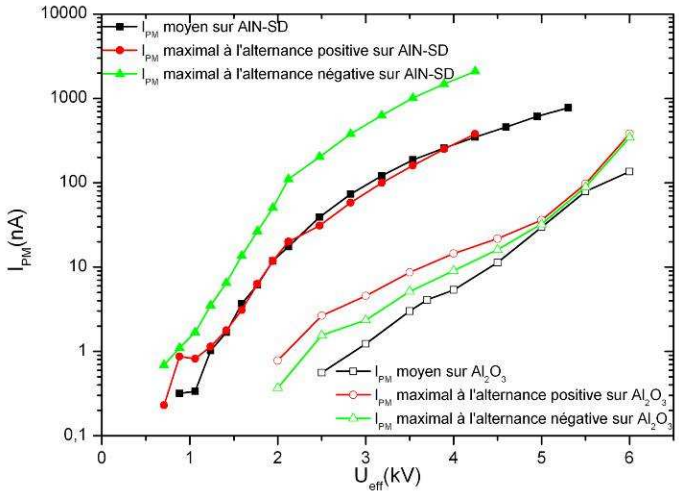


Figure II - 61 : Comparaison des photo-courants émis sur les substrat AlN-SD et AL_2O_3 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz.

VI. Caractérisation des décharges partielles et de l'émission lumineuse sur des substrats verre/epoxy dans l'huile silicone

VI.1. Sous tension alternative

L'enregistrement des DP et de la lumière dans le cas de substrats verre/époxy (circuit imprimé, électrode haute tension en forme de « peigne » comme pour l'AlN – SD) conduit à des propriétés totalement différentes de celles observées sur les céramiques :

- il n'y a pas de lumière détectée en dessous du seuil d'apparition de DP ;
- quand des DP apparaissent, celle-ci sont très instables, différentes dans les deux polarités, et entrainent une dégradation rapide du substrat;
- en général, le claquage du substrat survient rapidement après l'apparition de DP.

Un nombre très réduit de mesures a pu être effectué, car peu d'échantillons ont permis de caractériser les DP et la lumière de façon suffisamment stable. La Figure II - 62 montre un exemple de mesure des courants moyens I_{DP} et I_{PM}. Aucune lumière émise n'est détectée en dessous de TADP (7 kV).

L'enregistrement des DP (Figure II - 63) montre une dissymétrie importante entre les deux polarités. Nous verrons au chapitre suivant que ce type d'enregistrement est caractéristique des décharges dans les liquides. La visualisation des DP (Figure II - 64) montre en général un ou deux points lumineux instables, qui peuvent apparaître à différents endroits sur un même échantillon. La Figure II - 65 montre la grande instabilité du niveau moyen de DP sur un échantillon neuf au cours de paliers de tension montants (Figure II - 65 a) et descendants (Figure II - 65 b). Après quelques

minutes, l'échantillon est nettement dégradé (Figure II - 65-c) : des DP apparaissent pour une tension d'environ 4kV (au lieu de 8-10kV sur l'échantillon neuf).

L'enregistrement du signal du PM (Figure II - 66) montre une émission lumineuse cohérente avec les mesures de DP (Figure II - 63) : signal en légère avance de phase avec la tension, et intensité supérieure en polarité négative.

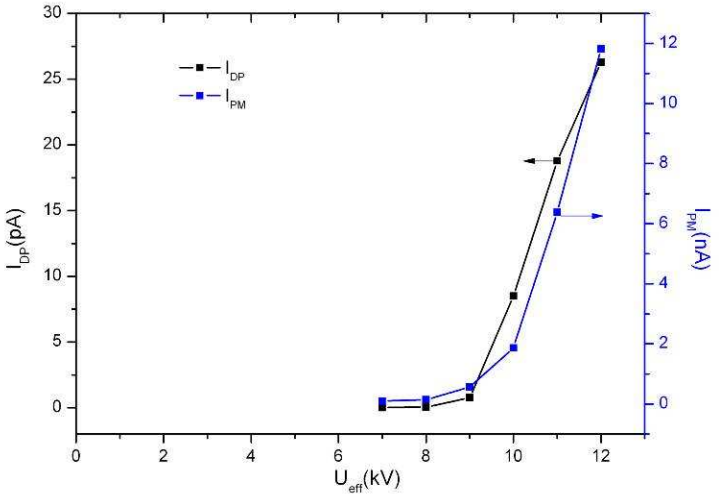


Figure II - 62 : Evolution du courant moyen de décharges et du photo – courant sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC 50Hz

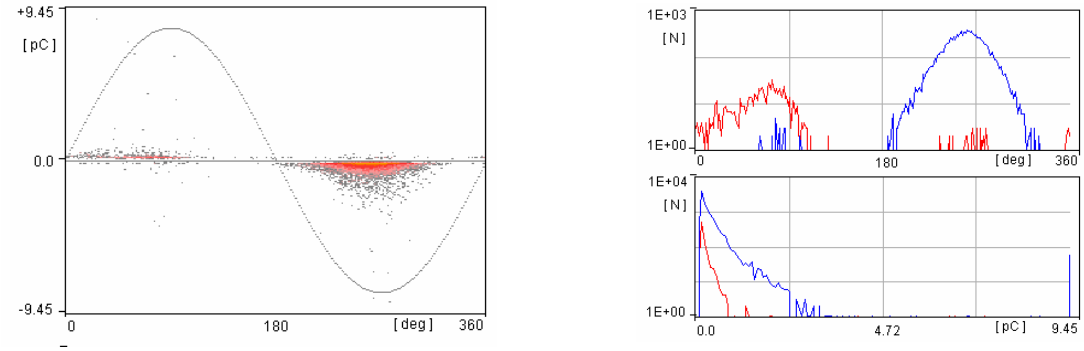
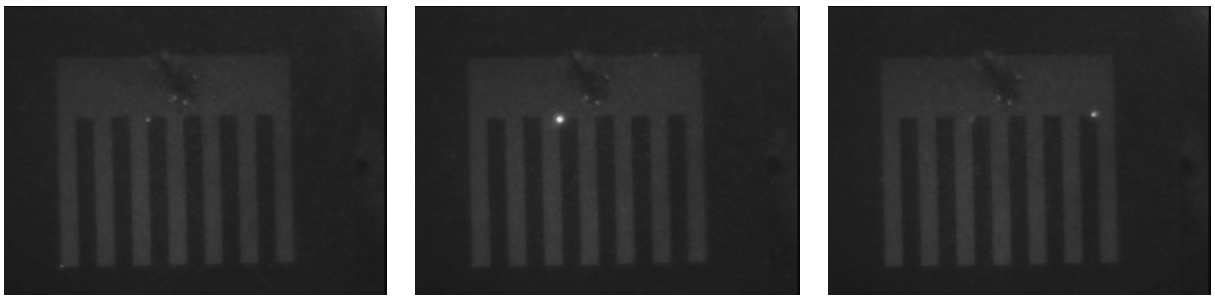
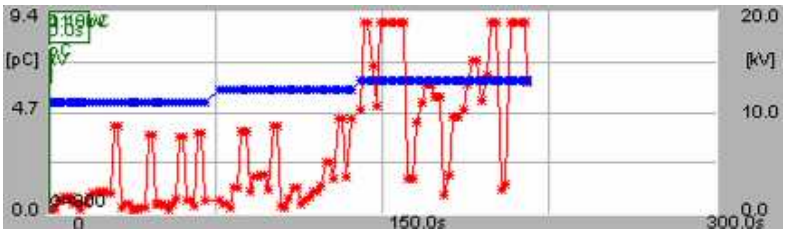


Figure II - 63 : distribution des décharges partielles sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension AC, 50Hz, 12kV$_{eff}$

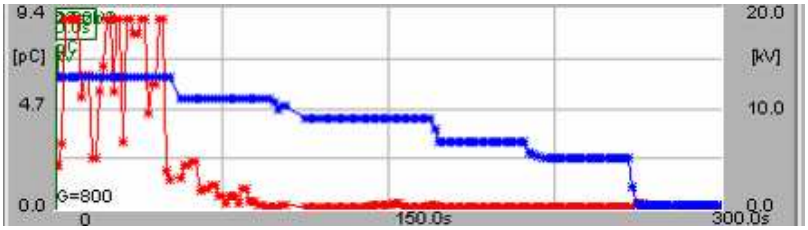


(a) (b) (c)

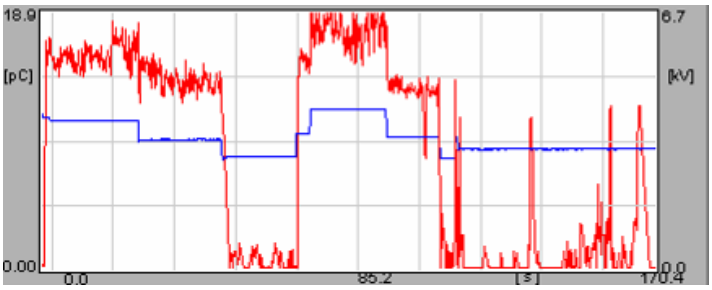
Figure II - 64 : émission de lumière sur l'époxy dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sous tension impulsionnelle 50Hz,à a : 10kV$_{cc}$, b : 15kV$_{cc}$, c : 18kV$_{cc}$



(a)



(b)



(c)

Figure II - 65 : Instabilité des décharges partielles sur un substrat Epoxy (S2) dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350. Tension appliquée en bleu. Niveau moyen de DP en rouge.

Echantillon : neuf (a et b), dégradé (c)

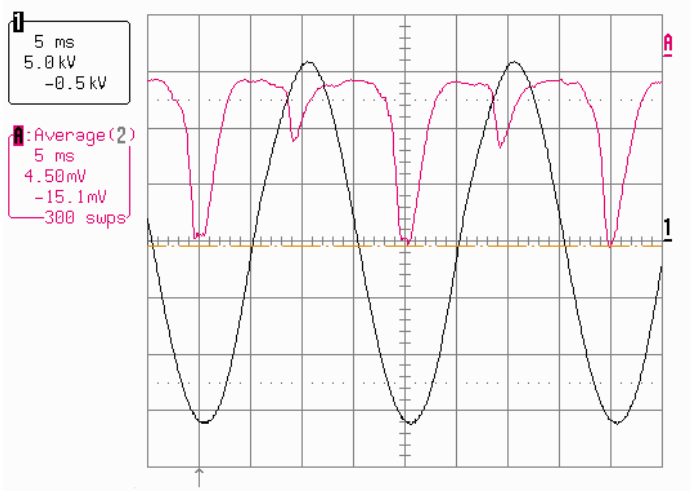


Figure II - 66 : Forme du photo-courant moyen émis sur l'époxy sous tension AC 50Hz à 32kV$_{cc}$. 1 : tension appliquée. A : I_{PM} instantané (moyenne sur 200 enregistrements)

VI.2. Sous tension impulsionelle

Les mesures d'intensité lumineuse moyenne I_{PM} et leur comparaison avec un substrat AlN (Figure II - 67) montre que l'émission lumineuse est considérablement plus faible avec l'époxy, et est observée pour des tensions nettement plus élevées. Comme dans le cas des céramiques, l'intensité lumineuse émise (et donc l'intensité des DP) augmente fortement lorsque des impulsions à front raide sont utilisées.

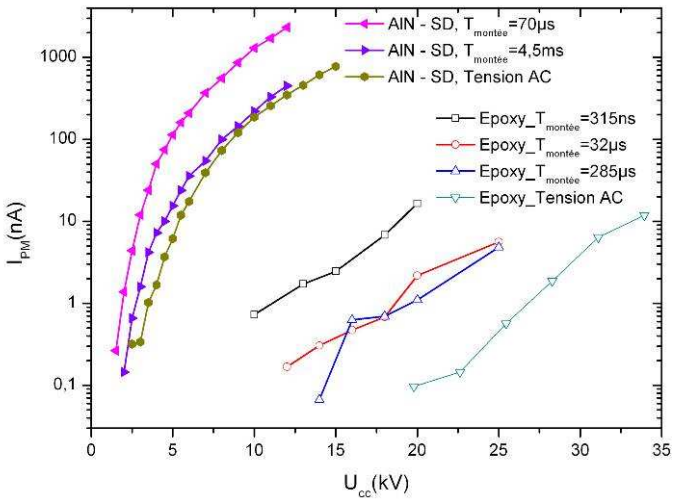


Figure II - 67 : Comparaison entre l'intensité lumineuse moyenne I_{PM} émise par un substrat d'époxy et d'AlN – SD dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 (impulsions carrées à 50Hz)

VII. Conclusion

L'étude des décharges partielles et de l'émission de lumière avec des substrats immergés dans un liquide a permis de réaliser de nombreuses mesures dans des conditions reproductibles sans dégradation des échantillons, grâce au caractère « auto-cicatrisant » des liquides. L'utilisation d'un liquide a également permis de mettre en évidence certains effets, comme le rôle important de « l'imprégnation » du substrat, qui ne peuvent pas être observés avec un gel. Les mesures réalisées montrent que le comportement des DP avec un gel silicone ou une huile silicone sont très semblables. Elles mettent également en évidence une large dispersion du comportement de substrats de nature identique. A partir des mesures de décharges partielles et de lumière émise, on peut ainsi distinguer des « bons » et des « mauvais » substrats dont le comportement dévie largement de la moyenne. Il n'est toutefois pas possible d'établir de relation entre ce classement et la fiabilité à long terme qui n'a pas été étudiée dans ce travail.

L'utilisation de trois matériaux différents (AlN, Al_2O_3 et verre/époxy) met en évidence le rôle fondamental de la nature du matériau du substrat sur les DP et la lumière émise. On peut en effet distinguer deux types de comportements :

- avec les matériaux céramiques frittés, les DP ont une grande stabilité, sont généralement symétriques dans les deux polarités, et ne provoquent pas de dégradation apparente du matériau si la tension n'est pas trop élevée (typiquement dans l'intervalle de tension TADP – 2 x TADP);

- avec un composite verre/époxy, les DP sont très instables, différentes dans les deux polarités, et conduisent rapidement à la dégradation et au claquage du substrat.

Ceci montre que les mécanismes de DP sont différents dans les deux cas, bien que la géométrie du champ soit comparable et le matériau d'encapsulation identique. Ceci constitue un premier argument qui montre que l'hypothèse la plus simple généralement utilisée (décharges partielles dans le liquide ou le gel au bord de la métallisation) est probablement fausse pour expliquer tous les phénomènes observés.

Nous verrons au chapitre suivant que seules les mesures de DP réalisées avec le substrat époxy sont comparables à celles observées dans le liquide. Dans le cas des céramiques, de nombreuses observations montrent que les DP ne semblent pas se produire dans le matériau d'enrobage, mais plutôt à l'intérieur de la céramique elle-même, ce qui est probablement lié à la présence de pores dans le matériau. Cette hypothèse est repose sur :

- le fait qu'aucune différence ne soit observée entre un gel (mesures de Do [6]) et une huile silicone ;

- le fait qu'une procédure « d'imprégnation » du solide sous vide réduise sensiblement le niveau de DP ;

- l'absence de « vieillissement » à court terme dû aux DP (les céramiques sont des matériaux chimiquement beaucoup plus stables que les polymères) ;

En ce qui concerne la lumière émise, les mesures réalisées montrent que dans le cas de l'AlN + huile silicone, il n'y a pas de relation simple entre l'intensité lumineuse et l'activité des DP : la majeure partie de la lumière émise provient de l'électroluminescence du matériau AlN (qui est un semi-conducteur à grand gap). Dans les cas de l'Alumine (matériau non électroluminescent) et de l'époxy, la lumière présente une meilleure corrélation avec les mesures de DP. Dans le cas de l'alumine, le fait que de la lumière soit détectée à des tensions inférieures à la TADP suggère que des DP de très petites amplitudes (inférieures au seuil de détection de 0,2pC) existent à basse tension. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre IV (mesure de pertes diélectriques sous haute tension).

Dans le chapitre suivant, nous allons étudier l'influence de la nature du matériau d'encapsulation sur les DP et l'émission de lumière.

CHAPITRE III : INFLUENCE DE LA NATURE DE L'ENCAPSULANT

I. Caractérisation de différents liquides en configuration pointe-plan

Dans cette partie, nous analyserons le comportement de différents liquides dans une géométrie pointe – plan qui permet de générer facilement des DP. Un nombre très réduit d'expériences a également été réalisé en géométrie lame-plan. Cette géométrie qui présente l'avantage d'être plus proche du cas d'un bord de métallisation, conduit à une très mauvaise reproductibilité des mesures, ce qui a fortement limité son utilisation.

Différents liquides ont été sélectionnés, soit en fonction de leurs propriétés électriques connues, ou encore en fonction de perspectives d'application intéressantes. Nous avons étudié les liquides suivants :

- l'huile silicone Rhodorsil 47V350 utilisée dans le chapitre précédent ;
- une huile minérale (Univolt 54T), liquide isolant très classique et répandu ;
- un liquide synthétique industriel (Jarylec C 101) utilisé pour l'imprégnation de condensateurs de puissance. Il est caractérisé par une très bonne tenue diélectrique sous tension alternative en champ très divergent (>35kV/mm**)** (aux bords d'armatures de condensateurs au polypropylène);
- un ester d'origine naturelle (dérivé de l'huile de Colza), liquide biodégradable présentant une bonne tenue à haute température (point d'éclair de 260°C).
- un liquide de constante diélectrique plus élevée (Ugilec T, ε_r = 5,1) qui permettra d'apprécier l'influence de ce paramètre.

Les propriétés de base de ces liquides ont été listées au chapitre I, partie V.1.2.

Les pointes en acier utilisées dans notre étude (fournies par la société Ogura Jewels) présentent un angle au sommet de 30° et un rayon de courbure de 1 à 10µm. La distance inter - électrode a été réglée entre 8 à 10 mm pour limiter le risque de claquage. Le dégazage du liquide sous vide est effectué pendant au moins 1h avant tous les essais. Toutes les mesures ont été réalisées sous

tension alternative sinusoïdale 50Hz. Sous impulsions de tension, l'impossibilité de mesurer des DP électriquement et la très faible quantité de lumière émise dans plusieurs liquides (par exemple l'huile silicone) n'ont pas permis d'obtenir de résultats exploitables.

Les décharges partielles et l'émission de lumière ont été mesurées. Le protocole de mesures électriques est identique à celui employé pour les substrats. Pour chaque liquide, plusieurs séries de mesures sont effectués : juste après le dégazage, et après 16h de repos dans l'obscurité, ce qui a permis de mettre en évidence l'évolution temporelle de la lumière émise dans certains liquides.

La sensibilité du système de mesure électrique a été ajustée en fonction de l'amplitude des décharges mesurées. Pour les faibles tensions où des décharges de petites amplitudes peuvent apparaître, la sensibilité de détection maximum avec un bruit de fond de 0,06 pC a été utilisée. Pour ne pas saturer le système de détection électrique lors de l'apparition de grandes DP (en polarité positive), la sensibilité a dû être fortement dégradée.

Suivant les essais, le photo-courant $\boldsymbol{I_{PM}}$ a été enregistré soit en mode « mono coup », soit moyenné sur 200 acquisitions. Dans ce cas la légende sur les oscillogrammes est "average".

Plusieurs séries d'essais préliminaires ont été réalisées (avec différentes pointes, distances, conditions de mesures) pour déterminer un protocole unique permettant de comparer tous les liquides dans les mêmes conditions. Dans ce qui suit, nous présentons les résultats d'une série d'essais réalisés avec les différents liquides dans les mêmes conditions, et en particulier avec la même pointe (rayon de courbure de 5µm) pour pouvoir comparer correctement les résultats. Pour chaque liquide, le temps d'expérimentation a été volontairement réduit pour limiter l'érosion de la pointe par les DP. Dans les parties suivantes, nous avons regroupé les liquides qui présentent des caractéristiques comparables.

I.1. Huile silicone Rhodorsil 47V350 et Colza

I.1.1. Huile silicone Rhodorsil 47V350

Les résultats des mesures des décharges partielles en configuration pointe - plan dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 sont présentées sur les Figure III - 1 à Figure III - 4. La tension d'apparition des décharges partielles (TADP) est de $8kV_{eff}$ environ (Figure III - 1). A cette tension, des petites décharges négatives (<10 pC) apparaissent pendant l'alternance négative. Le photo-courant enregistré n'est pas significatif étant donné le très faible nombre de décharges, il est proche du bruit de fond du PM. A une tension plus importante (11kV) un signal lumineux devient observable après le moyennage, il est corrélé à l'apparition des décharges négatives.

A $13kV_{eff}$ (Figure III - 2), deux types de décharges positives d'amplitudes très différentes apparaissent simultanément : des petites décharges (<10 pC) observables avec une forte sensibilité (Figure III - 2-a), et des grandes (plusieurs centaines de pC) observables avec une sensibilité réduite

(Figure III - 2-b). Dans ce dernier cas, les petites décharges négatives ne sont plus observables avec cette sensibilité. Au niveau des mesures optiques, le signal moyenné est plus élevé en polarité négative. Bien que de plus faible intensité, les DP négatives sont en effet beaucoup plus nombreuses que les positives (Figure III - 3). Pendant l'alternance positive, les DP de grande intensité mais peu fréquentes produisent un signal moyen qui sort à peine du bruit de fond du PM.

A plus haute tension, le nombre et l'amplitude des décharges positives croît très rapidement, et le signal optique moyenné devient beaucoup plus élevé en polarité positive (Figure III - 4-a). L'enregistrement en mode « mono-coup » (Figure III - 4-b) montre le caractère aléatoire des grandes décharges positives.

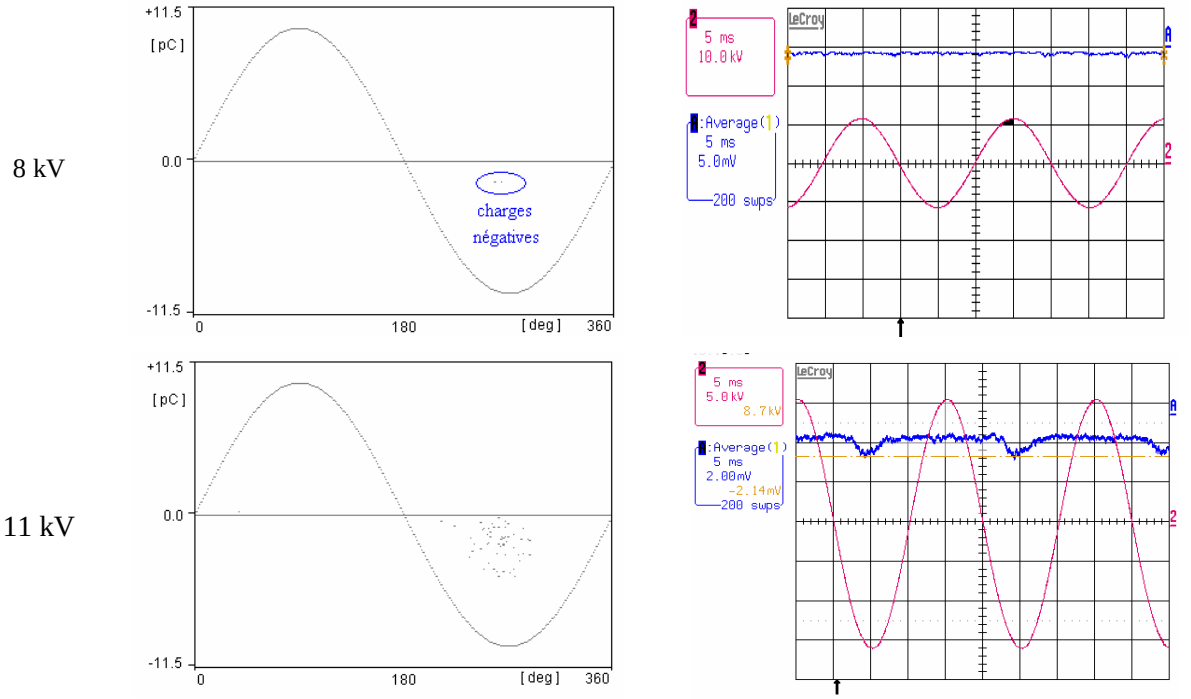
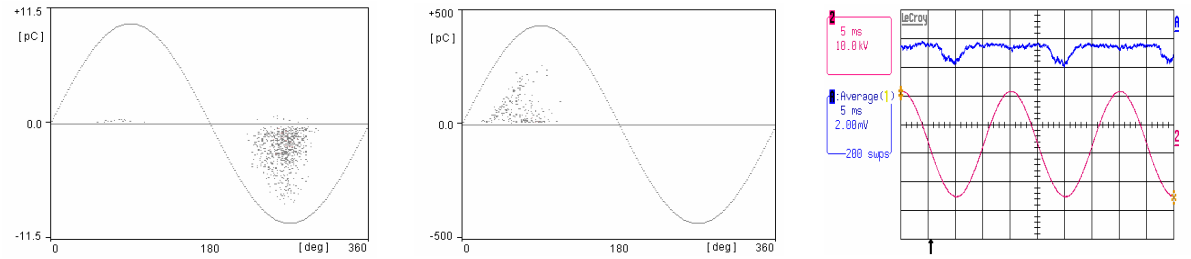


Figure III - 1 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350 et $i_{PM}(t)$ (moyenne 200 traces). Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance : 9 mm



(a) (b) (c)

Figure III - 2 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350 à 13kV_{eff} à a : forte sensibilité et b : sensibilité réduite, et c : $i_{PM}(t)$ (moyenné sur 200 acquisitions). Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

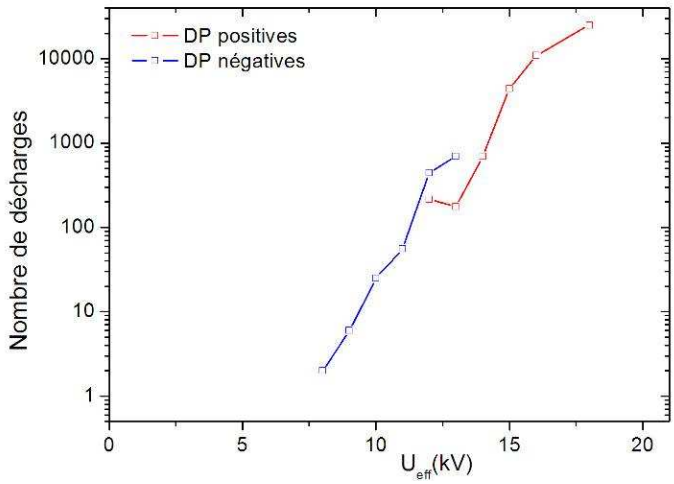
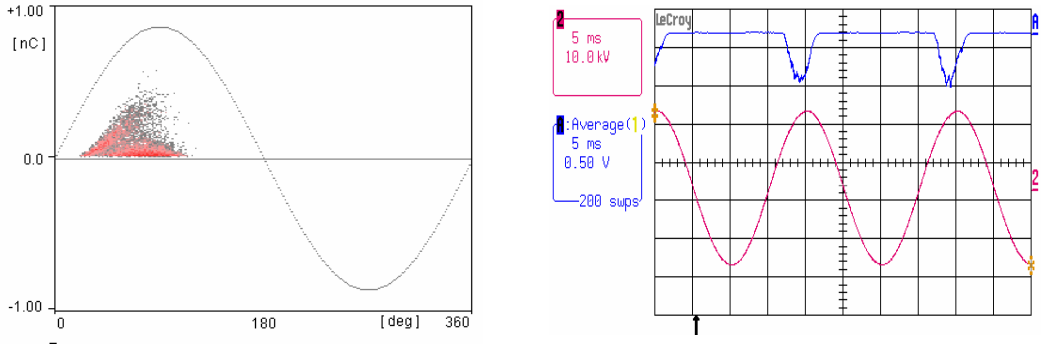


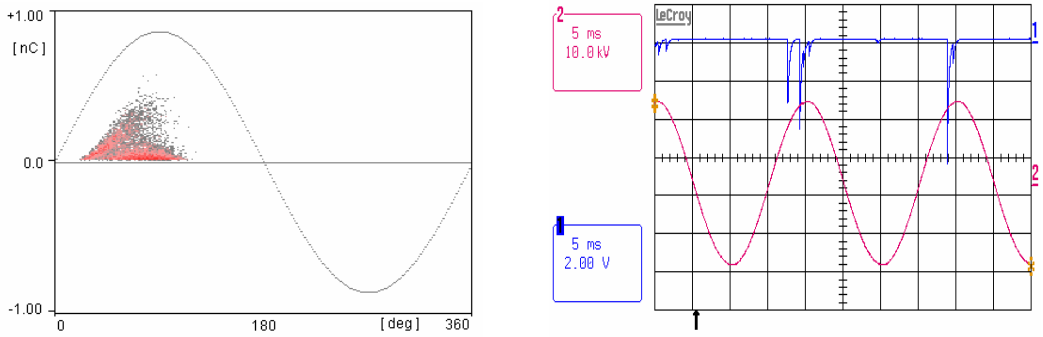
Figure III - 3 : Nombre des décharges par minute en fonction de la tension appliquée. Rhodorsil 47V350 , 50Hz. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

14 kV



(a)

15 kV



(b)

Figure III - 4 : Distribution des décharges dans le Rhodorsil 47V350, et $i_{PM}(t)$ correspondant. a : moyenne sur 200 acquisition et b : enregistrement mono-coup. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

I.1.2. Interprétation des mesures.

Il a été montré que les décharges partielles dans les liquides en géométrie pointe-plan sont dues à la génération et la propagation de « streamers » [76, 77]. Les streamers sont constitués d'une phase gazeuse ionisée qui se développe à grande vitesse dans le liquide sous l'action d'un champ élevé [78]. Si le streamer se propage jusqu'à l'électrode opposée, le claquage (arc électrique) se produit.

Dans des conditions proches des nôtres, les types de streamers suivants ont été observés dans les hydrocarbures [79, 80, 81] :

- en polarité négative : streamer de vitesse faible (10 – 100 m/s), dont la propagation s'arrête en général très rapidement (« 1er mode ») ;
- en polarité positive :
  - à basse tension : streamer de « 1er mode », comparable à celui observé en polarité négative ;
  - au-delà d'un seuil de tension V_p (tension de « propagation »), transition à un deuxième type de streamer positif (« 2ème mode »), de vitesse plus élevée (> 1 km/s), de plus grande longueur, de forme filamentaire.

En polarité positive, uniquement des streamers de 2ème mode sont observés quand le rayon de courbure de la pointe dépasse une valeur appelée « rayon critique » (par exemple, rayon critique = 6µm dans le cyclohexane [79]). La comparaison avec les mesures de DP déjà effectuées dans les hydrocarbures [77] permet de tirer les conclusions suivantes pour nos mesures :

- premières petites DP négatives dues à des streamers lents négatifs de «1er mode ;
- premières petites DP positives dues à des streamers lents positifs de « 1er mode » ;
- grandes DP positives dues à des streamers filamentaires rapides de 2ème mode.

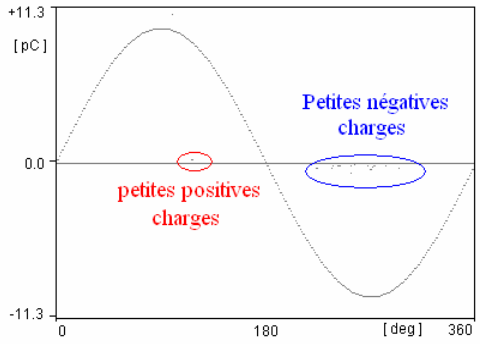
Le fait que les petites et grandes DP positives apparaissent simultanément (Figure III - 2) indique que le rayon de pointe utilisé (5µm) est probablement proche du rayon critique (non connu précisément dans l'huile silicone).

En configuration pointe-plan, Do [6] a analysé le comportement du gel silicone soumis à des tensions impulsionnelles positives ou négatives. Il a montré qu'avec une polarité de la pointe négative, des streamers lents en forme de bulle microscopique donnent lieu à des décharges de faibles amplitudes (<10pC). Avec une pointe de polarité positive, des streamers lents et filamentaires rapides sont détectés. Les streamers rapides filamentaires, corrélés à des valeurs de charges jusqu'à plusieurs centaines de pC, peuvent conduire facilement au claquage si leurs longueurs deviennent égales à l'espace inter-électrode. Les streamers rapides sont observés pour des tensions supérieures à 13,5kV, soit une valeur pratiquement identique à celle observée ici dans le liquide (13kV, voir Figure III - 2). Les comportements observés dans l'huile silicone et dans le gel sont donc très proches. Cependant, dans le gel les DP conduisent très rapidement à une dégradation irréversible (création de cavités permanentes), ce qui n'est pas le cas dans le liquide.

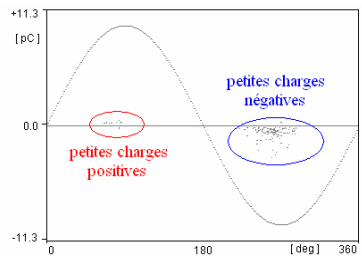
I.1.3. Huile de Colza.

Dans l'huile de colza les distributions de charges (Figure III - 5 et Figure III - 6) permettent d'identifier des mécanismes proches de ceux obtenues dans l'huile silicone : un type de DP en polarité négative, et deux en polarité positive (petites et grandes DP). Cependant, des différences sensibles sont observées. La TADP ($11kV_{eff}$) est plus élevée que dans l'huile silicone (8 kV). Les petites décharges négatives et positives apparaissent pratiquement simultanément (Figure III - 5), et les tensions d'apparitions sont plus élevées que dans l'huile silicone (Figure III - 7). Des grandes décharges positives sont observées à partir d'environ 14 kV.

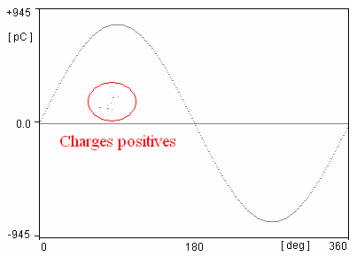
Comme dans l'huile silicone, l'émission de lumière à TADP n'est pas détectable (petites DP en faible nombre). Dans ces liquides, les mesures de photo-courants ne changent pas au cours du temps : les essais effectués immédiatement après le dégazage ou après plusieurs heures dans l'obscurité ne changent pas, ce qui ne sera pas le cas de tous les liquides.



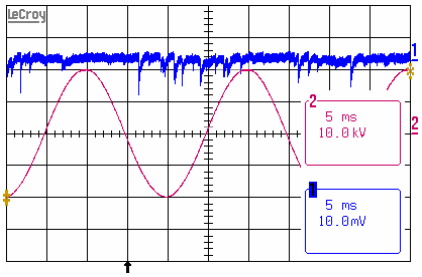
11 kV



14 kV (a)



14 kV (b)



14(c)

Figure III - 5 : Huile de colza. a : forte sensibilité, b : sensibilité réduite et c : évolution du photo-courant (condition de mesure : 1MΩ, 15pF). Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm

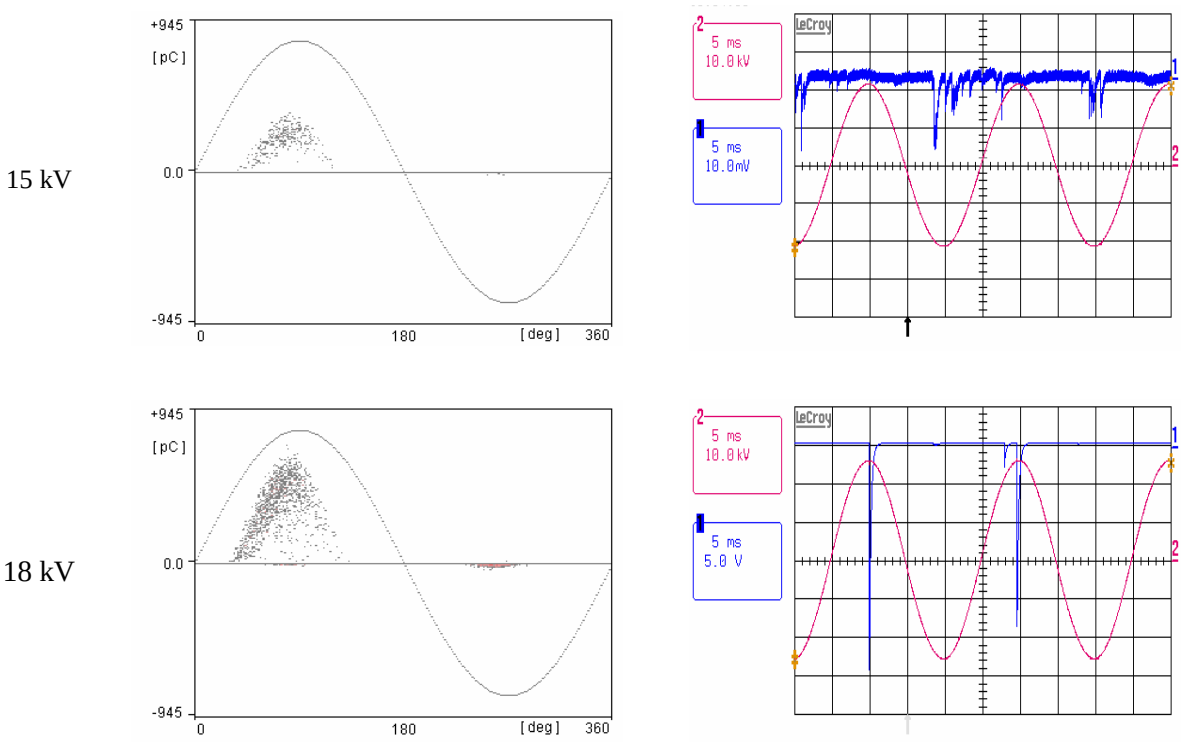


Figure III - 6 : Huile de colza. a : sensibilité réduite et b : évolution du photo-courant (condition de mesure : 1MΩ). 15pF. Rayon de courbure de la pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

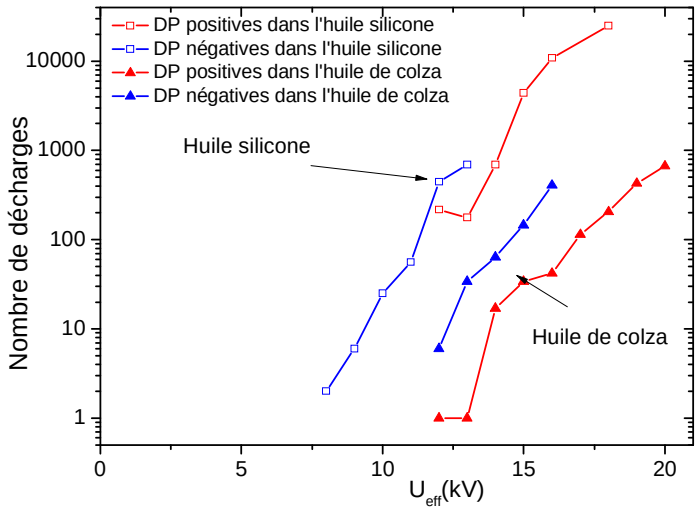


Figure III - 7 : Comparaison du nombre de DP détectées par minute dans le Rhodorsil 47V350 et l'huile de Colza. Pointe P2 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

I.2. Huile minérale pour transformateur Univolt®

Les distributions de décharges partielles en fonction de la phase dans l'huile de transformateur nous donnent des caractéristiques comparables aux liquides précédents (Figure III - 8): de petites

décharges négatives aux plus basses tensions (à partir de 9 kV), et deux types de décharges (petites et grandes décharges) à plus haute tension en polarité positive (à partir de 12 kV). Le nombre des grandes décharges positives est beaucoup moins élevé que dans l'huile silicone ou l'huile de colza, et leur apparition est très aléatoire.

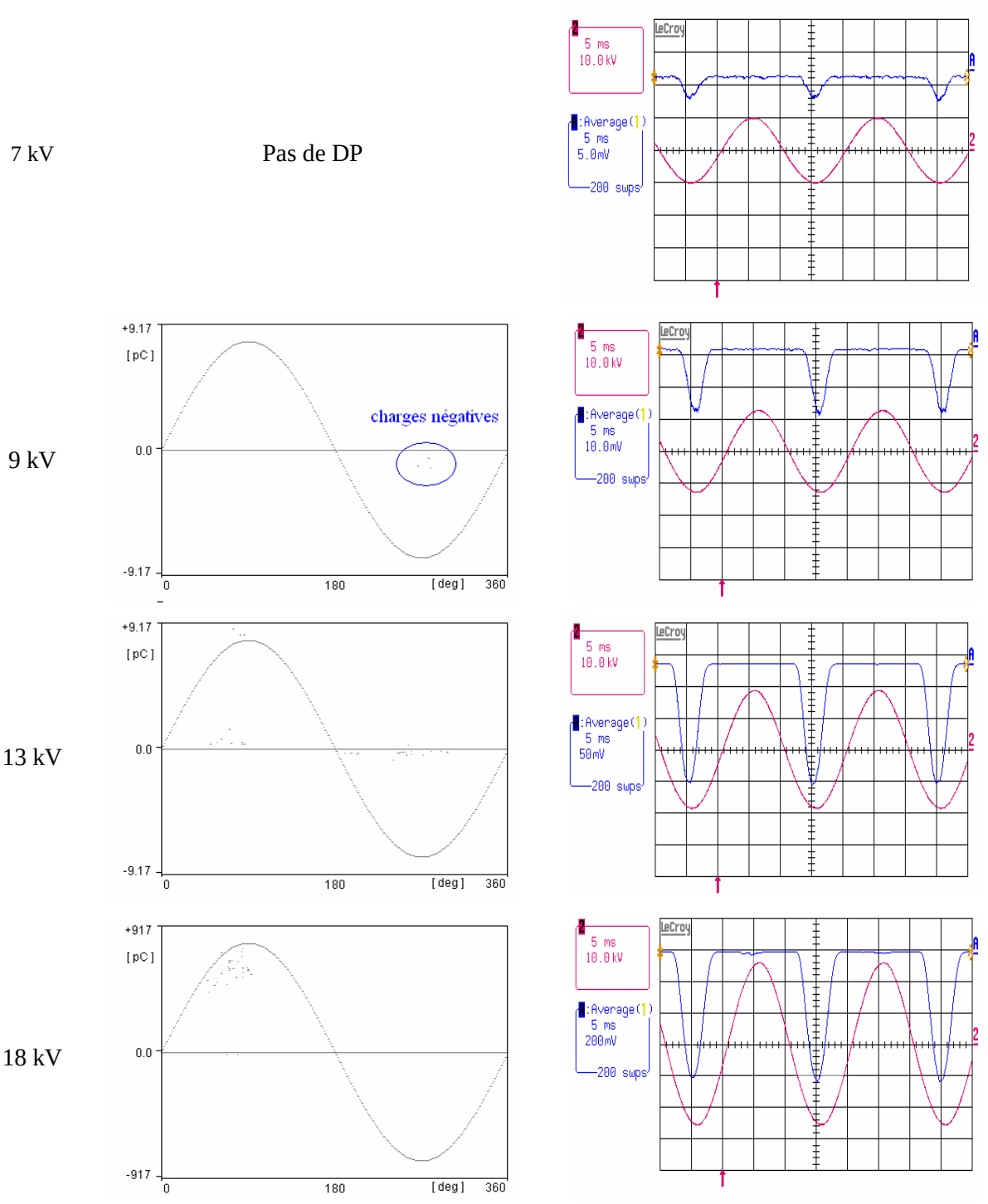


Figure III - 8 : Huile de transformateur. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm

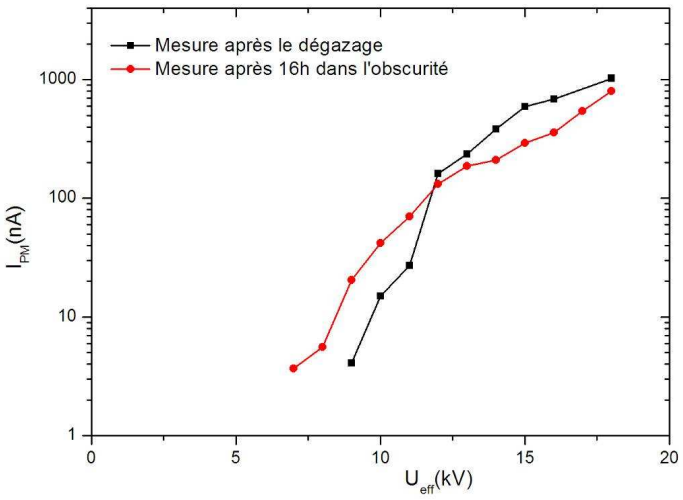


Figure III - 9 : Huile de transformateur. Variation du courant moyen du PM après repos dans l'obscurité 16h. Pointe P6 de 5µm. Distance inter-électrode : 9 mm

La différence principale vient de la lumière émise. De la lumière est détectée en polarité négative pour des tensions inférieures à TADP (par exemple à 7kV sur la Figure III - 8). La lumière est en phase avec la tension appliquée, et augmente avec la tension. Elle est stable contrairement à l'apparition de DP pour ce liquide. Sur les enregistrements moyennés, ce signal est stable et intense pendant l'alternance négative, il masque complètement la lumière émise par les DP : par exemple la lumière émise par les grandes DP positives à forte tension (18kV) n'est pas visible, car l'apparition de ces DP est très aléatoire. Cette émission de lumière stable pendant l'alternance négative peut être attribuée à l'électroluminescence de l'huile minérale. Ce phénomène, beaucoup moins étudié que dans les solides isolants, a déjà été observé dans quelques liquides dont l'huile minérale [76]. En effet, ce liquide comporte des molécules aromatiques dont la présence est à l'origine de l'émission de lumière [82].

La mesure du courant moyen de PM (Figure III - 9) montre qu'après une période de repos dans l'obscurité totale, la lumière émise est légèrement plus faible aux basses tensions.

I.3. Jarylec.

Les résultats de mesures des décharges partielles montrent un comportement nettement différent des liquides précédents (Figure III - 10). En effet, la TADP est plus élevée ($11kV_{eff}$, apparition de petites DP négatives. Jusqu'à $18kV_{eff}$, très peu de décharges sont enregistrées. Uniquement quelques petites décharges positives sont détectées (pas de grandes DP positives). La charge associée aux DP est faible, elle ne dépasse pas 10pC jusqu'à $18kV_{eff}$, ce qui est presque 100 fois plus faible que dans les isolants liquides précédents. Ces observations sont cohérentes avec le fait que ce liquide possède une très bonne tenue sous champ divergent fort, ce qui explique son utilisation dans les condensateurs haute tension de puissance.

Comme dans l'huile minérale de transformateur, la lumière émise a été détectée très tôt ($7kV_{eff}$) en polarité négative, alors qu'aucune décharge n'est enregistrée. L'amplitude de lumière est beaucoup plus élevée que dans l'huile minérale, et masque totalement la lumière émise par les DP. Il est avéré que le Jarylec est un liquide fortement électroluminescent. Ce phénomène est renforcé par la présence dans sa structure chimique de cycle aromatique avec des électrons π délocalisés qui participent aux dé-excitations radiatives. L'émission de lumière pour le Jarylec serait due à l'effet cumulatif de l'électroluminescence et des DPs où le phénomène d'électroluminescence prévaut.

Les mesures réalisées après avoir laissé 16h le liquide dans le noir montrent une très forte diminution de la lumière émise (Figure III - 11). La position dans la phase reste inchangée. Ce phénomène très marqué n'avait jusqu'à présent été jamais observé.

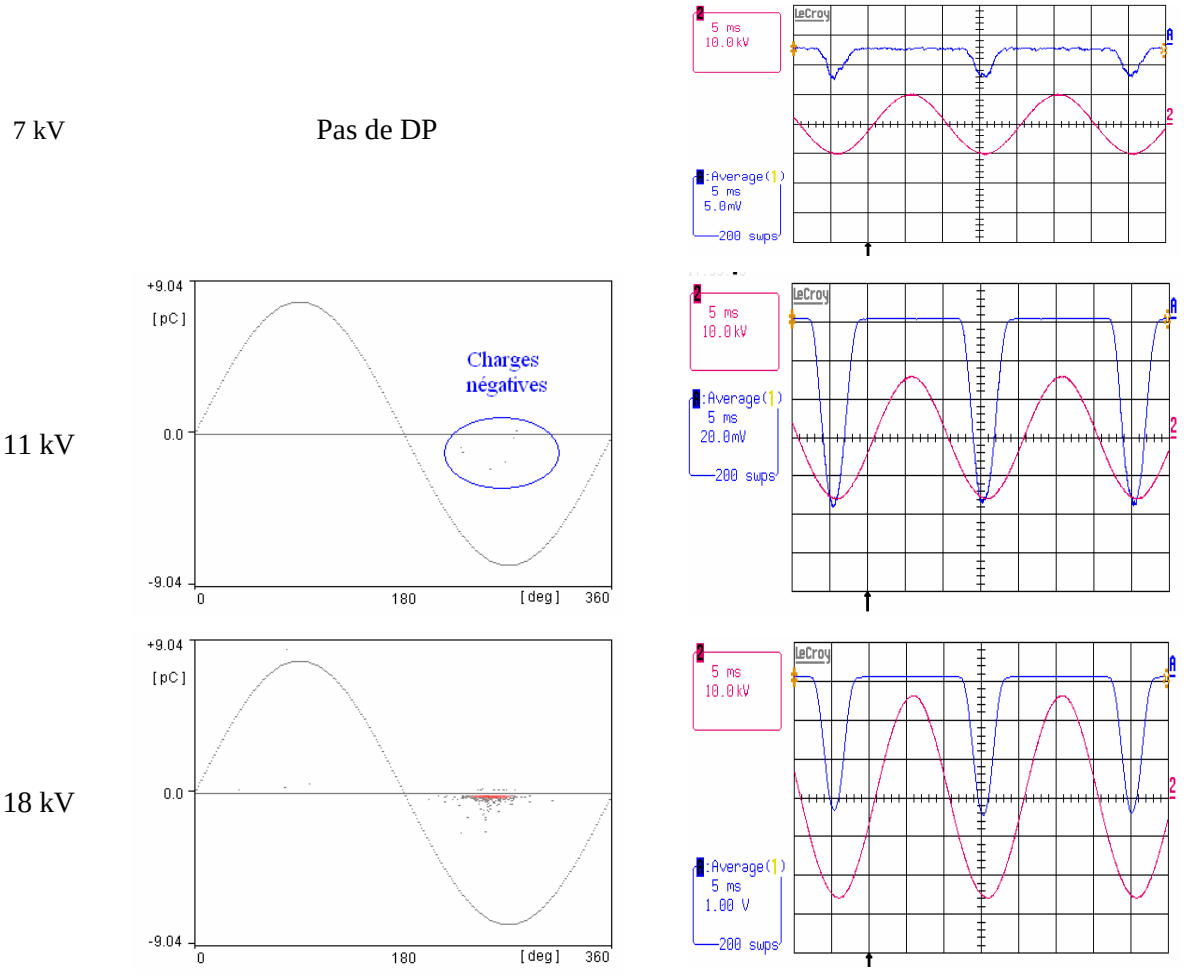


Figure III - 10 : Jarylec. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm

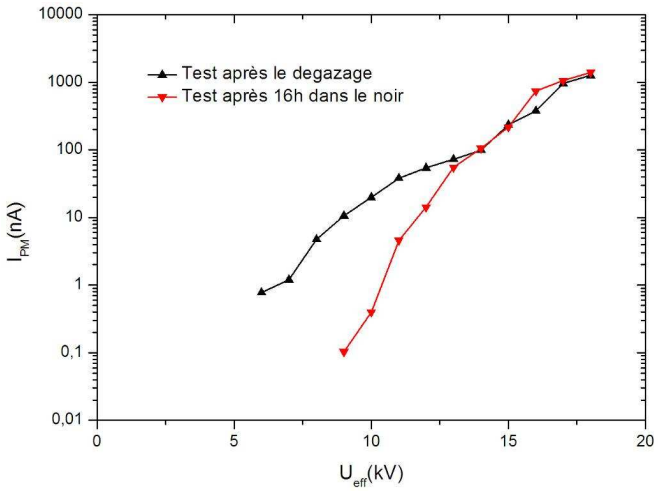


Figure III - 11 : Variation du courant de PM dans le Jarylec après repos dans l'obscurité pendant 16 h. Point P6 de 5µm, distance inter-électrode de 9mm

I.4. Ugilec ®

Les mesures réalisées dans un liquide légèrement polaire, l'Ugilec® (permittivité 5,1) montrent encore un autre type de comportement. Comme dans le Jarylec, la TADP est élevée ($12kV_{eff}$), et uniquement de petites DP négatives et positives inférieures à 7pC sont observées jusqu'à des tensions élevées ($18kV_{eff}$).

12 kV

13 kV

18 kV

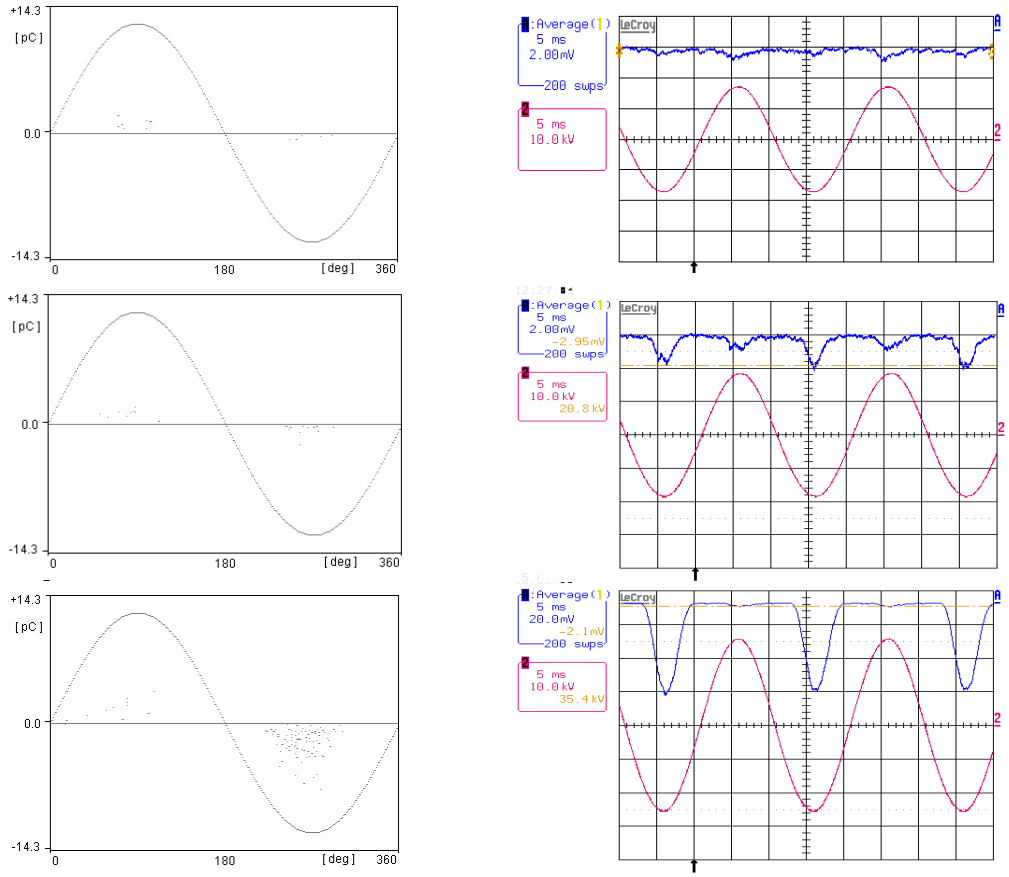


Figure III - 12 : Ugilec. Pointe P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9 mn.

Par rapport au Jarylec, il n'y a pas de lumière mesurée en dessous de TADP. La lumière enregistrée est faible, en phase avec les maxima de tension dans les deux polarités, et apparaît dès que la TADP est atteinte. Comme pour les DP, le photo-courant est plus important pendant les alternances négatives, en particulier pour les niveaux de tension les plus élevés. Le photo-courant constitue ici un bon indicateur de l'activité des DP.

I.5. Mesures sous tension impulsionelle

Des essais ont été réalisés avec une tension impulsionelle sur les mêmes liquides en géométrie pointe-plan. En effet, il est connu que sous tension alternative ou continue, le champ à la pointe (et donc la génération des streamers) est fortement influencé par la présence de charges d'espaces injectées dans le liquide à des tensions inférieures aux tensions d'apparition de décharges [83]. Ceci conduit à une diminution du champ réellement présent à la pointe, par rapport au champ théorique calculé sans charges d'espace. Comme conséquence importante, la tension d'apparition de décharges avec une pointe fine sous tension impulsionelle (avec laquelle il n'y a pas d'influence des charges injectées) devient nettement inférieure à celle mesurée sous tension alternative. Ceci a été vérifié dans le cas de l'huile minérale de transformateur [83, 84].

Nous avons tenté de détecter l'apparition des DP en utilisant la lumière émise sous tension impulsionelle, mais ceci n'a pas donné de résultats concluants :

- dans les liquides comme l'huile silicone, la quantité de lumière est très faible, et il n'est pas possible de distinguer les impulsions de lumière dues aux décharges de celles dues au bruit de fond du PM. En effet, avec une pointe, le renforcement de champ est très localisé et un seul streamer peut être généré à chaque impulsion ;

- dans les liquides comme l'huile minérale et surtout le Jarylec, l'électroluminescence du liquide masque la lumière due aux DP.

La détection de petites DP avec une sensibilité élevée sous tension impulsionelle n'est donc pas possible avec les moyens optiques utilisés dans cette thèse. Ceci peut être réalisé par la mesure résolue dans le temps des courants (ou charge) associés à la génération des streamers, mais ceci nécessite un dispositif complexe (pointe blindée et mesure différentielle équilibrée à haute fréquence [85, 86]) qui n'a pas pu être utilisé dans ce travail.

I.6. Mesures en géométrie lame-plan

Des essais ont été également réalisés avec une géométrie lame-plan (réalisée avec une lame de rasoir), avec l'objectif d'obtenir des résultats qui caractérisent le liquide seul dans une géométrie plus proche du bord de métallisation d'un substrat. En effet la géométrie pointe-plan crée un renforcement

de champ très localisé, alors qu'en lame - plan il est réparti sur toute la longueur du bord d'électrode, ce qui peut conduire à un nombre de DP beaucoup plus élevé.

Les mesures réalisées n'ont pas permis d'obtenir de résultats utilisables. Ces mesures ont donné des résultats assez bien corrélés (qualitativement) aux mesures en pointe-plan, mais ils ont également montré une forte instabilité et une mauvaise reproductibilité. Par exemple dans l'huile silicone, des DP ont été détectées, et aucune émission de lumière n'a été mesurée pour des tensions inférieures à TADP. Par contre l'apparition et l'amplitude des DP était très instable et non reproductible au cours du temps. Dans le Jarylec, une émission de lumière intense en polarité négative a été observée sans DP comme sur la Figure III - 10, mais cette émission était également instable.

I.7. Bilan des mesures

A partir des mesures de DP sur ces différents liquides nous constatons quelques caractéristiques communes, et une large diversité de comportements :

- dans tous les cas les distributions de DP ne sont pas symétriques dans les deux polarités, et les DP négatives sont générées en premier ;

- la TADP varie sensiblement, de 8kV pour la plus faible (huile silicone) jusqu'à 12 kV dans l'Ugilec ;

Les champs d'apparition des décharges partielles sur la pointe peuvent être calculés en utilisant l'approximation hyperboloïdale [87]. La valeur du champ à l'extrémité de la pointe est donnée par l'expression :

$$E_o = \frac{2.U_o}{r_o \ln(4.d / r_o)} \qquad \textbf{(Equ. III - 1)}$$

d : distance inter-électrodes

U_o : potentiel de la pointe

r_o : rayon de courbure de la pointe

Les champs de génération des streamers lents négatifs (correspondent à la TADP) dans différents liquides sont calculés et présenté dans le Tableau III - 1.

	Huile silicone	Huile de colza	Huile de transformateur	Jarylec	Ugilec
TADP en Pointe-plan	**8kV**	**11 kV**	**9 kV**	**11 kV**	**12 kV**
Champ d'apparition des décharges partielles (MV/cm)	**3.6**	**5**	**4**	**5**	**5.4**

Tableau III - 1 : TADP et champ de génération des streamer s lents négatifs dans différents liquides.

Pointe P2 et P6 : 5µm. Distance inter-électrode : 9mm

- dans la gamme de tension étudiée (jusqu'à 18kV pour éviter le claquage, soit environ 2 fois la TADP), une large dispersion de comportements est observée, en particulier en polarité positive où l'amplitude des DP peut varier de moins de 10 pC (Ugilec et Jarylec, Figure III - 10 et Figure III - 12) jusqu'à pratiquement 1000pC dans les autres liquides dans lesquels des grandes DP positives sont observées (Huile silicone, huile Minérale, Huile de Colza);

- la reproductibilité des mesures est variable, par exemple les DP dans l'huile minérale de transformateur sont particulièrement erratiques.

En ce qui concerne la lumière émise, la dispersion des comportements est encore plus large :

- dans l'Huile silicone et le Colza, l'apparition des premières DP négatives peu nombreuses produit une émission de lumière qui n'est pas mesurable par le courant moyen I_{PM} (variation très inférieure au bruit de fond du PM) ;

- Dans l'Ugilec, la mesure de lumière est bien corrélée à l'apparition des DP, et l'intensité moyenne de la lumière est également corrélée à l'activité des DP ;

- Dans l'huile minérale de transformateur et surtout dans le Jarylec, une émission de lumière intense est observée en polarité négative, depuis des tensions inférieures à TADP. Cette lumière est attribuée à l'électroluminescence du liquide ;

- Dans le cas du Jarylec et de l'huile minérale de transformateur, un phénomène nouveau a été observé : une large variation de la lumière émise quand le liquide est placé dans l'obscurité.

Le phénomène d'électroluminescence des liquides a déjà été observé, mais a fait l'objet de très peu d'études. Dans le cas du Jarylec, il semble que ce phénomène soit lié à la présence de traces de méthyl-anthracène produit lors de la synthèse de ce liquide. En effet, le méthyl-anthracène est un composé qui présente des propriétés de photoluminescence [58]. Sous l'action de divers types de contraintes (en particulier UV), ce type de matériau est porté à un état excité et revient à son état fondamental en émettant de la lumière (mécanismes de fluorescence et phosphorescence). Dans le cas de l'huile minérale, la présence de molécules insaturées aromatiques explique également l'émission de lumière observée. Angerer [82] a émis l'hypothèse que dans les liquides, l'émission de lumière en polarité négative est liée à l'excitation des molécules par des électrons dans la zone de champ très intense à la pointe.

Dans tous les cas, que la lumière soit due à un mécanisme d'électroluminescence ou aux DP, la lumière détectée est toujours pratiquement en phase avec la tension appliquée.

Dans la partie suivante, les mêmes liquides ont été utilisés avec des substrats, dans le but de déterminer le rôle du matériau d'encapsulation sur la mesure de décharges partielles et de lumière émise.

II. Mesure des décharges partielles sur des substrats dans différents liquides et un gel silicone

Pour déterminer l'influence du matériau d'encapsulation, des mesures de DP ont été réalisées sur un substrat identique recouvert successivement de gel silicone (Silgard® 527), d'huile de colza, d'huile de transformateur (Univolt®), de Jarylec® et d'Ugilec®.

Le protocole de mesures utilisé est le suivant :

- le substrat est nettoyé à l'acétone et à l'alcool puis séché à 80°C pendant 1 heure.
- le dégazage du substrat et du liquide dure 2 heures.
- le capteur de lumière (PM ou caméra CCD) est placé à la verticale de l'objet en test. Cette position permet d'observer et de mesurer le maximum de lumière.
- Les premières mesures ont été réalisées juste après le dégazage, ensuite la cellule a été laissée dans le noir 16h (1 nuit) hors tension avant les séries de mesures suivantes.

Le substrat AlN8 a été retenu pour ces tests puisqu'il apparaissait comme un « bon » substrat (chapitre II). En effet, sa TADP dans l'huile silicone est d'environ $5kV_{eff}$, le nombre des décharges et le courant de décharges ne sont pas élevés (I_{PM}<200pA à $8kV_{eff}$). Les tests ont été réalisés jusqu'à $8kV_{eff}$ pour ne pas endommager le substrat. 4 tests ont été réalisés pour chaque liquide pour évaluer la reproductibilité des résultats.

II.1. Evaluation de la TADP

La tension d'apparition des décharges partielles sur le substrat AlN8 associé aux différents matériaux est donnée dans le Tableau III - 2. Une variation de la TADP moyenne entre 5,3 kV (Huile de Colza) et 6 kV (Ugilec) est observée pour les liquides. L'erreur absolue de la mesure de TADP est assez élevée, de l'ordre de +/-500V, étant donné que la TDAP est mesurée par paliers de 500V pendant une minute. Compte tenu de cette imprécision assez élevée, l'écart entre les liquides reste faible.

	Huile silicone	Huile de colza	Huile de transformateur	Jarylec	Ugilec	Gel silicone
Test 1	5.0kV	5.0kV	6.0kV	5.5kV	6.0kV	6.5kV
Test 2	6.0kV	5.5kV	6.5kV	6.0kV	6.0kV	6.0kV
Test 3	5.5 kV	5.5kV	6.0kV	6.5kV	6.0kV	6.5kV
Test 4	-	-	6.0kV	6.5kV	6.0kV	-
Moyenne	**5.5kV**	**5.3kV**	**6.1kV**	**6.1kV**	**6.0kV**	**6.3kV**
Ecart / moyenne (%)	9.1	3.8	6.6	6.6	0.0	3.2

Tableau III - 2 : Tension d'apparition des décharges partielles sur le substrat AlN8 dans différents liquides

Il n'existe pas de corrélation entre la TADP mesurée avec le substrat, et celle mesurée en pointe-plan. Le liquide qui présente la plus faible TADP avec le substrat (Colza) présente une TADP élevée en pointe-plan, et le liquide qui présente la TADP la plus élevée en pointe-plan (Ugilec) n'est pas celui qui donne la TADP la plus élevée avec le substrat.

Il n'y pas non plus de corrélation claire avec la constante diélectrique du matériau. L'Ugilec présente une constante diélectrique de 1,8 à 2,3 plus élevée que les autres liquides, et devrait par conséquent être soumis à un champ sensiblement plus faible. De plus, c'est le liquide qui présente la TADP la plus élevée en pointe-plan. Pourtant, ce n'est pas le liquide qui donne la TADP la plus élevée avec le substrat.

II.2. Reproductibilité des mesures de décharges partielles

La TADP est assez reproductible sur l'ensemble des liquides. Dans nos séries de tests, les liquides et le substrat ne présentent pas de dégradation mesurable. La Figure III - 13 représente des exemples d'évolution du courant moyen de DP pendant des tests répétés dans les mêmes conditions. Peu d'évolution apparaît entre les essais. Une comparaison de tous les liquides sur la Figure III - 14 met en évidence le fait que la nature du liquide a très peu d'effet sur la réponse du substrat. Les écarts sont peu significatifs si on considère la reproductibilité des mesures réalisées avec un seul liquide.

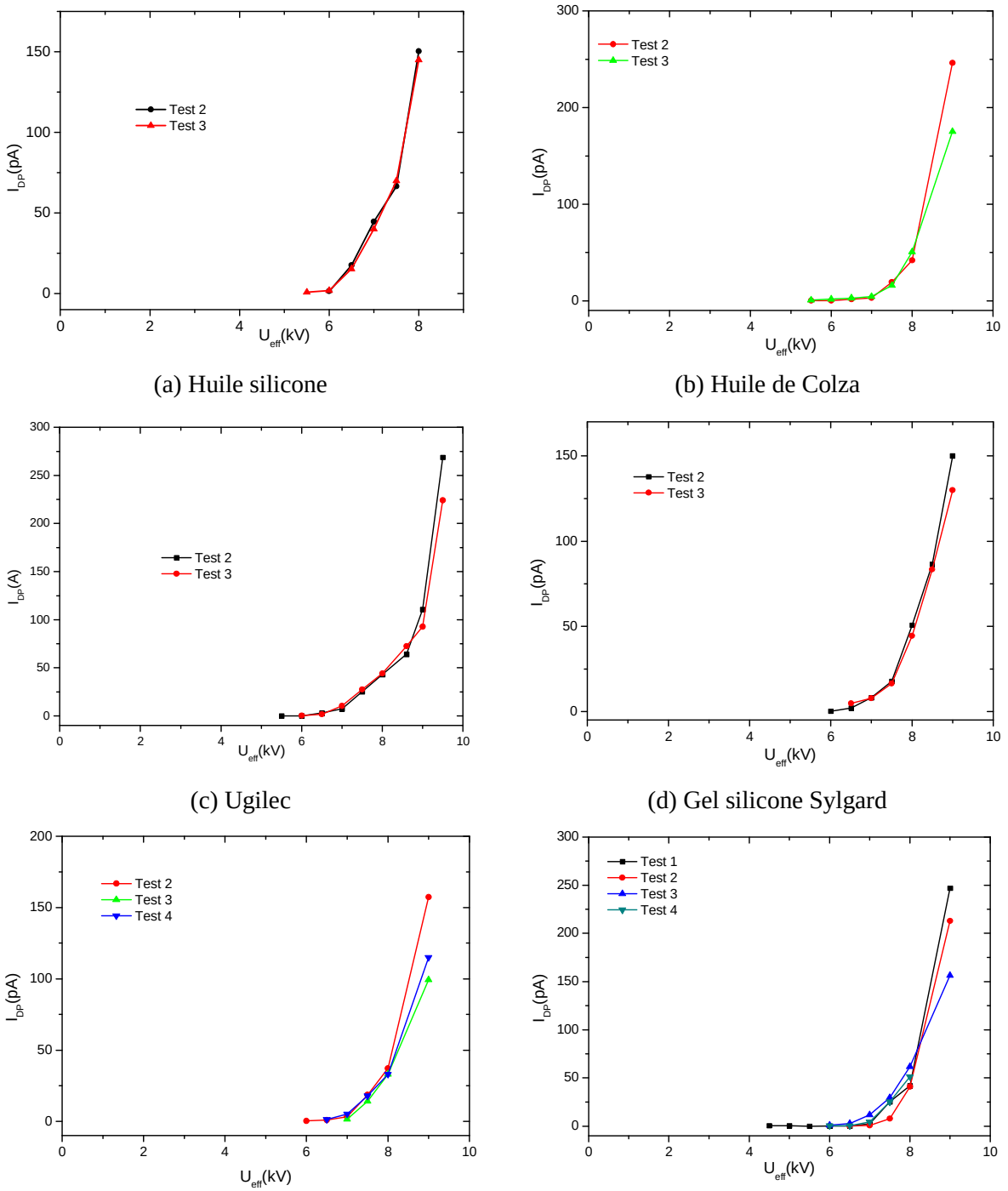


Figure III - 13 : Evolution du courant moyen de décharges I_{DP} en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8

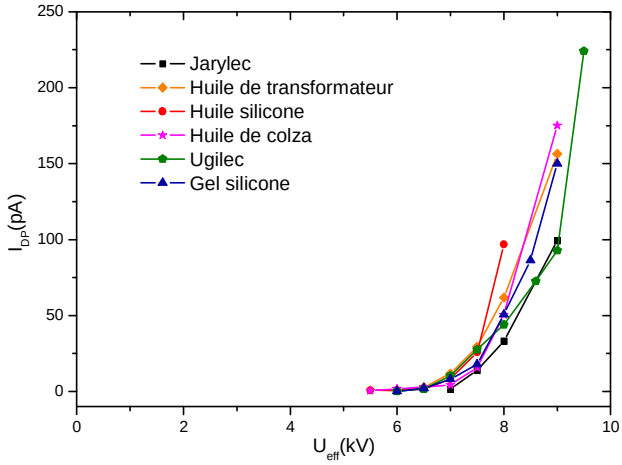
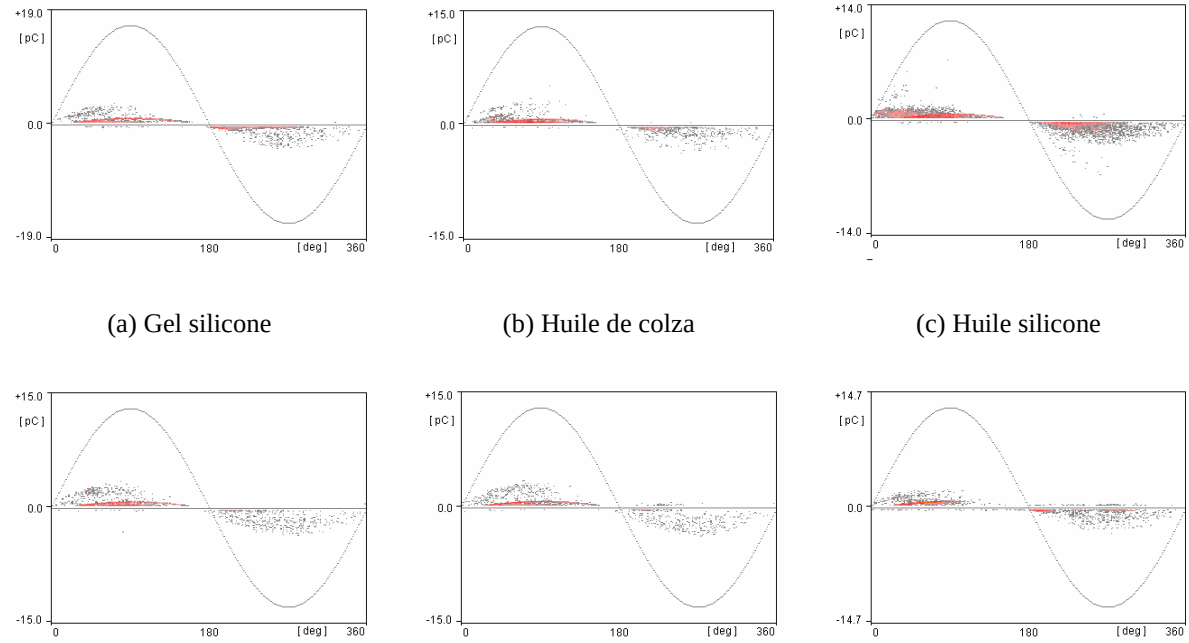


Figure III - 14 : Evolution du courant de décharges moyen en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8 dans différentes huiles et dans le gel.



(a) Gel silicone (b) Huile de colza (c) Huile silicone

(d) Huile de transformateur (e) Jarylec (f) Ugilec

Figure III - 15 : Distribution de charges en fonction de la phase sur le substrat AlN8 à 8kV$_{eff}$ dans différents matériaux. a : Gel silicone Sylgard 527, b : Huile de colza, c : Huile silicone Rhodorsil 47V350, d : Huile de transformateur, e : Jarylec C101, f : Ugilec

II.3. Conclusion sur l'origine des DP avec les substrats enrobés

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus en configuration pointe-plan montre des distributions de DP très différentes. En pointe-plan, les distributions ne sont pas symétriques, ce qui n'est pas le cas avec le substrat. Entre les liquides, des différences très importantes existent en

géométrie pointe-plan dans la gamme de tension (TADP – 2xTADP), particulièrement en polarité positive : existence de grandes DP (≈ 1nC) dans certains liquides, au lieu de 10 pC dans d'autres. Ces caractéristiques ne sont pas retrouvées dans les mesures sur les substrats sur une gamme de tension comparable (TADP – 2xTADP). Par ailleurs, le caractère très erratique des DP dans certains liquides (par exemple huile minérale) n'est pas retrouvé sur le substrat, avec lequel les DP sont stables et reproductibles. Il n'y pas non plus de corrélation entre le classement des liquides en fonction de la TADP mesurée en géométrie pointe-plan et avec le substrat.

Toutes ces mesures confirment la conclusion déjà proposée au chapitre II : les DP mesurées sur des substrats enrobés de gels ou de liquide n'ont pas lieu dans le matériau d'encapsulation, mais bien dans le matériau solide lui-même, quand celui-ci est de type céramique fritté.

Cette conclusion est également cohérente avec l'observation suivante : avec un gel silicone, les mesures sur le substrat sont très stables et reproductibles comme avec un liquide, alors que les mesures de Do [6] dans le gel en pointe-plan ont montré une dégradation rapide du gel (création de micro-cavités) accompagnée d'une diminution de la TADP. Avec un substrat recouvert de gel, une dégradation irréversible n'a été observée par Do que pour des tensions très supérieures à TADP (environ deux fois plus élevées). Il est donc probable que ce seuil de dégradation corresponde en fait au véritable seuil d'apparition de DP dans le gel.

Dans le cas des substrats enrobés de liquides, il est également possible que des petites DP puissent apparaître dans le liquide sous tension très supérieure à TADP, sans provoquer de dégradations irréversibles (le liquide étant « auto-cicatrisant » contrairement au gel). Cependant, il n'est pas possible de distinguer l'apparition de ces petites DP sur les enregistrements (les petites DP dans les liquides ont des amplitudes comparables à celles présentes dans le substrat, quelques pC). On peut également faire l'hypothèse que le seuil de dégradation irréversible observé à environ 2xTADP dans le chapitre II avec l'huile silicone corresponde en fait à l'apparition de grandes décharges positives dans le liquide. Dans ce cas, ce seuil de dégradation pourrait varier fortement en fonction de la nature du liquide (par exemple avec du Jarylec, dans lequel aucune grande DP positive n'est observée en géométrie pointe-plan dans les mêmes conditions). Ce type d'essai étant destructif, un grand nombre de substrats serait nécessaire pour vérifier cette hypothèse, ce qui n'a pas été réalisé dans ce travail.

Dans le cas d'un substrat époxy qui ne présente pas de DP internes, les DP mesurées (voir paragraphe VI du chapitre I) apparaissent dans le matériau d'encapsulation, et possèdent logiquement toutes les caractéristiques observées en pointe-plan : dissymétrie dans les deux polarités, forte instabilité, caractère rapidement destructif, lumière émise faible et très localisée.

En ce qui concerne l'existence de décharges partielles dans des matériaux céramiques qui contiennent des pores de quelques µm, il n'existe que très peu de références bibliographiques. Deux

études réalisées sur le $BaTiO_3$ (matériau à grande permittivité utilisé pour réaliser des condensateurs) ont signalé l'existence de DP dans ce matériau [70, 71]. Dans [70], la température de frittage du matériau est compromise entre 1300 et 1450°C, ce qui provoque une modification de la taille moyenne des pores, entre 0,5 et 14,9µm. Ceci provoque logiquement une diminution (de 1 à 0.5 kV/mm) du champ d'apparition de DP de petites amplitudes (quelques pC), et également du champ de claquage du matériau (de 3,5 à 2,5 kV/mm) pour une épaisseur de 1mm. Dans [71], des mesures de DP ont été réalisées avec une sensibilité beaucoup moins grande (DP > 100pC) sur des couches minces (30 à 50µm) de $BaTiO_3$, dont la permittivité varie entre 60 et 7000 suivant les conditions de fabrication. Logiquement, la TADP diminue et l'activité des DP augmente quand la permittivité du matériau est plus élevée (renforcement du champ sur les pores). Pour des couches de permittivité 60, les tensions d'apparition de DP sont au minimum de 300V, ce qui correspond à un champ appliqué d'environ 10kV/mm sur le matériau. Les auteurs considèrent que la pression à l'intérieur des pores est faible, de l'ordre de 27kPa (0,27 bar), en considérant que le matériau a été fritté à haute température à pression atmosphérique dans l'air, puis ensuite refroidi. Ils considèrent également que les pores sont fermés de manière hermétique. En fonction de la taille des pores (1 à 10µm), la loi de Paschen indique des tensions d'allumage de DP autour du minimum de Paschen , de 260V à environ 700V.

Dans le cas de matériaux comme l'AlN et Al_2O_3, l'existence de DP n'a pas été rapportée. Etant donné que la permittivité du matériau est plus faible que le BaTiO3, la tension sur les pores est moins élevée, et on devrait logiquement observer des DP pour des champs moyens plus élevés appliqués au matériau. Par exemple, en comparaison d'un matériau de permittivité 60 dans lequel on observe des DP pour des champs moyens de 10kV/mm, les DP dans l'AlN (permittivité de 9) devraient se produire à environ 60kV/mm. Dans nos essais, avec un champ moyen de 8kV/mm appliqué au matériau à TADP (5kV/630µm), il n'y a effectivement pas d'allumage généralisé des DP dans tout le volume. Dans la zone de renforcement du champ au bord de métallisation, le champ dépasse largement cette valeur (supérieures à 100 kV/mm [6]), et l'allumage des DP est alors possible.

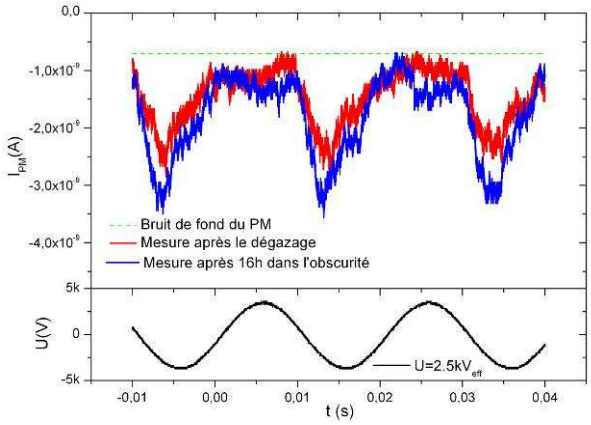
III. Mesure de l'émission lumineuse sur des substrats dans différents liquides et un gel silicone

Simultanément aux mesures de DP, des mesures d'émission lumineuse ont été faites sur le substrat avec différents types de liquide et un gel silicone. Pour chaque liquide testé, deux séries de mesures ont été réalisées. La première consiste à effectuer les mesures juste après avoir placé l'échantillon dégazé dans l'enceinte, la deuxième après avoir laissé 16h le substrat dans l'obscurité et hors tension.

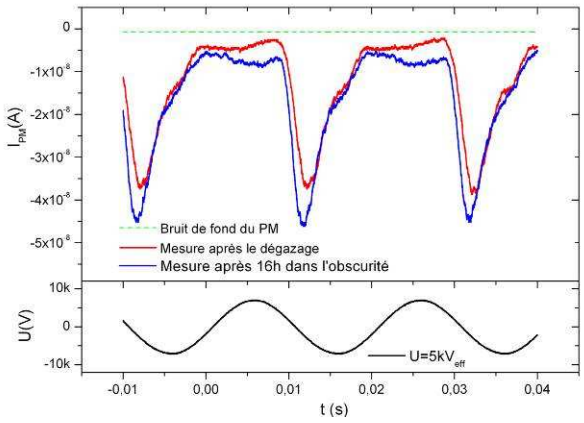
III.1. Mesures dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350

La plupart des résultats sur l'huile silicone on été présentés au chapitre II. La Figure III - 16 montre l'évolution temporelle du photo-courant après le conditionnement dans le noir. Sur ces figures nous retrouvons l'émission intense de lumière pendant le dV/dt négatif (attribuée à l'électroluminescence de l'AlN), et la lumière beaucoup plus faible émise en polarité positive. Après mise dans l'obscurité, ces deux phénomènes sont toujours observés et ont une intensité qui a faiblement varié (légère augmentation) en comparaison avec d'autres liquides. La Figure III - 17 montre la variation du courant moyen du PM $\boldsymbol{I_{PM}}$ avant et après mise dans l'obscurité.

2,5 kV
(< TADP)



5 kV
(TADP)



8 kV
(> TADP)

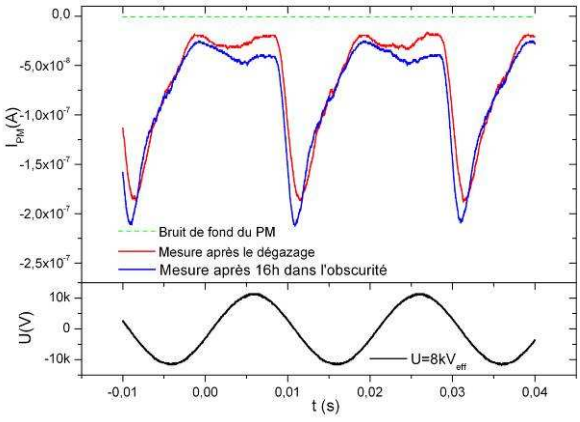
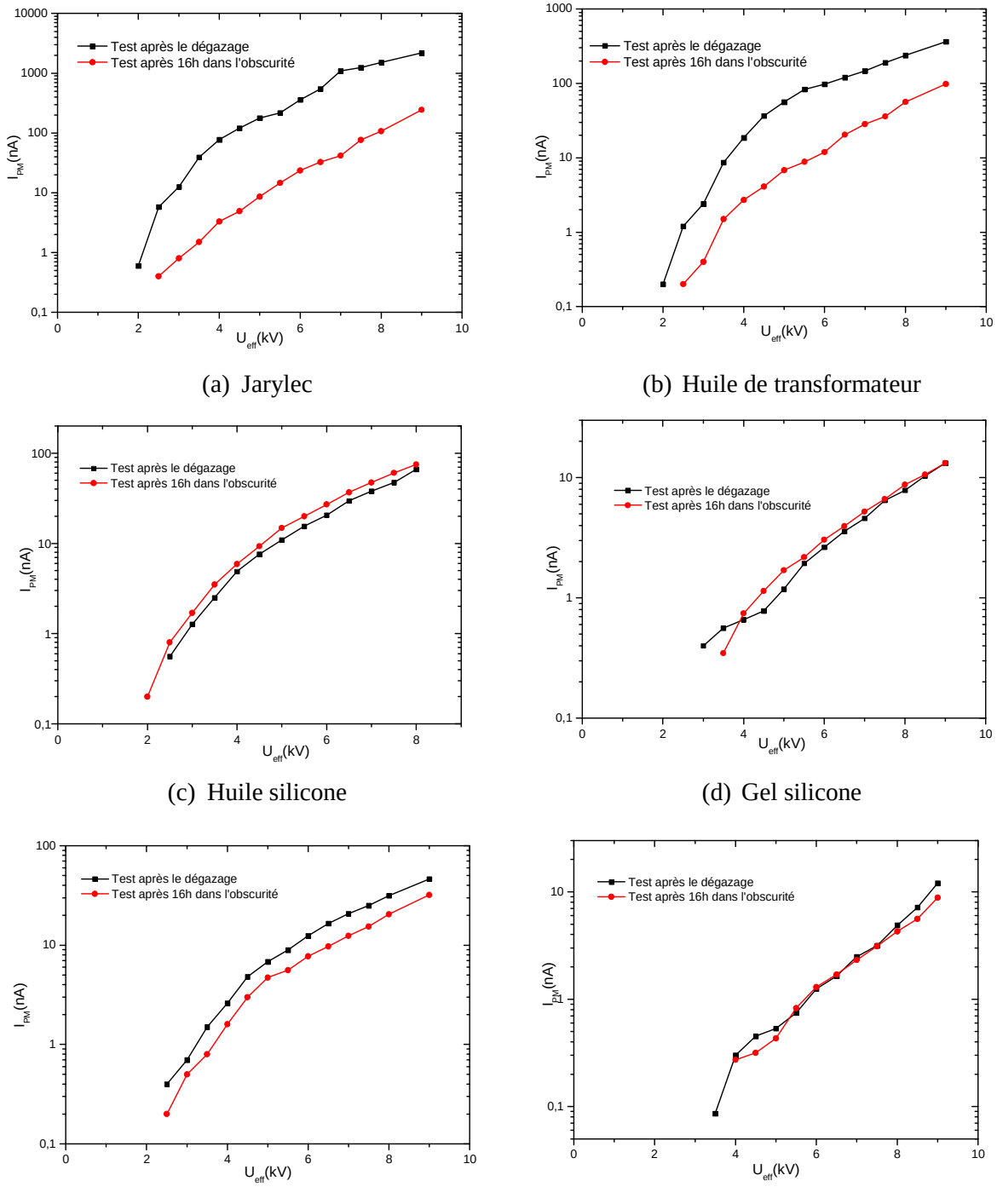


Figure III - 16 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'huile silicone Rhodorsil 47V350 avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité

Etant donné qu'en géométrie pointe-plan et lame- plan aucune lumière n'a été détectée en dessous de TADP dans l'huile silicone, nous pouvons conclure que la lumière observée ne provient que du substrat. Nous avons vu au chapitre II que dans le cas de l'AlN, cette lumière est très probablement due aux DP internes et à l'électroluminescence du matériau.



(a) Jarylec (b) Huile de transformateur

(c) Huile silicone (d) Gel silicone

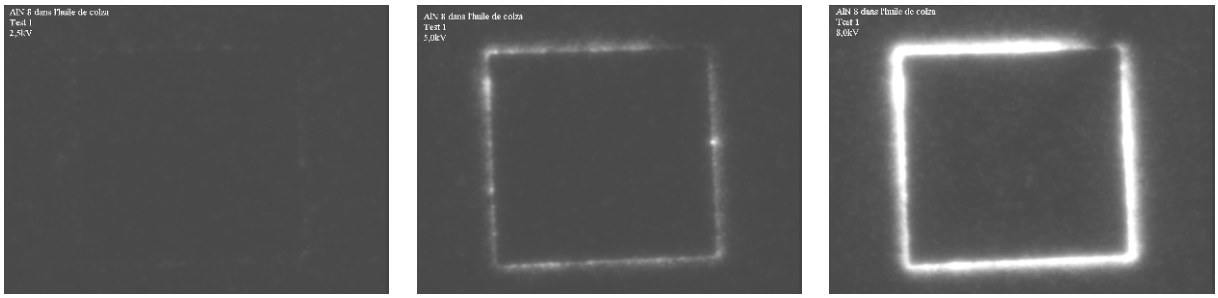
(e) Huile de colza (f) Ugilec T

Figure III - 17 : Photo - courant moyen I_{PM} sur le substrat AlN8 dans divers liquides et un gel, avant et après 16h dans l'obscurité

III.2. Mesures dans l'huile de colza

Dans l'huile de colza, les images de la lumière émise sur le substrat (Figure III - 18) donnent un comportement très proche de celles obtenues dans l'huile silicone. Nous observons toujours la lumière homogène à partir d'une faible tension inférieure à la TADP (vers 2,5kv$_{eff}$). L'intensité de la lumière augmente avec la tension appliquée. Il n'y a pas de changement entre les images observées après le dégazage et celles obtenues après le conditionnement de la cellule dans l'obscurité pendant 16h.

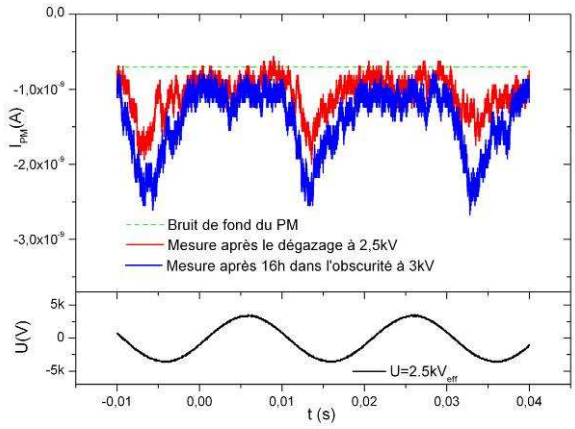
L'évolution temporelle du photo-courant est donnée par la Figure III - 19. Comme dans l'huile silicone, une émission de lumière plus intense est observée pendant le dV/dt négatif. La différence entre les deux polarités est nettement plus faible que dans l'huile silicone, particulièrement à haute tension. Après 16h dans l'obscurité, on observe une diminution sensible de la lumière émise, en particulier pendant l'alternance négative. La Figure III - 17 montre la variation du courant moyen du PM $\boldsymbol{I_{PM}}$ avant et après mise dans l'obscurité. On voit une légère diminution de la lumière émise après la mise dans l'obscurité (environ un facteur 1,5).



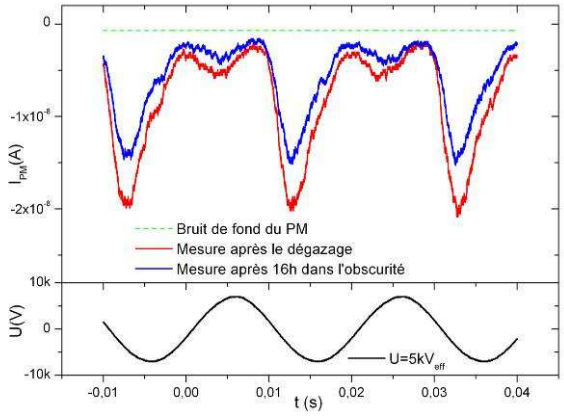
(a) (b) (c)

Figure III - 18 : Image du substrat AlN8 dans l'huile de colza (a) à 2.5kV$_{eff}$; (b) à 5kV$_{eff}$, (c) à 8kV$_{eff}$

2,5 kV
3 kV après obscurité
(< TADP)



5 kV



8 kV
9 kV après obscurité
(> TADP)

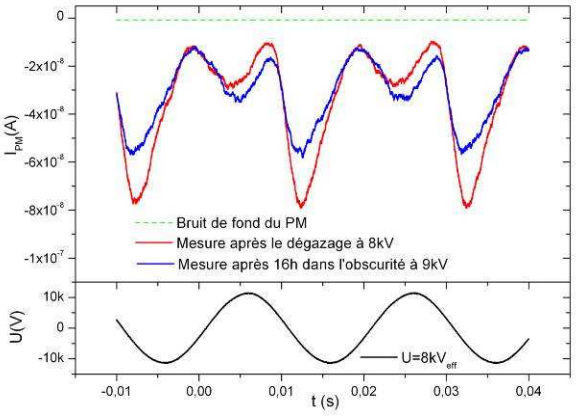


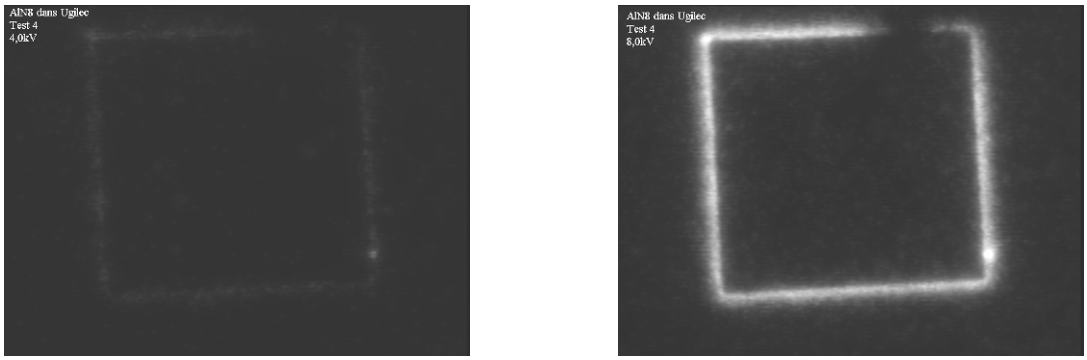
Figure III - 19 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'huile de Colza avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité

III.3. Mesures dans l'Ugilec®

Les images présentées (Figure III - 20) montrent toujours le même comportement, avec une lumière uniforme le long de la métallisation, d'intensité plus faible que dans les autres liquides. Le photo-courant (Figure III - 21) est comparable avec celui mesuré dans l'huile de Colza, avec une différence encore plus faible entre les deux polarités. La lumière émise est en phase avec la tension. Après mise dans l'obscurité, l'intensité en polarité négative diminue faiblement, et la différence entre

les deux polarités disparait complètement. La lumière émise devient alors symétrique dans les deux polarités. Ceci est corrélé aux DP enregistrées dans les mêmes conditions, pratiquement identiques dans les deux alternances (Figure III - 15).

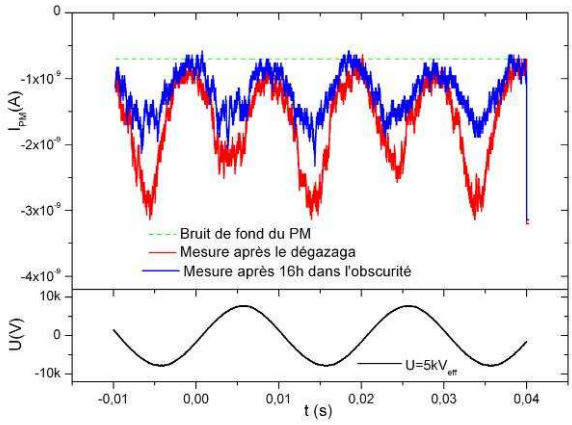
La Figure III - 17 montre la variation du courant moyen du PM I_{PM} avant et après mise dans l'obscurité. Pratiquement aucune variation n'est observée.



(a) (b)

Figure III - 20 : Lumière émise sur le substrat AlN8 dans l'Ugilec T a : 4kV$_{eff}$. b : 8kV$_{eff}$

5 kV



9 kV

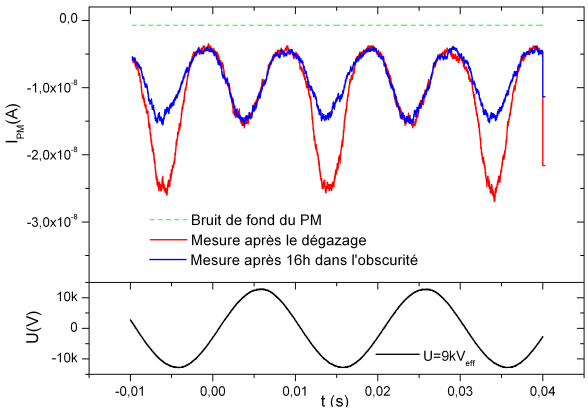


Figure III - 21 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans l'Ugilec® T avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité

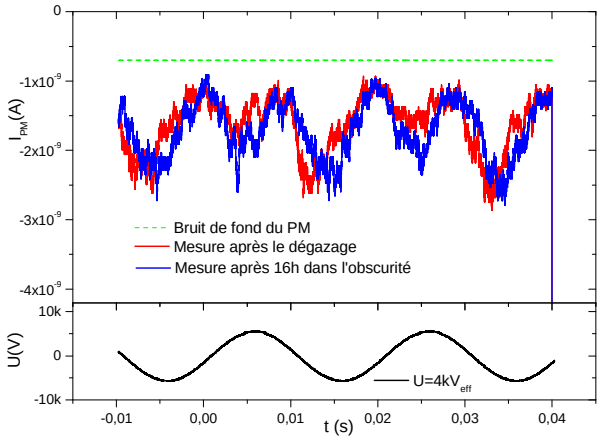
III.4. Mesures dans le gel silicone

Le résultat des mesures dans le gel silicone est présenté sur les Figure III - 22 et Figure III - 23. Le comportement du gel est semblable à ceux obtenus pour certains liquides (huile silicone, huile de colza et Ugilec). La lumière a été détectée en dessous de la TADP (6.3kV$_{eff}$) à partir de 3.0kV$_{eff}$ (Figure III - 17).

L'évolution temporelle du photo-courant est présentée par la Figure III - 22. La différence d'amplitude de la lumière entre les deux polarités est petite. Après 16h dans le noir, cette différence est négligeable. Ce résultat est identique à celui obtenu dans le Ugilec, et bien corrélé aux DP enregistrées.

La Figure III - 23 met en évidence une lumière homogène émise au bord de la métallisation. Il n'y a aucun effet du conditionnement dans l'obscurité pendant 16h.

4kV



9kV

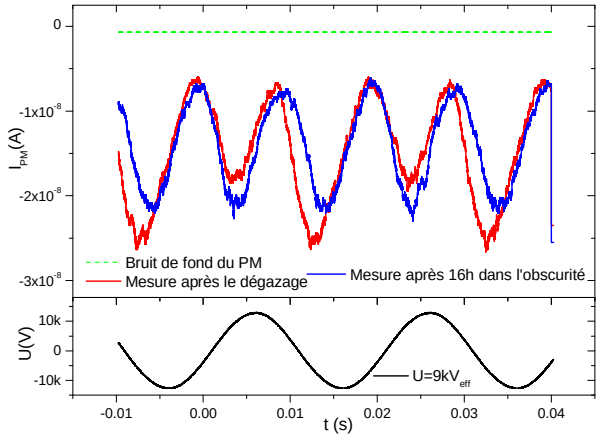
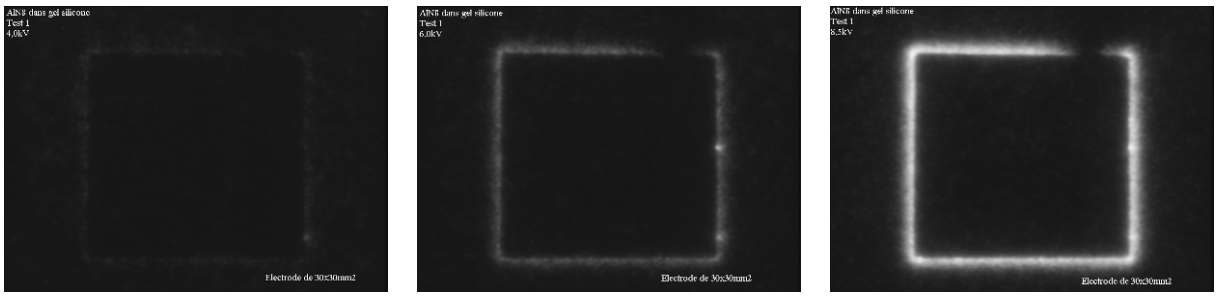


Figure III - 22 : Photo - courant sur le substrat AlN8 dans le gel silicone avant (en rouge) et après (en bleu) 16h dans l'obscurité.



4kV 6kV 8.5kV

Figure III - 23 Lumière émise sur le substrat AlN8 dans le gel silicone a : 4kV$_{eff}$. b : 6kV$_{eff}$ et c : 9kV$_{eff}$

III.5. Mesures dans le Jarylec

Les deux liquides suivants (Jarylec et huile minérale de transformateur) sont les liquides dans lesquels un phénomène d'électroluminescence important a été observé en géométrie pointe-plan, en polarité négative. Avec le substrat, ces liquides donnent une réponse très différente des autres liquides, avec en particulier une influence très grande de la mise dans l'obscurité.

Juste après le dégazage, de la lumière est observée depuis des tensions très basses (environ 2kV) sous forme de points lumineux le long de la métallisation (Figure III - 24). La lumière s'intensifie fortement avec la tension. A 8 kV$_{eff}$, en raison de l'élargissement des points lumineux et de la saturation de la caméra, la lumière très intense a un aspect homogène le long de la métallisation.

Après avoir laissé le substrat dans l'enceinte hermétique dans l'obscurité pendant 16h, la lumière émise diminue fortement. A 3 kV$_{eff}$ (tension inférieure à la TAPD) la lumière est devenue à peine visible. A plus haute tension, on voit une zone faiblement lumineuse homogène comme dans les autres liquides, sur laquelle quelques points plus lumineux restent visibles.

L'évolution temporelle du photo-courant est donnée sur la Figure III - 25. En dessous de la TADP, à très basse tension (2kV$_{eff}$) l'émission de lumière est détectable et presque symétrique dans les deux polarités. A plus haute tension (5kV$_{eff}$) l'émission est nettement prépondérante pendant l'alternance négative. Après mise dans l'obscurité, à basse tension la lumière est sensiblement réduite, particulièrement en polarité positive. Sous plus haute tension (5 kV$_{eff}$) l'émission de lumière garde la même répartition dans les deux polarités après mise dans l'obscurité, mais est réduite de manière considérable (environ un facteur 20). La Figure III - 17 montre la très forte réduction du courant moyen du PM après mise dans l'obscurité. Quand l'échantillon subit plusieurs cycles de mise sous lumière et dans l'obscurité, ce phénomène est observé à chaque cycle (Figure III - 26).

La décroissance du photo-courant après conditionnement dans le noir sans contrainte électrique met en évidence un phénomène de luminescence excitée par les photons. Cette photoluminescence diminue avec le temps dans le Jarylec®. Un phénomène comparable de

photoluminescence qui décroit dans le temps a été observé sur le substrat d'AlN (chapitre précédent), cependant, plusieurs facteurs montrent que l'effet de la mise dans l'obscurité observé ici est essentiellement dû au liquide :

- la décroissance de la lumière après mise dans l'obscurité est beaucoup plus faible (voire nulle) avec d'autres liquides comme l'huile silicone ;
- un effet comparable est observé dans le liquide seul en géométrie pointe plan.

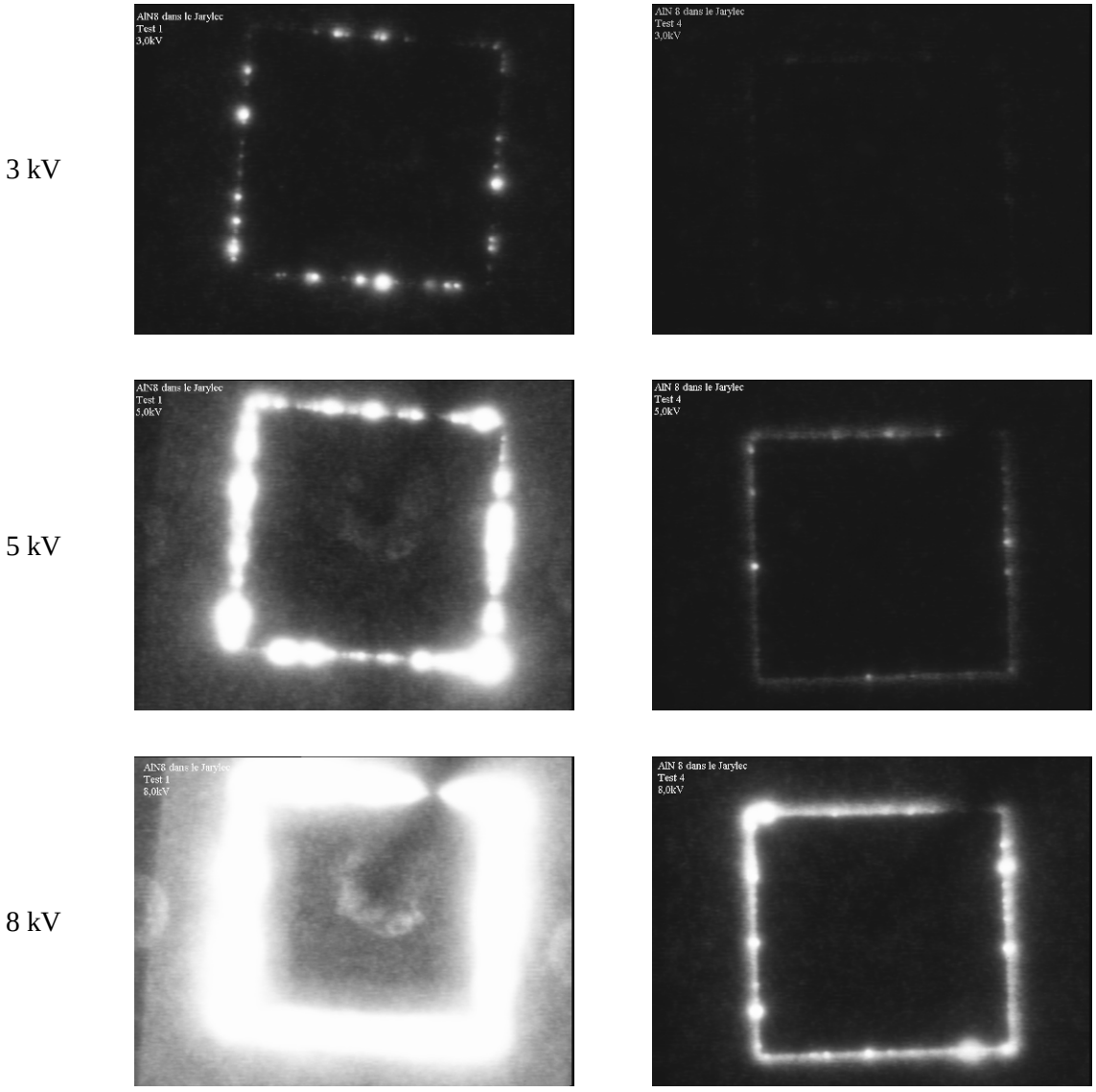


Figure III - 24 : Image du substrat AlN8 dans le Jarylec® juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité

Les images obtenues avec le Jarylec sont dues à la superposition de deux phénomènes lumineux différents. Lorsque le substrat a été exposé à la lumière peu de temps avant l'essai,

l'électroluminescence du liquide est très forte et les points lumineux observés à basse tension ($3kV_{eff}$, Figure III - 24) correspondent très probablement à des zones où le champ dans le liquide est renforcé localement, par exemple sur des irrégularités du bord de métallisation. Dans ce cas, la visualisation à haute sensibilité et l'utilisation d'un liquide fortement électroluminescent donne la possibilité intéressante de « voir » directement ces zones de renforcement du champ.

2 kV

5 kV

7.5kV

9kV après obscurité

(> TADP)

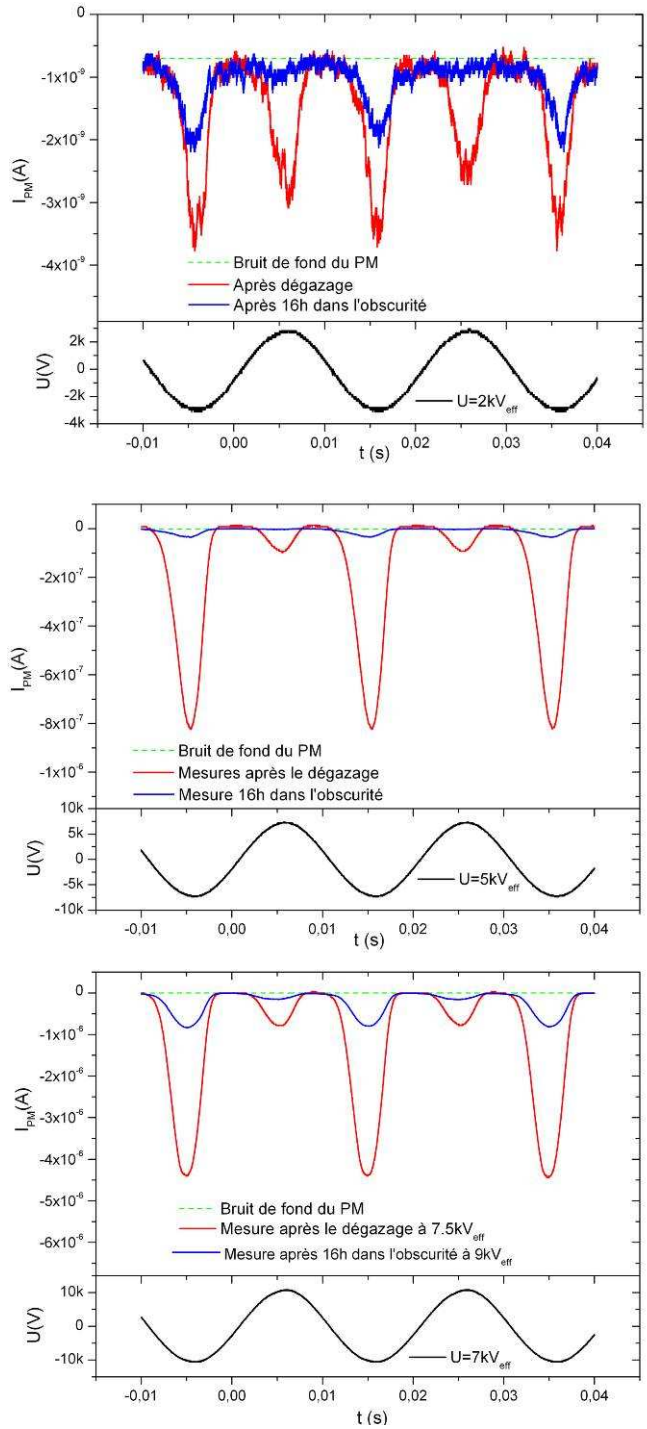


Figure III - 25 : Photo-courant sur le substrat AlN8 dans le Jarylec® juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité

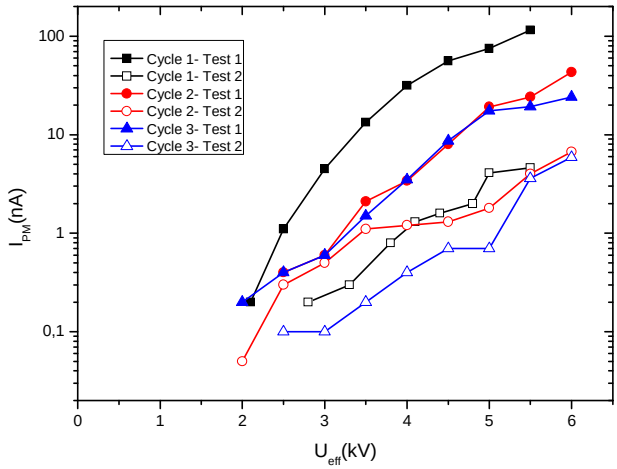


Figure III - 26 : Evolution du photo-courant dans le Jarylec® pendant plusieurs cycles consécutifs durant lesquels l'échantillon est d'abord exposé à la lumière avant l'essai (test1), puis plongé dans le noir pendant 16h avant l'essai (test 2). Dans le cycle 1 l'échantillon est resté plusieurs heures à la lumière et pendant les autres cycles le substrat a été à la lumière quelques minutes

Après mise dans l'obscurité, l'électroluminescence du liquide a fortement diminué, et la lumière homogène observée, beaucoup plus faible, devient pratiquement identique à celle vue avec d'autres liquides comme l'huile silicone. Quelques points lumineux superposés à cette lumière homogène restent visibles à haute tension (5 et 8kV_{eff}, Figure III - 24). Dans l'huile silicone, il a été conclu que cette lumière homogène ne peut provenir que du substrat.

III.6. Mesures dans l'huile de transformateur Univolt®

La réponse lumineuse du substrat dans ce liquide est similaire à celle obtenue dans le Jarylec®, avec une intensité émise nettement plus faible (Figure III - 27 et Figure III - 28).

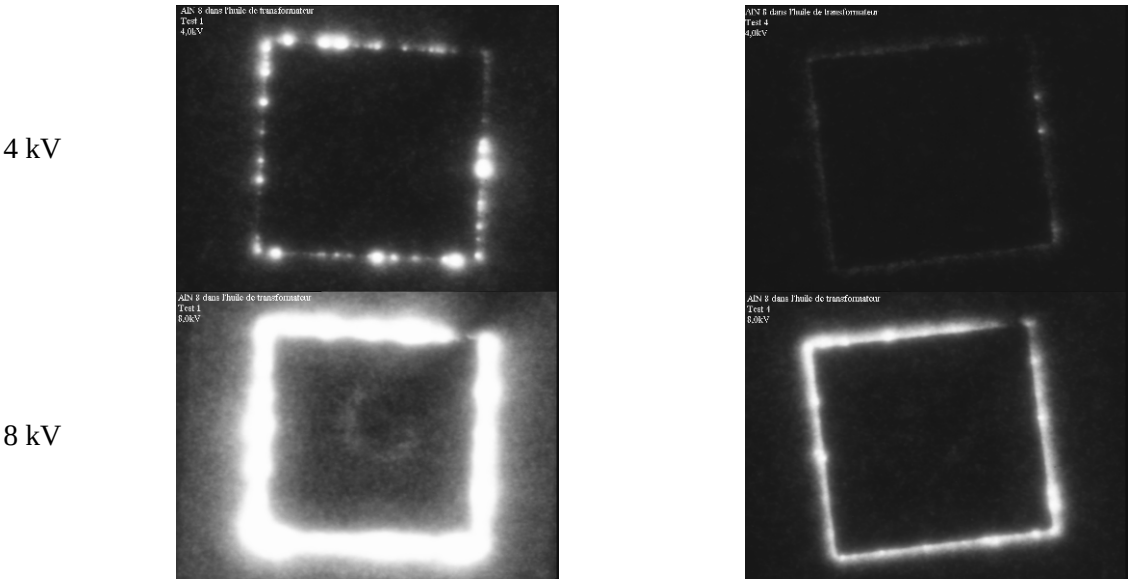
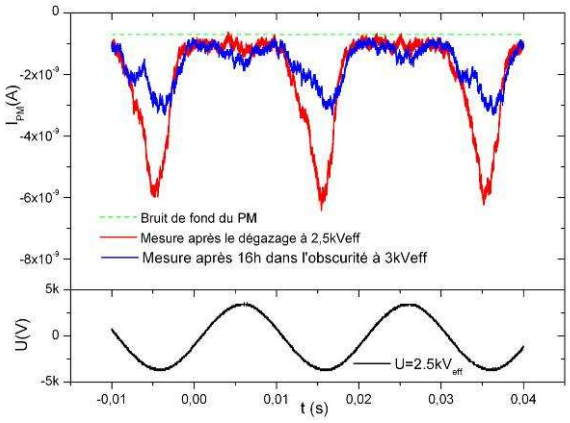


Figure III - 27 : Image du substrat AlN8 dans l' Univolt ® 54 juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité

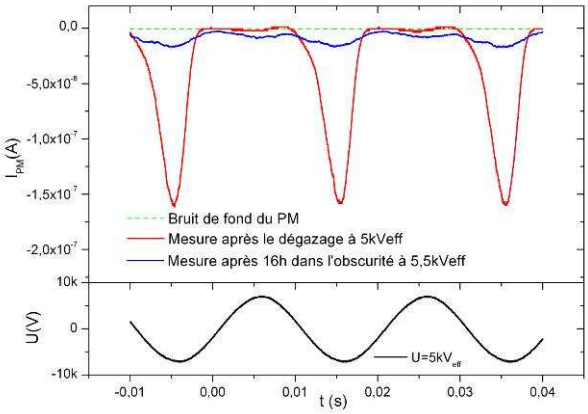
Des points lumineux sont également observés à basse tension lorsque le substrat a été soumis à la lumière. L'évolution du courant moyen $\boldsymbol{I_{PM}}$ après mise dans l'obscurité montre une diminution du signal de près d'une décade (Figure III - 17).

La forme du photo-courant instantané montre également une amplitude du signal pendant la polarisation négative beaucoup plus grande que pendant l'alternance positive. Après mise dans l'obscurité, c'est essentiellement la lumière émise en polarité négative (due au liquide) qui diminue fortement. L'émission de lumière (par exemple à 9 kV) devient alors presque symétrique dans les deux polarités.

2,5 kV



5 kV



9 kV

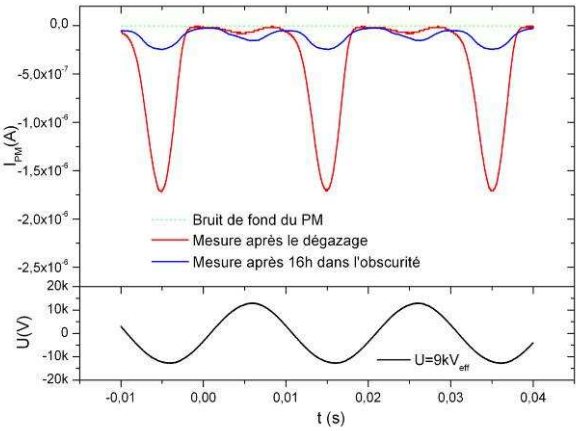


Figure III - 28 : Photo-courant sur le substrat AlN8 dans l'Univolt ® 54 juste après dégazage et après 16h dans l'obscurité

III.7. Mesures avec un substrat d'Alumine Al_2O_3

Un nombre beaucoup plus réduit d'essais a été réalisé avec un substrat d'Alumine, avec deux liquides aux caractéristiques très différentes : l'huile silicone et le Jarylec (Annexe 2). Ces mesures donnent des résultats cohérents avec ceux obtenus avec l'AlN. Avec l'Huile silicone pratiquement aucune influence de la mise dans l'obscurité n'est observée sur l'émission de lumière. Etant donné que l'huile silicone et l'Al_2O_3 ne présentent pas de propriétés d'électroluminescence, il avait été conclu dans le chapitre précédent que la lumière provient essentiellement des DP qui apparaissent dans le solide près de la surface extérieure.

Dans le Jarylec, nous retrouvons également des propriétés observées avec l'AlN : une intense émission de lumière (sous forme de points lumineux), qui décroit fortement quand le substrat est placé dans l'obscurité. Etant donné que l'Al_2O_3 ne présente pas de propriétés de photoluminescence et d'électroluminescence, ceci montre bien que ces phénomènes sont dus aux propriétés du liquide.

III.8. Discussion : origine de la lumière mesurée sur les substrats enrobés par différents liquides ou gels

Dans son étude des substrats d'AlN enrobés de gel silicone, Do [6] avait fait l'hypothèse suivante sur l'origine de la lumière mesurée :

- en dessous de TDAP : électroluminescence du substrat d'AlN ;
- au dessus de TADP : décharges partielles dans le gel.

Les mesures de lumière résolues dans le temps, et l'influence de la nature des matériaux (substrat et encapsulant) étudiée dans ce travail montre que l'origine de la lumière est en réalité beaucoup plus complexe. L'objectif des mesures de lumière réalisées ici (détecter et mesurer des DP avec des ondes de tension de formes quelconques) impose de mieux connaitre l'origine de la lumière émise, et nous verrons que dans certains cas il n'y a pas de corrélation simple entre l'activité des DP et l'intensité de la lumière émise.

Les mesures réalisées permettent de mettre en évidence différents mécanismes d'émission de lumière par les substrats enrobés de gel ou de liquide:

- **l'électroluminescence de l'AlN** (EL_{AlN}) caractérisée par une émission de lumière reproductible et intense pendant les $dV/dt < 0$, observée à des tensions << TADP ;
- **les décharges partielles dans les matériaux solides céramiques** AlN et Al_2O_3 (DP_{sol}), reproductibles, généralement symétriques dans les deux polarités, pratiquement en phase avec la tension appliquée, détectées électriquement à partir de TADP, mais pouvant éventuellement également exister à des tensions plus basses (DP de très petites amplitudes non détectées).

- **l'électroluminescence de certains liquides** (EL_{liq}) : Jarylec, huile minérale, et éventuellement huile de Colza (avec une intensité beaucoup plus faible). La lumière émise est observée à des tensions <<TADP, et est fortement activée quand la cellule a été exposée à la lumière. La lumière est essentiellement émise pendant les dV/dt <0, et peut totalement masquer la lumière émise par les DP. Elle est fortement réduite après une nuit dans l'obscurité.

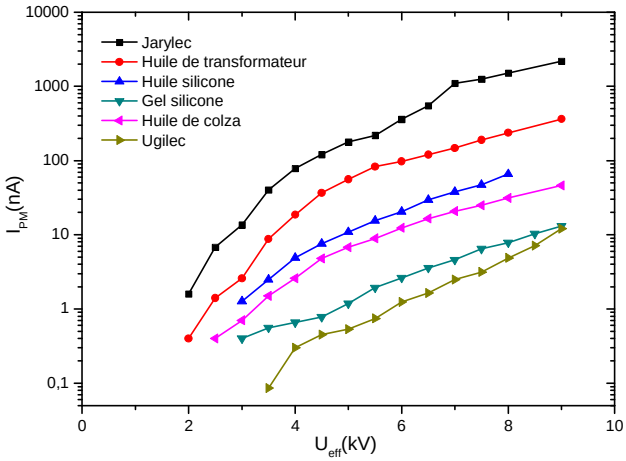
- **Les décharges partielles dans le matériau d'enrobage** (DP_{liq}). Avec les substrats céramiques celles-ci ne sont pas clairement mises en évidence, sauf peut-être aux tensions élevées (environ 2xTADP) où des dégradations irréversibles apparaissent. Sur un substrat époxy, qui ne présente pas de DP internes et d'électroluminescence mesurable, la lumière vient des DP dans le milieu extérieur, avec des caractéristiques comparable avec la géométrie pointe-plan : dissymétrie importante dans les deux polarités, instabilité, courant moyen de PM très faible.

La comparaison de l'intensité lumineuse émise par le même substrat d'AlN enrobé par différents liquides et un gel silicone, avant et après mise dans l'obscurité, est montrée sur la Figure III - 29.

Pour le Jarylec® et l'huile de transformateur, la lumière mesurée initialement est beaucoup plus élevée, en raison de l'électroluminescence de ces liquides. Après mise dans l'obscurité, la lumière émise par le liquide diminue fortement, et la lumière mesurée devient comparable à celle mesurée avec un liquide non électroluminescent.

Pour les liquides non (ou très faiblement) électroluminescents (huile silicone, gel silicone, huile de Colza, Ugilec), l'interprétation des mesures n'est pas évidente. Dans ce cas, la lumière mesurée devrait provenir uniquement du substrat ($EL_{AlN} + DP_{sol}$) étant donné que la lumière émise par le liquide devrait être négligeable ($EL_{liq} \approx DP_{liq} \approx 0$), et par conséquent le liquide ne devrait pas avoir d'influence sur l'émission de lumière. Pourtant, des différences d'intensité moyenne importantes sont observées entre ces liquides (Figure III - 29), et l'enregistrement de l'intensité instantanée montre également des différences importantes. L'émission de lumière pendant le dV/dt négatif (attribuable à l'électroluminescence de l'AlN), est très intense avec l'huile silicone (Figure III - 16), plus faible avec l'huile de colza (Figure III - 19), et devient inobservable avec l'Ugilec (Figure III - 21). Dans ce dernier cas l'émission de lumière devient symétrique, qualitativement corrélée aux décharges partielles.

(a)



(b)

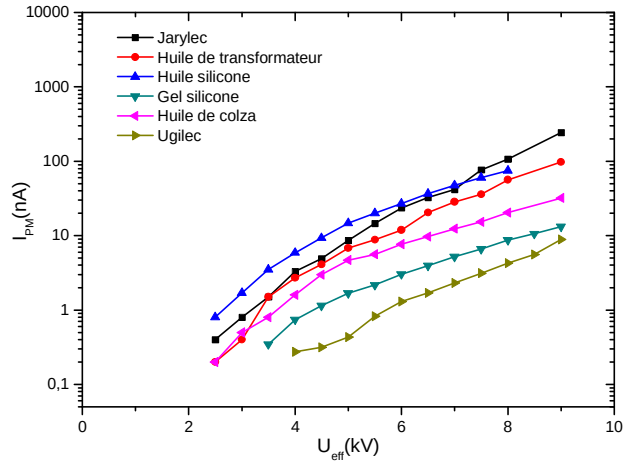


Figure III - 29 : Evolution de photo-courant en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN8 dans différents liquides et gel silicone. a : les mesures après le dégazage et b : mesure 16h après le dégazage

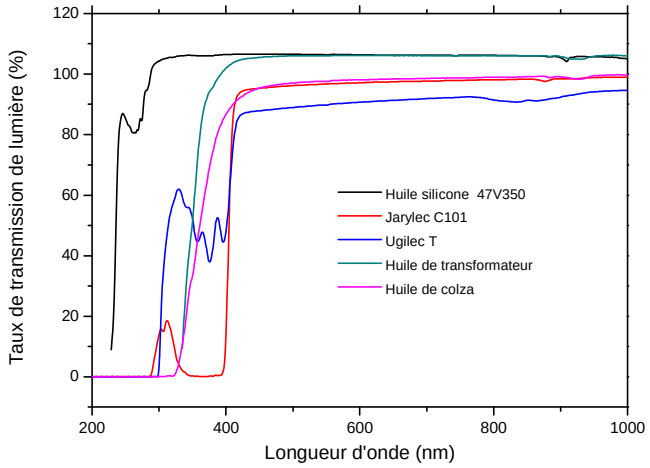


Figure III - 30 : Taux de transmission de lumière des différents liquides en fonction de la longueur d'onde (épaisseur : 1mm)

Une explication à ce phénomène peut être trouvée en considérant les propriétés optiques différentes des liquides utilisés. La lumière mesurée est transmise à travers la couche de liquide (épaisseur environ 1cm) située au dessus du substrat. La mesure de la transmission optique des liquides (avec un spectrophotomètre UV – Visible) est montrée sur la Figure III - 30 . Des différences importantes de transmission existent entre les liquides dans l'UV (gamme 200 – 400 nm). L'huile silicone présente la meilleure transmission dans cette gamme. Notre système optique (PM + lentille) possède une limite de détection à environ 350 nm, et pour cette longueur d'onde la transmission des liquides suit l'ordre : Huile silicone > Huile Colza > Ugilec. Etant donné que l'électroluminescence de l'AlN a été généralement observée dans le domaine de l'UV, ce classement est cohérent avec les observations réalisées précédemment : transmission élevée avec l'huile silicone, atténuation moyenne avec l'huile de Colza et quasiment totale avec l'Ugilec.

Pour pouvoir vérifier cette hypothèse, il faudrait bien sûr pouvoir réaliser des mesures de spectrométrie lumineuse, ce qui n'a pas été possible dans ce travail en particulier à cause de la faible intensité lumineuse émise. La spectrométrie pourrait également permettre d'obtenir des informations très intéressantes sur les mécanismes d'émission de lumière. Un autre paramètre important n'a pas été systématiquement contrôlé précisément dans ces expériences : l'épaisseur du liquide recouvrant le substrat, qui peut également influencer les mesures.

Finalement, il apparait que la lumière mesurée peut être corrélée à l'activité des décharges partielles uniquement dans quelques cas particuliers :

- substrat AlN + Ugilec (électroluminescence de l'AlN absorbée par l'Ugilec, Figure III - 21) ;
- substrat Al_2O_3 + liquide non électroluminescent (par exemple huile silicone, voir Figure II - 57) ;
- substrat époxy + liquide non électroluminescent (par exemple huile silicone, voir Figure II - 66)

III.9. Utilisation de la lumière émise pour évaluer l'activité des DP sous onde non sinusoïdale (influence du temps de montée)

Etant donné ce qui précède, nous avons vu que la lumière émise peut avoir une origine très complexe, et qu'elle ne peut être utilisée comme moyen de diagnostic des DP que dans quelques cas limités. Dans le cas pratique étudié par Do [6] (substrat AlN + gel silicone), si le gel a les mêmes propriétés optiques que l'huile silicone, les mesures réalisées avec différentes formes d'ondes (alternatif à fréquence variable, impulsions à front de montée variable, composante continue, etc.) ne

peuvent pas être directement reliées à l'activité des DP, mais plutôt aux propriétés d'électroluminescence du substrat.

Bien que cette étude n'ait pas été réalisée de manière systématique, certaines mesures réalisées dans cette étude avec des ondes non sinusoïdales dans des cas favorables donnent des indications sur l'activité des DP sous tension impulsionelle, plus proche des conditions réelles de fonctionnement des modules IGBT.

Dans le cas du substrat Al_2O_3 + huile silicone (Figure II - 58 et Figure II - 59), on voit que la lumière émise est environ 4 fois plus élevée sous tension carrée comparée à l'alternatif, mais que le temps de montée (de 1ms à 7µs) n'a pratiquement pas d'influence. D'après ce qui précède, la lumière devrait dans ce cas essentiellement provenir des DP internes au substrat céramique. La forme des signaux de lumière (Figure II - 58) indique que ces DP ne se produisent pas uniquement pendant les dV/dt, mais également pendant les paliers de tension, ce qui est cohérent avec les mesures sous tension alternative sinusoidale.

Dans le cas du substrat époxy + huile silicone (Figure II - 67), on voit que la lumière est considérablement plus élevée (environ un facteur 100) dans le cas d'une onde à front raide (temps de montée 0,3µs) comparé à l'alternatif sinusoïdal. Dans ce cas, la lumière émise devrait provenir des DP dans le matériau d'encapsulation (huile silicone). Les tensions de seuils de détection de lumière diminuent fortement (d'environ 20 à 10 kV), et le temps de montée a une importance élevée (la lumière diminue d'une décade quand le temps de montée augmente de 0,3µs à 285 µs). Ces observations sont cohérentes avec des mesures comparables réalisées en géométrie pointe-plan [83], et dans une géométrie de bord d'armature de condensateur [88]. Dans les liquides, le champ réellement présent sous tension alternative est fortement atténué par l'injection de charges d'espace, et cet effet favorable disparait quand on utilise des ondes à front raide.

Etant donné que l'apparition de DP dans l'encapsulant (et en particulier dans le cas d'un gel) produit des dégradations irréversibles, on peut conclure que la présence d'impulsions à front raides devrait avoir un effet nettement défavorable sur la fiabilité de l'isolation. Il serait bien sûr nécessaire de confirmer cette conclusion par des mesures complémentaires.

CHAPITRE IV : SPECTROSCOPIE DIELECTRIQUE HAUTE TENSION

I. Introduction

Nous avons vu dans les parties précédentes que la détection des décharges partielles utilisant une méthode électrique classique (détection d'impulsions de courant) est limitée par le bruit de fond des dispositifs de mesure. Dans notre cas, avec une alimentation haute tension à faible bruit et un blindage efficace, le bruit de fond du système de mesure ICM permet de détecter des décharges supérieures à 0.2pC. Si des décharges partielles inférieures à cette valeur existent, elles ne sont pas enregistrées. De la même manière, le système de détection optique (PM) possède un bruit de fond qui varie entre 0.7nA et 2nA, et qui limite la sensibilité de détection optique.

Avec l'AlN et l'huile silicone, la détection optique donne une tension d'apparition de lumière nettement plus faible que la TADP, mais nous avons vu que dans ce cas une partie importante de la lumière provient de l'électroluminescence du matériau qui s'ajoute à la lumière des DP. Les courbes du photo-courant ne montrent aucune discontinuité autour de la valeur de TADP. Il est possible que des DP d'amplitudes plus petites que 0,2pC existent à des tensions inférieures à TADP, mais les mesures réalisées avec l'huile silicone ne permettent pas de conclure sur ce point. Avec un autre liquide comme l'Ugilec, l'électroluminescence de l'AlN n'est plus observée (Figure III - 21), le signal lumineux présente une meilleure corrélation avec les DP, et de la lumière est également observée à une tension (4kV) inférieure à TADP (5 kV, Figure III - 20). Ceci suggère donc l'existence de DP de très petites amplitudes, à des tensions inférieures à TADP.

Avec l'Al_2O_3 et l'huile silicone, de la lumière est également détectée à une tension (2,5 kV) un peu inférieure à TADP (3,5kV, voir Figure II - 54). L'Al_2O_3 ne présente pas d'électroluminescence, et le signal optique présente une corrélation qualitative avec les mesures de DP (Figure II - 57 : signal symétrique, sensiblement en phase avec la tension). Ceci indique donc également l'existence de DP à des tensions un peu inférieures à TADP. Cependant, dans ces deux cas (AlN + Ugilec ou Al_2O_3 + huile silicone), les mesures optiques sont rapidement limitées par le bruit de fond du PM à basse tension.

L'objectif de cette partie est d'évaluer si des mesures par spectrométrie diélectrique sous haute tension (mesures de la permittivité et des pertes diélectriques en fonction de la fréquence et de la tension) peuvent apporter des informations complémentaires. Le principe du système de mesure de

spectroscopie diélectrique est d'intégrer avec une très grande sensibilité toutes les composantes du courant qui passent dans le matériau soumis à une tension alternative : courant dû à la conduction, à la polarisation, et éventuellement aux décharges partielles si elles existent. Le phénomène de décharges partielles étant fortement non linéaire, une étude en fonction de la tension pourrait permettre sa mise en évidence.

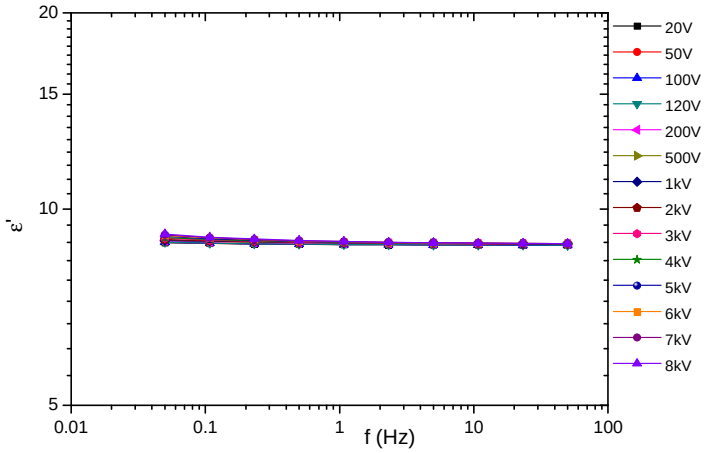
Ces mesures sont rendues possibles par l'utilisation du système Programma (spectrométrie diélectrique jusqu'à 30kV). Les mesures ont été réalisées à température ambiante (environ 20°C), dans la plage de fréquence de 0.05Hz à 50Hz, avec deux modules de mesure complémentaires: module basse tension (jusqu'à 200V), et module haute tension (jusqu'à environ 8 kV pour ne pas détériorer l'échantillon). Les mesures ont été réalisées sur divers substrats d'AlN, d'Al_2O_3 et d'époxy avec l'huile silicone. La cellule de mesure et les dispositifs expérimentaux sont présentés dans la partie de techniques expérimentales du chapitre I.

II. Résultats de mesure

Les résultats de mesure de spectroscopie sur différents matériaux sont présentés de la Figure IV - 1 à la Figure IV - 6. Dans toutes les mesures, la composante réelle de la permittivité $\boldsymbol{\varepsilon'}$ (Figure IV - 1-a, Figure IV - 3-a et Figure IV - 5-a) reste constante sur toute la plage de fréquence et de tension ($\boldsymbol{\varepsilon'}$ = 8.8 pour AlN, 9.0 pour Al_2O_3 et 4.8 pour l'époxy).

Les courbes du facteur de perte $\boldsymbol{tan\delta}$ sont présentées sur les Figure IV - 1-b, Figure IV - 3-b et Figure IV - 5-b. Les Figure IV - 2, Figure IV - 4 et Figure IV - 6 présentent l'évolution du facteur de perte $\boldsymbol{tan\delta}$ en fonction de la tension appliquée, pour différentes fréquences.

(a)



(b)

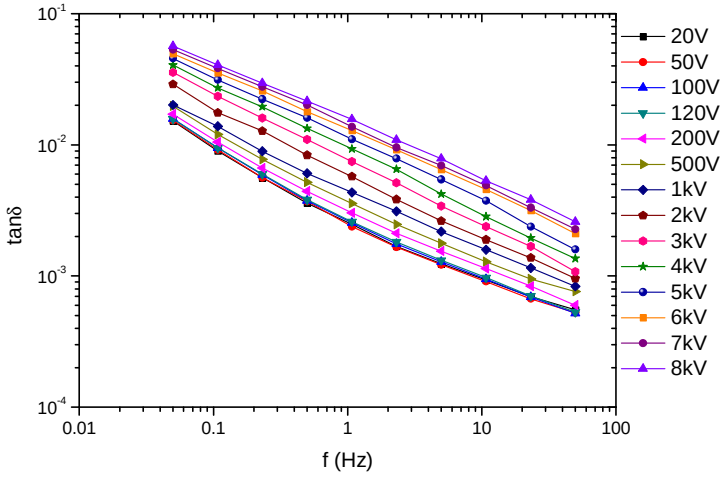


Figure IV - 1 : Propriétés diélectriques du substrat d'AlN (Echantillon AlN8 dans l'huile silicone) : a : permittivité et b : facteur de perte

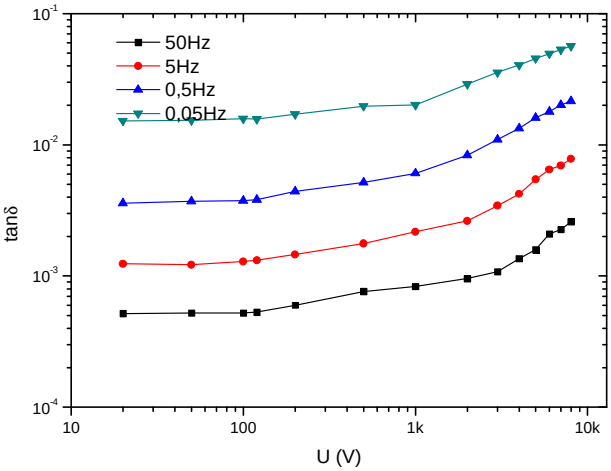


Figure IV - 2 : Evolution du facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat AlN (échantillon AlN8 dans l'huile silicone)

(a)

(b)

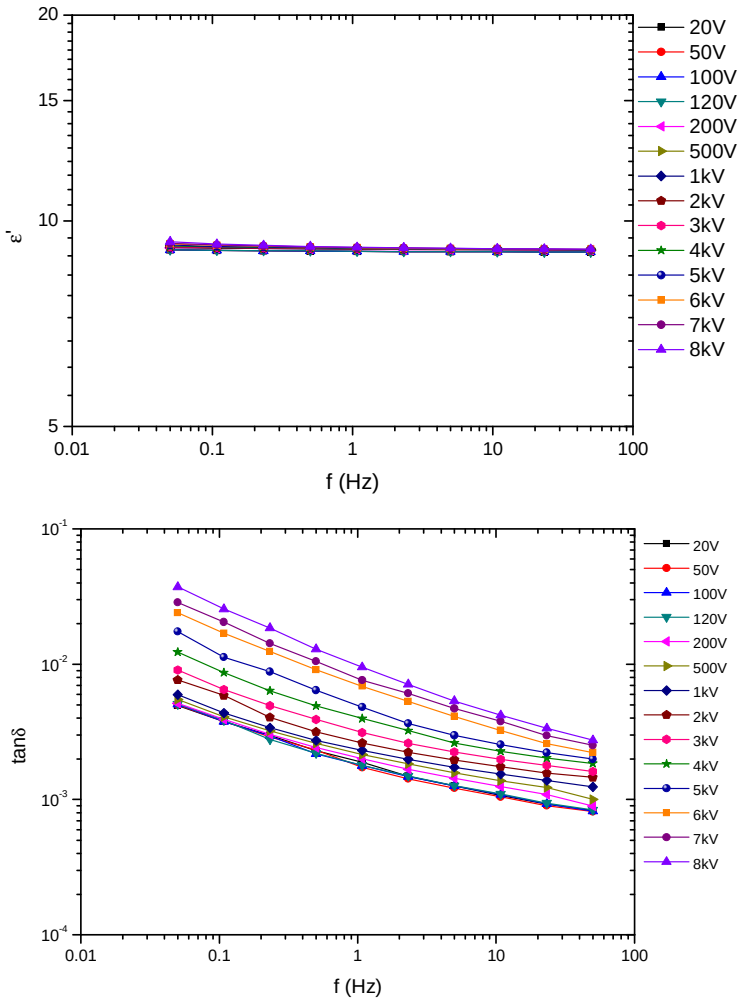


Figure IV - 3 : Propriétés diélectriques du substrat d'Al_2O_3 (Echantillon Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone) : a : permittivité et b : facteur de perte

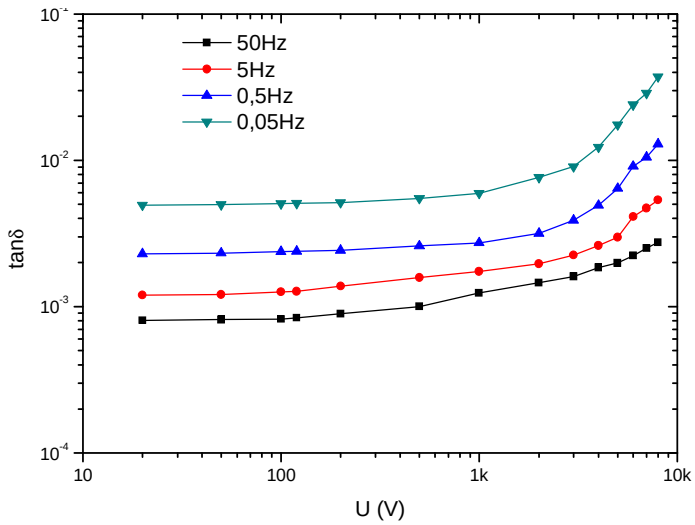
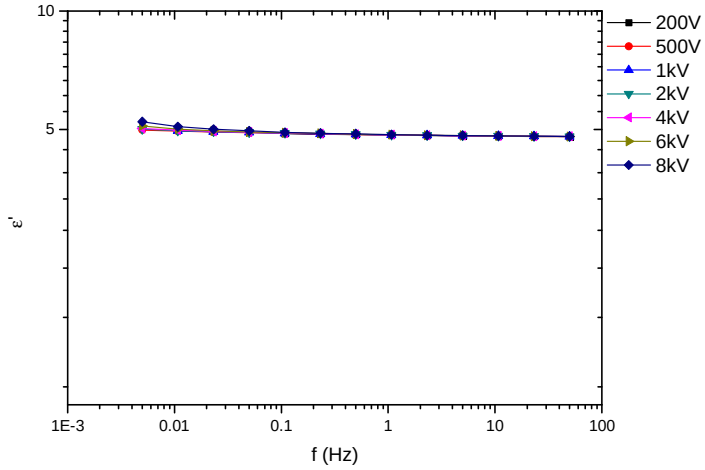


Figure IV - 4 : Evolution de facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat d'AL_2O_3 (Echantillon Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone)

(a)



(b)

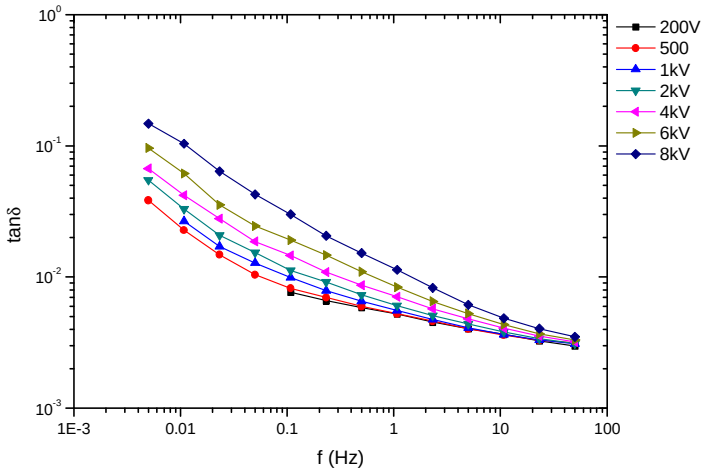


Figure IV - 5 : Propriétés diélectriques du substrat verre/époxy dans l'huile silicone : a : permittivité et b : facteur de perte

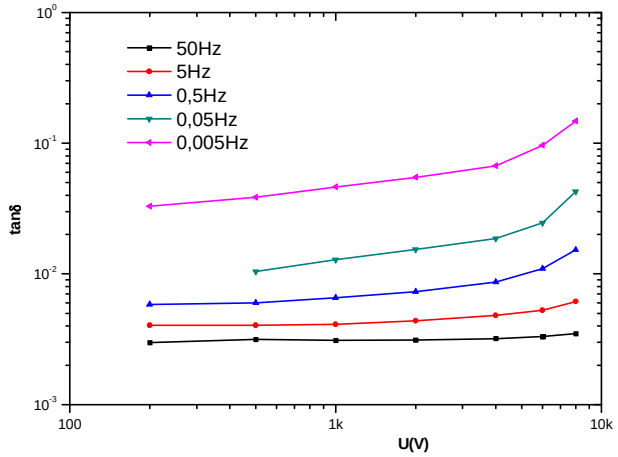


Figure IV - 6 : Evolution de facteur de perte en fonction de la tension appliquée sur le substrat d'époxy dans l'huile silicone

III. Discussion

III.1. Origine des pertes non-linéaires

A basse tension, (20 et 50 V), la valeur du facteur de pertes ***tanδ*** dans tous les matériaux augmente quand la fréquence diminue. La pente des courbes est largement supérieure à -1, ce qui permet de conclure que les pertes ne sont pas dues simplement à un mécanisme de conduction, comme c'est généralement le cas dans les matériaux solides isolants. Les pertes mesurées à 50Hz à basse tension dans l'époxy ($3\ 10^{-3}$) sont sensiblement supérieures à celles mesurées dans l'AlN et l'Al_2O_3 (respectivement $5\ 10^{-4}$ et $8\ 10^{-4}$), ce qui est cohérent avec les valeurs connues pour ces matériaux.

Lorsque la tension augmente, nous observons un comportement différent entre les substrats céramiques et l'époxy. Sur les substrats d'AlN et d'Al_2O_3 l'augmentation de la tension provoque une forte augmentation des pertes (presque une décade) pour toutes les fréquences. Cette augmentation est observée à partir de tensions supérieures à environ 100 V (Figure IV - 2 et Figure IV - 4). A plus basse tension, le facteur de perte est indépendant de la tension. Sous tension plus élevée (8 kV), les courbes de pertes deviennent pratiquement identiques pour deux matériaux.

Pour l'époxy, les valeurs de pertes sous haute tension (8kV) sont également comparables à celles mesurées avec les autres matériaux. Une forte augmentation des pertes avec la tension est observée à basse fréquence, mais contrairement aux céramiques, à plus haute fréquence l'augmentation est beaucoup plus faible, et devient quasiment nulle à 50 Hz. Ceci est probablement lié au fait qu'à 50Hz les pertes initialement mesurées à basse tension dans l'époxy ($3\ 10^{-3}$) sont nettement plus élevées que dans les céramiques ($5\ 10^{-4}$ dans l'AlN). Elles sont pratiquement égales à celles mesurées sous haute tension dans les céramiques ($2{,}5\ 10^{-3}$).

La forte augmentation des pertes en fonction de la tension, observée pour toutes les fréquences dans les céramiques, n'est pas cohérente avec un mécanisme de décharge partielle. En effet, dans le cas de décharges partielles qui ont lieu dans des cavités, lorsque la fréquence de la tension change, l'hypothèse la plus simple considère que le nombre de DP qui se produit par alternance reste constant. Cela peut s'expliquer simplement en considérant un schéma simple d'allumage des DP sous tension alternative, comme celui présenté dans le chapitre I au paragraphe III.3.1. Dans ce cas, le courant moyen de DP (égal à la somme des charges par alternance divisé par la durée de l'alternance) est proportionnel à la fréquence *f*:

$$I_{DP} = \alpha.f \qquad \text{(Equ. IV - 1)}$$

Dans notre cas des décharges dans les matériaux céramiques, cette relation est effectivement vérifiée. Les mesures réalisées par M.T. Do [6] avec un substrat d'AlN montrent en effet que la lumière émise est pratiquement proportionnelle à la fréquence de la tension appliquée (Figure IV - 1).

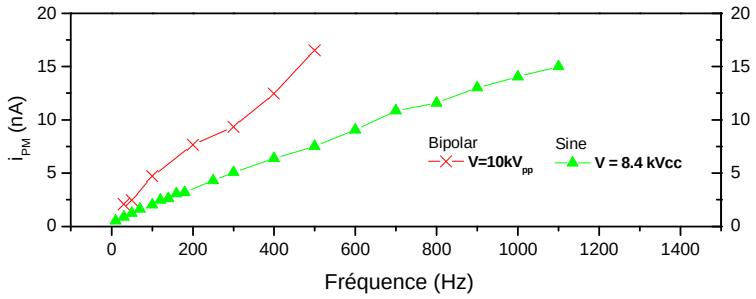


Figure IV - 7 : Variation fréquentielle du photocourant en alternatif (A) et impulsionnel bipolaire (D) [6]

Les pertes totales de l'échantillon à une fréquence fixe en présence de décharges partielles peuvent être représentées par le schéma équivalent de la Figure IV - 8, dans laquelle :

- C_e : représente la capacité de l'échantillon.
- R_C : est une résistance équivalente qui représente les pertes (supposées linéaires) dues à la conduction et à la polarisation ;
- R_{DP} : est une résistance qui représente les pertes non linaires qui correspondent aux décharges partielles (R_{DP} dépend de la tension).

Si on fait l'hypothèse d'un courant de DP proportionnel à la fréquence (équation IV -1), cela signifie que, à tension constante, la résistance R_{DP} est inversement proportionnelle à la fréquence f :

$$R_{DP} = \frac{U}{\alpha . f} \qquad \textbf{(Equ. IV - 2)}$$

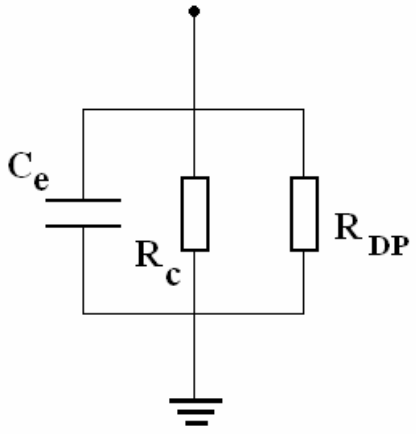


Figure IV - 8 : Schéma équivalent d'un substrat céramique

Le facteur de perte du système est calculé par la formule :

$$\tan\delta = \frac{1}{R_{total}.C.\omega} = \frac{1}{2.\pi.f.R_{total}.C} = \frac{1}{2.\pi.f.R_c.C} + \frac{1}{2.\pi.f.R_{DP}.C} \qquad \textbf{(Equ. IV - 3)}$$

Les pertes totales sont donc la somme des pertes de base du matériau (dues à la conduction et à la polarisation) et des pertes dues aux DP. Avec l'hypothèse d'une résistance équivalente aux DP qui varie en 1/f (Equ. IV - 2), on voit que le terme correspondant aux DP est indépendant de la fréquence :

$$\frac{1}{2.\pi.f.R_{DP}.C} = \frac{\alpha}{2.\pi.U.C} \qquad \textbf{(Equ. IV - 4)}$$

L'existence de DP doit donc produire une augmentation des pertes constantes pour toutes les fréquences, ce qui n'est pas du tout observé sur les Figure IV - 1-b, Figure IV - 3-b et Figure IV - 5-b. En effet, l'augmentation des pertes mesurées à basse fréquence est beaucoup plus élevée qu'à haute fréquence (par exemple pour l'échantillon d'AlN : + 4,5 10^{-2} à 0,05 Hz, comparé à +3 10^{-3} à 50 Hz). Il est donc très probable que les pertes non linéaires mesurées sur les différents échantillons sont dues à un autre mécanisme que l'apparition de DP.

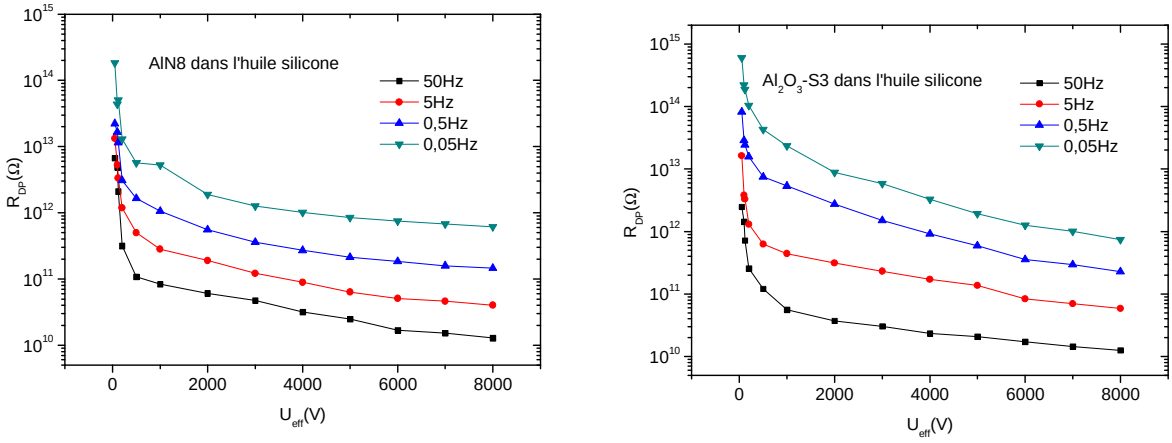
Une cause très probable de forte non linéarité peut provenir de l'existence d'un courant d'injection dans le liquide sur les bords de métallisation, en raison du champ électrique très élevé qui existe à cet endroit. Par exemple en géométrie pointe-plan dans les liquides, l'injection de charges à la pointe produit un courant fortement non linéaire, limité par la charge d'espace, qui varie en U^2 [76].

III.2. Courant non-linéaire dans l'échantillon

A partir de l'équation IV – 3 et des mesures des pertes réalisées, il est possible de calculer la valeur de résistance non linéaire R_{DP}. Pour effectuer ce calcul, nous considérons que R_{DP} est nulle pour des tensions inférieures à 100 V (le matériau étant linéaire en dessous de cette tension, voir Figure IV - 2, Figure IV - 4 et Figure IV - 6), ce qui permet de calculer la valeur R_c pour différentes fréquences à partir des mesures à 20V. Les calculs de résistance $\boldsymbol{R_{DP}}$ en fonction de la tension appliquée sur le substrat d'AlN (échantillon AlN8 dans l'huile silicone) est montré sur la Figure IV - 9 – a, et pour le substrat d'alumine (échantillon Al_2O_3 – S3) sur la Figure IV - 9 - b. A faible tension, la valeur de cette résistance est logiquement très élevée, ensuite elle diminue avec l'augmentation de la tension appliquée. Entre 100V et 8kV_{eff}, la résistance $\boldsymbol{R_{DP}}$ diminue de trois décades pour l'AlN et environ deux décades et demie pour l'Al_2O_3.

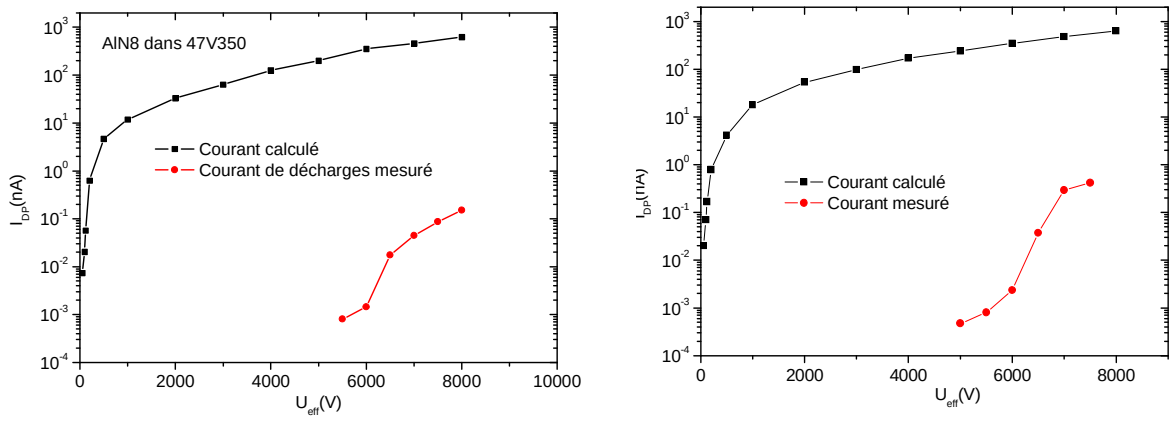
A partir du calcul de cette résistance $\boldsymbol{R_{DP}}$, il est possible de calculer la composante du courant non linéaire passant dans l'échantillon de test à différentes fréquences et tensions (Figure IV - 10). Sur cette figure, cette valeur calculée est comparée aux valeurs du courant moyen de DP (I_{DP}) mesurés sur les mêmes échantillons. Le courant non linéaire calculé qui correspond aux mesures de pertes est considérablement plus élevé (de plus d'un facteur 1000) que le courant de décharges partielles mesuré. De plus, sa variation avec la tension est très différente. La conclusion est donc claire : les pertes engendrées par les DP sont beaucoup plus faibles que celles dues aux processus de conduction et de polarisation, et par conséquent ne peuvent pas être détectées par mesures de spectrométrie

diélectrique. En particulier, il n'est pas possible d'obtenir de conclusions sur l'existence éventuelle de DP de très petites amplitudes à des tensions inférieures à TADP. La seule preuve de leur existence à des tensions légèrement inférieures à TADP est fournie par les mesures optiques.



(a) (b)

Figure IV - 9 : Variation de la résistance non linéaire R_{DP} calculée en fonction de la tension :a : sur l'AlN et b : sur l'Al_2O_3



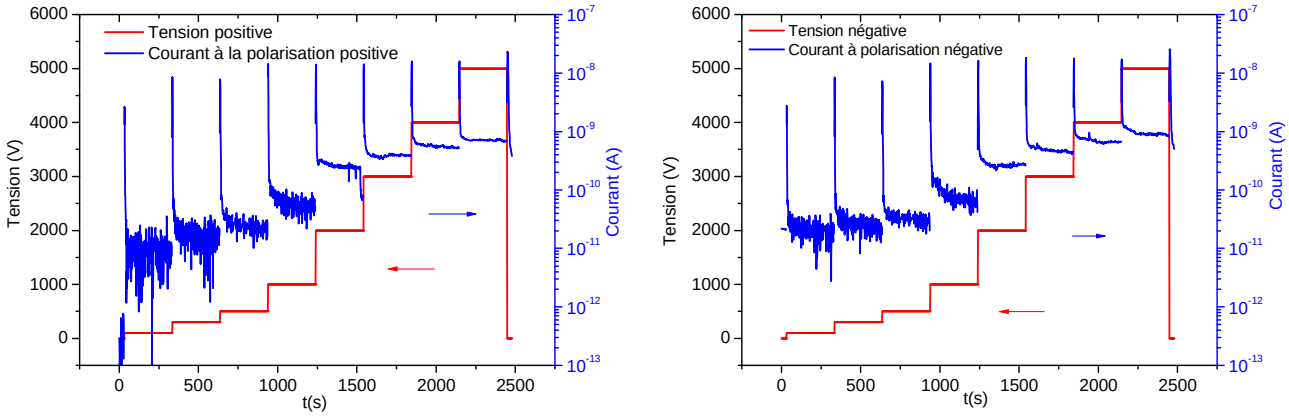
(a) (b)

Figure IV - 10 : Evolution du courant non linéaire calculé à 50 Hz. Comparaison avec les courants I_{DP} mesurés dans les mêmes conditions. a : AlN et b : Al_2O_3

III.3. Mesures du courant de fuite

Afin de confirmer les résultats précédents, nous avons réalisé un enregistrement du courant de fuite d'un échantillon d'Al_2O_3, en appliquant des paliers de tension continue de durée 5mn, avec une tension croissante de 0 à 5kV (Figure IV - 11). Sur ces enregistrements, on voit que la valeur du courant se stabilise rapidement à une valeur stable dans les deux polarités. La mesure de cette valeur stabilisée en fonction de la tension est présentée sur la Figure IV - 12, et elle comparée à la valeur du

courant calculée à partir des mesures de pertes, pour la plus faible fréquence utilisée (0,05 Hz). Bien que ces deux valeurs de courant ne soit pas mesurées dans les mêmes conditions (tension continue et alternative très basse fréquence), on voit que l'ordre de grandeur du courant est comparable, ce qui conduit à la conclusion que c'est bien l'existence d'un courant de conduction non linéaire (et non pas de décharges partielles) qui produit l'augmentation des pertes. Etant donné que les pertes mesurées sous haute tension sont pratiquement identiques avec les trois matériaux solides de natures très différentes, il est très probable que ces pertes soient dues au liquide (injection de charge) et non pas au solide lui-même.



(a) (b)

Figure IV - 11 : Evolution temporelle du courant sur le substrat Al_2O_3 – S3 dans l'huile silicone 47V350. a : polarisation positive et b : polarisation négative

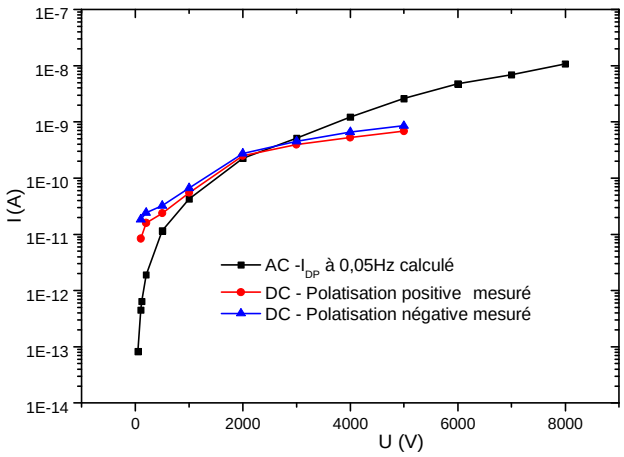


Figure IV - 12 : Comparaison du courant de fuite et du courant calculé sur le substrat Al2O3 – S3 dans l'huile silicone 45V350.

IV. Conclusion

Les résultats de mesures spectroscopie haute tension nous permettent de tirer les conclusions suivantes. Les échantillons testés montrent l'existence de pertes fortement non linéaires sous haute tension. L'évolution de ces pertes non linéaires avec la fréquence, ainsi que leurs amplitudes ne sont pas compatibles avec un mécanisme de décharges partielles. En effet, il existe une grande différence entre le courant non-linéaire calculé à partir des mesures de pertes, et le courant moyen de DP mesuré sur les mêmes échantillons. L'hypothèse la plus probable est que les pertes non linéaires mesurées sont essentiellement dues à un mécanisme d'injection de charge dans le liquide, en raison de l'existence d'un champ local très élevé au bord de la métallisation.

En conclusion, ces mesures montrent que la spectrométrie diélectrique sous haute tension n'apporte pas d'informations complémentaires par rapport au phénomène de décharges partielles sur les substrats enrobés. Ces mesures suggèrent l'existence d'un mécanisme d'injection de charge dans le liquide au bord de la métallisation. La présence de ces charges injectées (homocharges) devrait conduire à une diminution du champ réellement présent dans le liquide à cet endroit (comme c'est le cas en géométrie pointe-plan), et qui devrait également conduire à un renforcement du champ dans le solide. Ceci peut également contribuer au fait que les DP mesurées sont localisées essentiellement dans le volume de la céramique, et non pas dans le liquide.

CONCLUSION GENERALE

Ce travail constitue une suite à l'étude de M.T. Do, qui avait étudié les décharges partielles sur des substrats d'AlN enrobés de gel silicone. Les objectifs de ce travail sont de mieux comprendre l'origine physique des décharges partielles et de la lumière émise par les substrats. Dans ce but, nous avons réalisé une étude expérimentale en faisant largement varier les matériaux utilisés (substrats et encapsulants), et en développant les techniques de mesures (évolution temporelle de la lumière émise).

Dans une première partie, nous avons étudié l'influence de la nature du substrat. Le gel a été remplacé par une huile silicone, ce qui a permis de réaliser des expériences dans des conditions plus stables et reproductibles. Cette étude a permis de mettre en évidence un certain nombre d'observations nouvelles :

- ✓ L'existence de « bons » substrats, dont le comportement se situe autour d'une valeur moyenne, et de « mauvais » substrats dont certaines caractéristiques (TADP, amplitude des DP, courant moyen de DP) sont largement moins favorables ;
- ✓ Le rôle du conditionnement du substrat et de l'huile. Un procédé « d'imprégnation » à haute température (150°C) avec une huile silicone de faible viscosité permet de diminuer sensiblement le nombre de décharges partielles. Cela a suggéré que de nombreuses décharges peuvent avoir lieu dans des pores proches de la surface extérieure ;
- ✓ L'existence, comme dans le gel silicone, de deux types de DP : réversibles à basse tension (dans la gamme TADP - 2xTADP), et irréversibles à plus haute tension. La comparaison des DP entre le gel et une huile silicone ne montre aucune différence dans la gamme (TADP - 2xTADP), ce qui suggère que ces DP n'ont pas lieu dans le matériau d'encapsulation ;
- ✓ Le rôle fondamental de la nature du matériau du substrat. Les matériaux céramiques frittés (AlN et Al_2O_3) donnent des DP stables souvent symétriques dans les deux polarités, et aucune dégradation n'apparaît dans la gamme de tension (TADP - 2xTADP). Le composite verre/époxy montre des DP instables, asymétriques dans les deux polarités, et conduisant rapidement à la dégradation du substrat. Ces résultats aboutissent également à la conclusion que dans le cas des céramiques, les DP apparaissent en premier lieu dans les pores du matériau, et non pas dans le matériau d'encapsulation ;

- ✓ L'influence très grande de l'électroluminescence du substrat sur la lumière émise, dans le cas de l'AlN. Dans ce cas, la lumière émise ne constitue pas un bon indicateur de l'activité des DP. Dans le cas de l'Al_2O_3 et du verre/époxy, il existe une corrélation qualitative entre la lumière et les DP.

La variation des matériaux d'encapsulation (huile silicone, huile de colza, Ugilec, gel silicone, huile minérale de transformateur et Jarylec), étudiée dans la deuxième partie a permis de mettre en évidence les résultats suivants :

- ✓ La grande variété du comportement des liquides, observé en géométrie pointe-plan. Dans les mêmes conditions, les différents liquides sont caractérisés par des TADP et des amplitudes de DP différentes. Les DP mesurées sont toujours dissymétriques dans les deux polarités.

- ✓ Le fait que les DP sur les substrats céramiques sont totalement insensibles à la nature de l'encapsulant. Les TADP et la répartition des DP mesurés sur un substrat d'AlN dans le gel et les différents liquides ne sont pas corrélées aux mesures réalisées dans ces liquides en configuration pointe-plan. Il n'y a pas non plus, de corrélation entre la TADP et la valeur de la constante diélectrique du liquide utilisé. Ceci permet donc de conclure que les DP mesurées proviennent du substrat dans le cas des céramiques.

L'étude de l'émission de lumière avec les différents matériaux d'encapsulation a permis de mettre en évidence un comportement très complexe et influencé par de nombreux paramètres :

- ✓ Les liquides testés peuvent être divisés en deux groupes de caractères différents. Le premier groupe est composé des liquides électroluminescents : le Jarylec et l'huile minérale de transformateur. Dans ces liquides, de la lumière est émise à une tension très inférieure à TADP. Nous avons observé un phénomène nouveau, jamais observé auparavant, le fait que l'électroluminescence du liquide est fortement activée quand celui-ci est d'abord soumis à de la lumière.

- ✓ Bien que les DP sur les substrats ne soit pas sensibles à la nature du liquide ou du gel, l'intensité lumineuse mesurée varie beaucoup suivant ces matériaux. Il semble que ceci soit dû à la différence d'absorption lumineuse entre les liquides. Certains liquides atténuent fortement la lumière UV due à l'électroluminescence de l'AlN. Dans ce cas particulier uniquement, et si le liquide n'est pas lui-même électroluminescent, la lumière mesurée avec l'AlN peut présenter une corrélation qualitative avec l'activité des DP.

- ✓ Dans le cas des substrats non électroluminescents (Al_2O_3 et époxy), l'émission lumineuse est corrélée aux DP dans le cas des liquides non-électroluminescents.

- ✓ Dans les cas où la lumière présente une corrélation avec les DP, le seuil d'apparition de lumière est sensiblement plus faible que la TADP mesurée. Ceci permet de conclure qu'il existe également dans les substrats céramiques des DP de très petites amplitudes (< 0,2pC), à des tensions inférieures à TADP, non détectées par mesure électrique.

- ✓ Des mesures de pertes diélectriques sous haute tension ne permettent pas d'obtenir d'informations supplémentaires sur les DP. La contribution des DP aux pertes diélectriques est très inférieure à celles des mécanismes de conduction et de polarisation.

PERSPECTIVES

Dans cette étude, de nombreux domaines scientifiques différents ont été abordés, et dans chaque domaine, un grand nombre de perspectives existent pour développer ces travaux.

En ce qui concerne les applications aux semi-conducteurs de puissance, le résultat essentiel obtenu montre que les DP mesurées (par exemple lors de tests normalisés) ont lieu dans le volume des substrats céramiques, et non pas dans le matériau d'encapsulation. Ces décharges montrent une grande stabilité, et aucune dégradation n'a pu être mesurée dans ce travail. Il serait donc nécessaire de réaliser des études de vieillissement pour déterminer l'influence réelle de ces décharges sur la durée de vie des modules de puissance. Il pourrait être également intéressant de déterminer si le seuil de dégradation irréversible (à environ 2xTADP) est influencé par la nature du matériau d'encapsulation. Ce point, qui nécessiterait de tester un grand nombre de substrats, n'a pas été abordé dans notre étude.

En ce qui concerne les mécanismes fondamentaux de DP et d'émission de lumière, les mesures réalisées soulèvent un grand nombre de questions qui pourraient également être développées. Par exemple, l'électroluminescence des liquides est un domaine très mal connu. La mise en évidence dans ce travail de l'activation par la lumière, jamais observée auparavant, pourrait être étudiée quantitativement. Des mesures en spectroscopie d'émission pourraient permettre de mieux comprendre l'origine de la lumière émise par les substrats (électroluminescence et DP). L'existence de DP dans les pores des céramiques est également un domaine très peu étudié, qui pourrait apporter une meilleure connaissance des mécanismes de claquage dans ces matériaux.

ANNEXES

ANNEXE 1 : EMISSION DE LUMIERE DANS L'HUILE SILICONE ET LE JARYLEC EN CONFIGURATION DE LAME-PLAN

Cette annexe contient des mesures complémentaires de la partie I.6 duchapitre III. Les essais sont réalisés en configuration lame-plan. L'objectif est de caractériser le liquide seul en utilisant une géométrie proche de celle du bord de la métallisation d'un substrat. Deux liquides sont utilisés dans ces mesures : l'huile silicone Rhodorsil 47V350 et le Jarylec.

La cellule et le protocole de mesure sont ceux utilisés pour les mesures en configuration pointe-plan (présenté dans la partie I du chapitre III). La pointe a été remplacée par une lame de rasoir (distance inter-électrode : 5mm).

1. Emission de lumière dans l'huile silicone

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une instabilité sur les mesures et une mauvaise reproductibilité des phénomènes de décharges partielles dans la gamme de tension 0-18kV_{eff}. La Figure A - 1 montre une distribution de décharges enregistrée à 17kV_{eff}. Elle est très différente de celles obtenues en configuration pointe-plan ou sur les substrats.

Pour les tensions appliquées inférieures à la TADP, aucune émission de lumière n'a été détectée. Par contre, à partir de la TADP, des impulsions de lumière de grandes amplitudes sont détectées ; leurs positions dans la phase sont corrélées aux décharges électriques mesurées. (Figure A - 2).

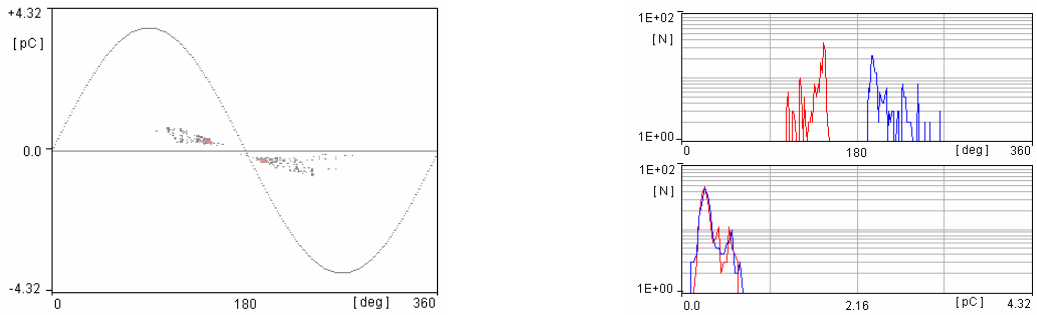


Figure A - 1 : Distribution des charges en configuration lame – plan dans l'huile silicone à 17kV_{eff} (Lame L1, distance inter – électrode : 5mm)

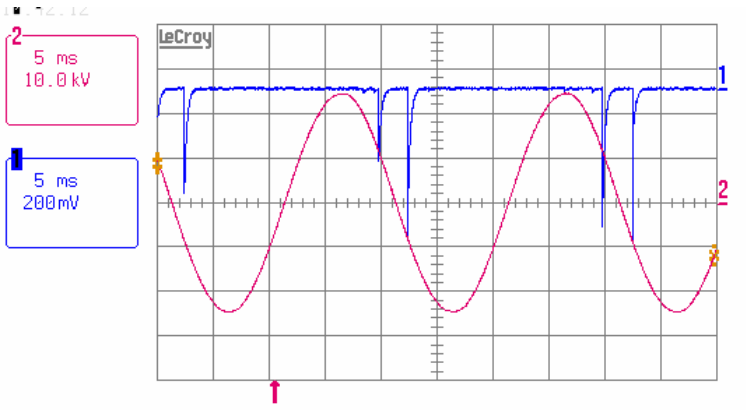
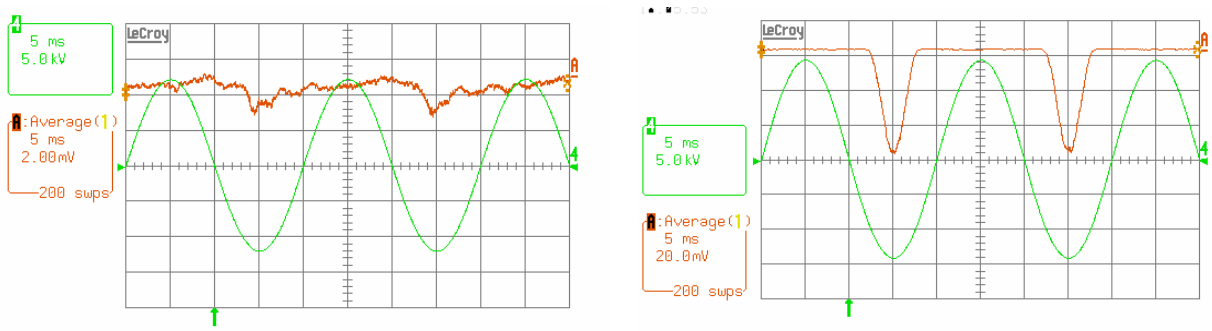


Figure A - 2 : Lumière obtenue en configuration lame plan dans l'huile silicone à 17kV$_{eff}$ (Lame L1, distance inter – électrode : 5mm). 1 : Signal issu du photomultiplicateur. 2 : Tension appliquée

2. Emission de lumière dans le Jarylec

Dans la gamme de tensions testées (jusqu'à 12kV$_{eff}$), aucune décharge partielle n'a été détectée dans le Jarylec en configuration lame-plan. Par contre, la lumière apparaît à partir de 8kV$_{eff}$, comme en configuration pointe-plan (Figure A - 3). Elle est en phase avec la tension pendant l'alternance négative. Cette lumière est associée à l'électroluminescence du Jarylec.



(a) (b)

Figure A - 3 : Lumière émise dans le Jarylec à 8.5kV$_{eff}$ (a) et à 10kV$_{eff}$ (b). Lame L3, distance inter-électrode : 5mm. 4 : Tension appliquée. A : signal PM moyenné

ANNEXE 2 : EMISSION DE LUMIERE PAR LE SUBSTRAT D'AL_2O_3 DANS L'HUILE SILICONE ET LE JARYLEC

Plusieurs mesures ont été effectuées sur le substrat d'alumine Al_2O_3-S1 dans différents liquides. Le protocole de mesure correspond à celui suivi pour le substrat d'AlN dans les liquides isolants présenté dans la partie II.1 du chapitre II. Les mesures ont été réalisées juste après le dégazage et 16h après le conditionnement de la cellule dans l'obscurité.

1. Emission de lumière issue du substrat d'Al_2O_3 recouvert d'huile silicone

Les résultats de mesures du substrat Al_2O_3-S1 dans l'huile silicone sont présenté sur les Figure A - 4 et Figure A - 5. Peu de différence apparaît avant et après conditionnement. L'imagerie montre des spots lumineux au bord de la métallisation, similaires à ceux discutés dans la Figure II - 56 du chapitre II.

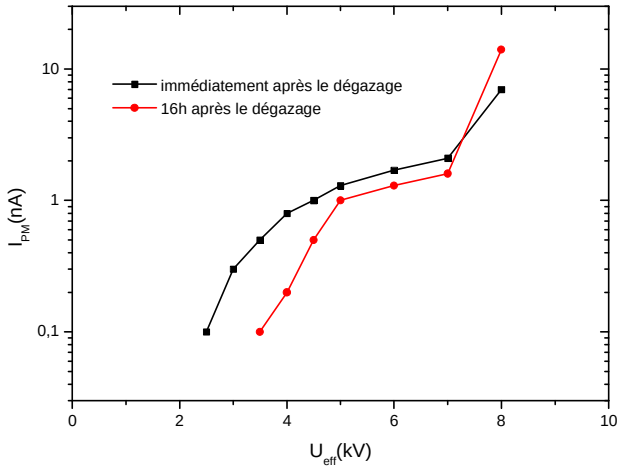
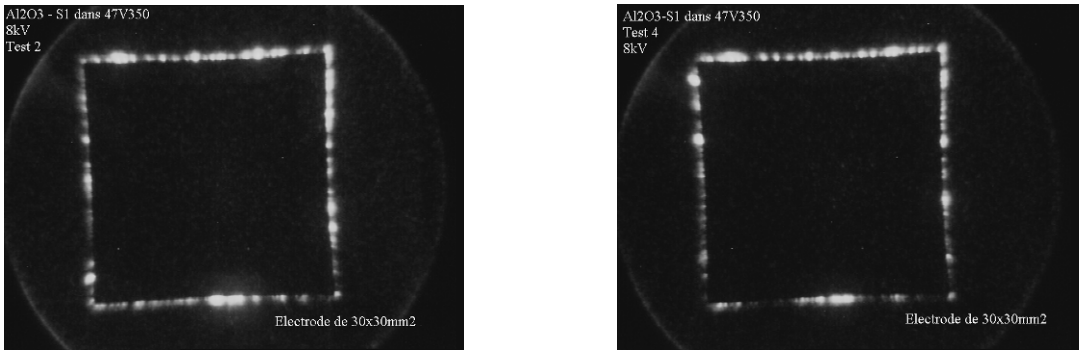


Figure A - 4 : Evolution du photo-courant en fonction de la tension appliquée sur le substrat Al_2O_3 – S1 dans l'huile silicone 47V350



(a) (b)

Figure A - 5 : Localisation de lumière émise sur le substrat Al2O3 – S1 dans l'huile silicone à $8kV_{eff}$. a : Immédiatement après le dégazage. b : 16h après le dégazage

2. Emission de lumière issue du substrat d'Al_2O_3 recouvert de Jarylec

La variation de la lumière émise est présentée sur les Figure A - 6 et Figure A - 7. Une forte diminution du photo-courant au cours du temps est enregistrée. Après 16h dans l'obscurité, la valeur moyenne du photo-courant a diminué de plus de 2 décades par rapport aux mesures effectuées après le dégazage. La lumière est beaucoup moins intense après conditionnement dans le noir (Figure A - 7).

Ces résultats ne diffèrent pas de celui observé sur le substrat d'AlN dans le Jarylec. L'électroluminescence du Jarylec est mise en cause.

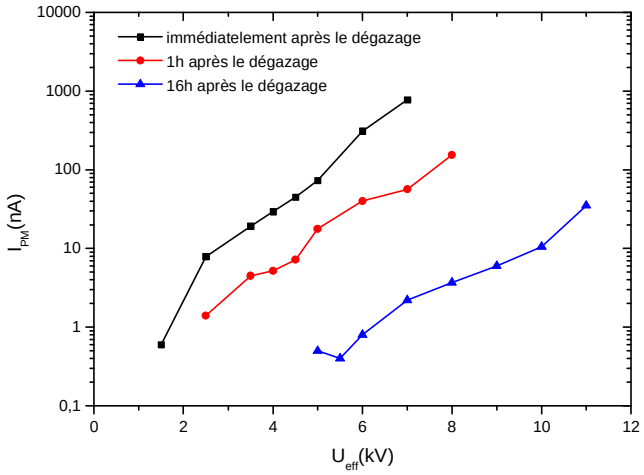
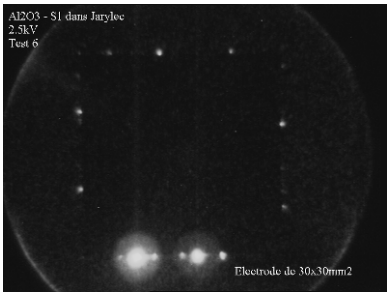
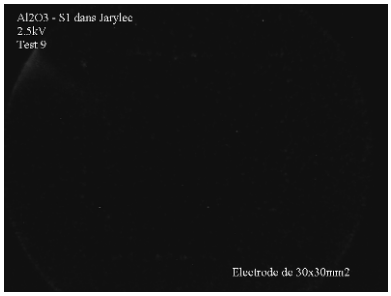


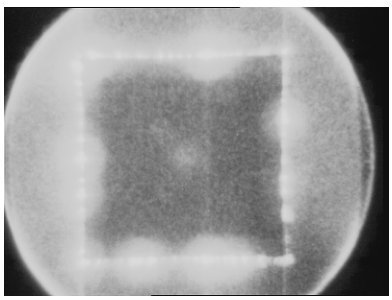
Figure A - 6 : Evolution de photo-courant en fonction de la tension appliquée sur le substrat Al_2O_3 – S1 recouvert de Jarylec



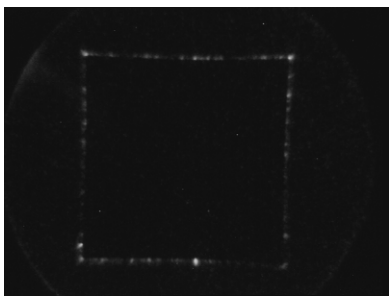
(a) 2,5 kV



(b) 2,5 kV



(a) 7 kV



(b) 7 kV

Figure A - 7 : Localisation de lumière émise sur le substrat Al_2O_3 – S1 dans le Jarylec à $2.5kV_{eff}$ et $7kV_{eff}$. a : Mesure immédiatement après le dégazage. b : Mesure 16h après le dégazage

ANNEXE 3 : MESURES DE DECHARGES PARTIELLES DANS LE GEL SILICONE A BASSE TEMPERATURE

Dans la thèse de Do [6], l'influence de la température sur les décharges partielles a été étudiée pour les températures 20-120°C. Son étude portait sur des substrats d'AlN recouverts de gel. Ici, l'étude porte sur la gamme de température -60°C à 20°C. Le protocole de mesure est identique que celui appliqué dans la partie III.7 du chapitre II.

1. Influence de la température

Les résultats relatifs aux mesures des décharges partielles sur le substrat d'AlN recouvert de gel silicone sont présentés dans les Figure A - 8 et Figure A - 9. Pour la gamme de températures étudiées, les phénomènes sont reproductibles (Figure A - 8-a) et peu dépendant de la température (Figure A - 8-b). Les distributions sont symétriques (Figure A - 9).

Ce résultat est très proche de celui de DO [6] pour des températures plus élevées (20°C-120°C). L'effet de la température est donc négligeable.

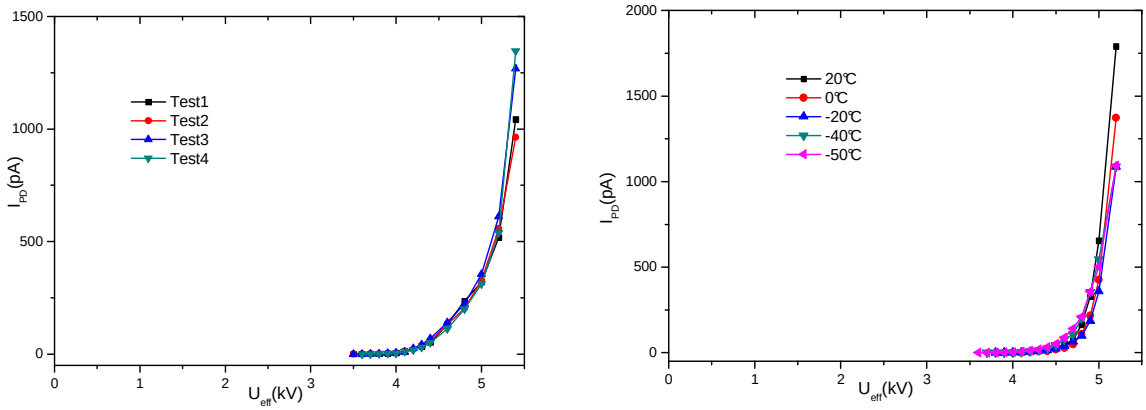


Figure A - 8 : Evolution du courant de décharge I_{DP} en fonction de la tension appliquée.

a : -50°C. b : à différentes températures

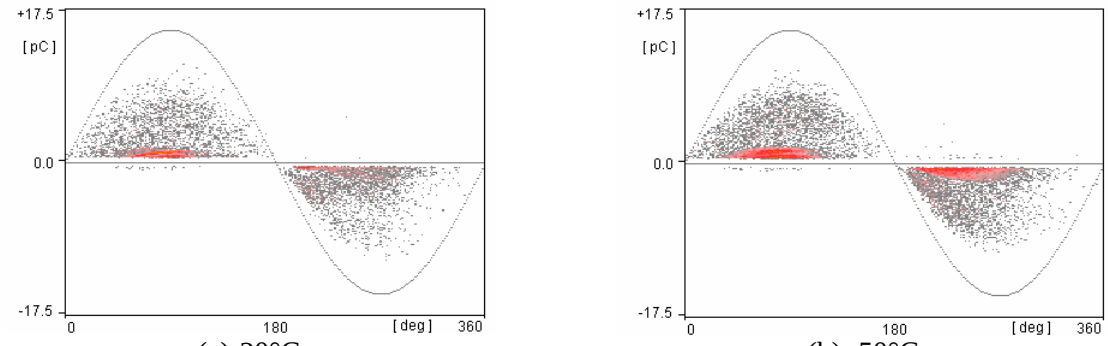


Figure A - 9 : Distribution des décharges sur le substrat AlN – S4 recouvert de gel silicone Sylgard.

a : -20°C. b : -50°C. Tension appliquée de 5kV_{eff}

2. Dégradation du gel silicone à basse température

Après 48h à -50°C, la réponse du substrat et du gel en terme de décharges partielles est reproductible. Par contre, après 24h à -60°C ; la TADP chute de 3.5kV$_{eff}$ (à -50°C) à 1.4kV$_{eff}$. La diminution de la TADP s'accompagne d'une augmentation plus rapide du courant avec la tension appliquée. Le courant peut atteindre 10nA à 2.0kV$_{eff}$ (Figure A - 10). Le retour à l'ambiante (~20°C) s'accompagne d'une baisse de la TADP (1.3kV$_{eff}$,) avec un courant de plus en plus important. Le courant monte à plus de 60nA pour 1.7kV$_{eff}$. Les distributions des décharges résolues en phases deviennent très asymétriques (Figure A - 11). L'ensemble substrat gel est dégradé après ce type de conditionnement.

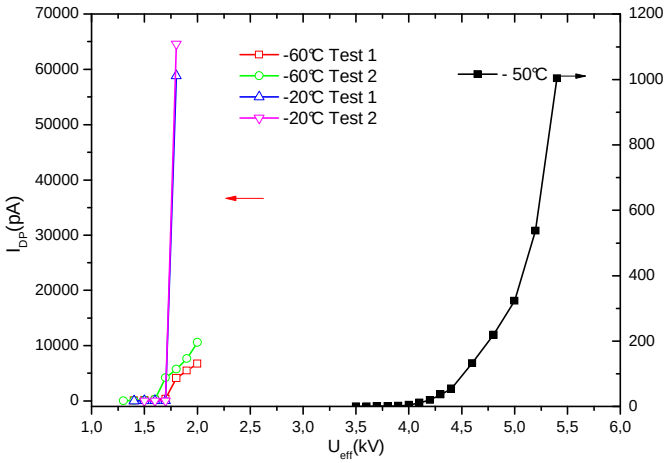
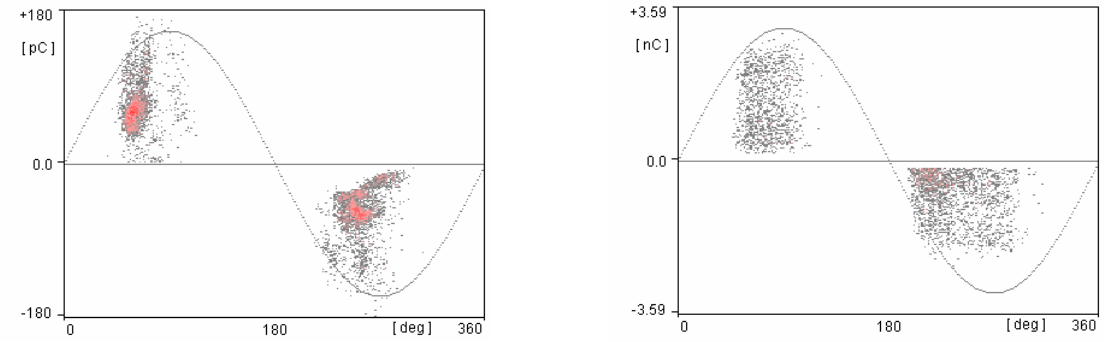


Figure A - 10 : Evolution du courant de décharge en fonction de la tension appliquée à -50°C, -60°C et retour à -20°C. Echantillon AlN – S5



(a) -60°C, 2kV$_{eff}$ (b) Retour à -20°C, 1.8kV$_{eff}$

Figure A - 11 Distribution des décharges partielles sur le substrat AlN-S4 dans le gel silicone à a : -60°C, 2.0kV$_{eff}$ et b : à -20°C, 1.8kV$_{eff}$

La visualisation de la cellule (Figure A - 12) montre l'apparition des fissures dans le gel silicone. Ces craquelures sont initiées à l'interface entre le gel et la métallisation. Elles sont surement

dues à la différence de constance d'expansion thermique des matériaux utilisés. La source des décharges enregistrées à -60°C et -20°C pourraient être associée aux cavités formées dans ces fissures.

Après remplacement du gel, de nouvelles mesures à 20°C montre une TADP proche de celle mesurée avant conditionnement aux basses températures (Figure A - 13). Les dégradations dues à la contrainte thermique agissent apparemment exclusivement sur le gel, si la durée de la contrainte est suffisamment longue. La solution pour obtenir une TADP élevée après dégradation, qui consiste à remplacer le gel, est peu pratique à mettre en œuvre. Le nettoyage du substrat et le conditionnement du gel sont longs à mettre en œuvre et quelquefois laborieux.



Figure A - 12 : Apparition de fissures dans la cellule de mesure après conditionnement à -60°C. Echantillon AlN – S5

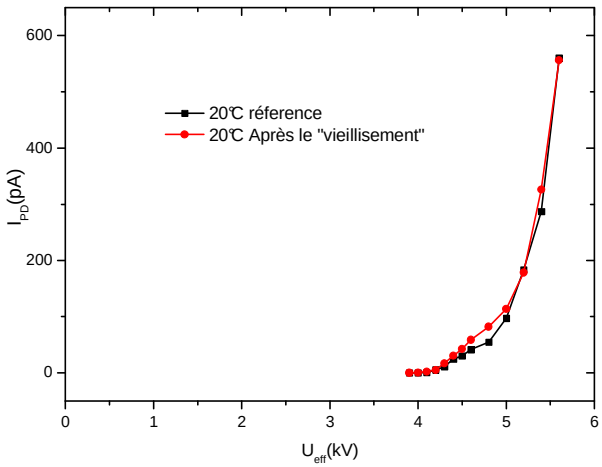


Figure A - 13 : Evolution du courant de décharges sur le substrat AlN – S5 à 20°C dans le gel avant et après conditionnement à basse température

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] B. J. Baliga, “Fundamental of power semiconductor devices”, Springer, 2008.

[2] J. Lutz *et al*, “Semiconductor Power Devices”, Springer, 2011.

[3] F. J. Auerbach *et al.*, « 6.5kV IGBT modules », Proceeding of the 39th International Conference on Power Conversion, pp 45-48, Nurnberg, Germany, 1999.

[4] M. Rahimo *et al*, “ 2.5kV – 6.5kV Industry standard IGBT modules setting a new benchmark in SOA capability”, Proc. PCIM’2004, pp 314-319, Nurnberg, Germany 2004.

[5] A. Kopta *et al*, “A 6.5kV IGBT module with very high safe operating area”, Conference Record of the 2005 IEEE Industry Applications Conference Fortieth IAS Annual Meeting, pp 794-798, 2008.

[6] M.T. Do, « Propriétés diélectriques des gel isolantes, application aux composants d’électronique de puissance », Thèse de l’Université Joseph Fourier, 2007

[7] Mitsubishi semiconductor power modules mos. Using IGBT modules. http://www.mitsubishichips.com/Global/files/manuals/powermos4_0.pdf.

[8] ABB Hipak^{TM}, Data sheet of IGBT module 5SA0600G650100, Doc. No. 5SYA1558-02 Jan 2006.

[9] B. Vogler *et al.*, “600V Converter/Inverter/Brake (CIB) - Module with integrated SOI Gate Driver IC for Medium Power Applications”, 5th International conference on Intergrated Power electronic systems CIPS 2008, pp 240-244, Nuremberg, Germany 2008.

[10] H. Nakano, Y. Onozawa, O. Ikawa, “New IGBT-PIM with 6th generation chip and package technologies”, Fuji Electric Review, Vol. 54, No. 2, pp 52-56, Japan, 2008.

[11] T. Kajiwara, A. Yamagaguchi, Y. Hoshi *et al.*, « New intelligent power multi-chips modules with junction temperature detecting function », Proceeding of 33th IAS annual meeting, Vol.2, Phôn Picheritzki 1085-1091, 1998.

[12] D. D. L. Chung, “Materials for Electronic Packaging”, Butterworth Heinemann, 1995.

[13] L. Ménager, B. Allard, V. Bley, «Conditionnement des modules de puissance », Techniques de l’Ingénieur, E3385, 2010.

[14] Iwase, N. Anzai, K. Shinozaki et *al.* « Thick film and direct bond copper forming technologies for aluminium nitride substrate », IEEE Transactions on Component, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 8, N°. 2, pp 253 – 258, 1985

[15] Kurihara, Y. Takahashi, S. Ogihara *et al*, « Bonding mechanism between aluminium nitride substrate an Ag-Cu-Ti solder », IEEE Transactions on Component, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. 15, N°. 3, pp 361-368, 1992.

[16] L. Carette, J-M. Pouchol, « Silicones », Techniques de l'Ingénieur, A3475, 1995

[17] M. Biron, « Silicones ou siloxanes. Structure et propriétés », Technique de l'Ingénieur, N2880, 2007.

[18] C. P. Wong, M. M. Wong, « Recent advances in plastic packaging of flip-chip and multi chip module (MCM) of microelectronics », IEEE transaction on conponent anf packaging technology, Vol. 22, No. 1, pp 21-25, 1999.

[19] « Power module reliability », Mitsubishi, mitsubishichips.com.

[20] M. Bouarroudj, Z. Khatir, J.P. Ousten *et al*, "Degradation behaviour of 600V – 200A IGBT modules under power cycling and high temperature environment conditions", Microelectronics Reliability, Vol. 47, pp 1719- 1724, 2007.

[21] M. Ciappa, « Selected failure mechanisms of modern power modules », Microelectronic Reliability, Vol. 42, N°12, pp 2139 – 2151, 1998.

[22] J. Vallon, « Introduction à l'étude de la fiabilité des cellules de commutation à IGBT sous fortes contraintes », Thèse de l'Institut Polytechnique de Toulouse, 2003.

[23] M. Ciappa, "Some reliability aspects of IGBT modules for high power application", Doctor of technical sciences, Swiss federal institute of technology, Zurich, 2000.

[24] G. Lefranc, G. Mitic *et al*, "Reliability testing of high power multi-chip IGBT modules", Microelectronics Reliability, Vol. 40, No. 8-10, pp 1659-1663, 2000.

[25] G. Lefranc, G. Mitic *et al*, « Properties of solders ans their fatigue in power modules », Microelectronics Reliability, Vol. 42, pp 1641-1646, 2002.

[26] G. Lefranc, G. Mitic *et al*, "Reliability of AlN substrates and their solder joints in IGBT power modules", Microelectronic Reliability, Vol. 39, pp 1159-1164, 1999.

[27] D.Frey *et al*, « Electrical field investigation in IGBT power modules », Proc. 8th international Conference on Solid Dielectric, Toulouse, Vol.2, pp 864-867, 2004.

[28] G. Mitic, G. Lefranc, « Localization of electrical insultaion and partial discharge failures of IGBT module », IEEE Transaction on Industry Application, Vol. 38, N°. 1, pp 175-180, 2002.

[29] IEC 60270, « Partial discharges measurements », 3rd edition ; 1998.

[30] IEC 1278, « Electronic Power Convertors », International Electronic Commission.

[31] J. Göttert, W. Köhler, K. Sommer, “Insultaion voltage test and partial discharge test of 3.3kVIGBT modules”, Proceedings of PCIM, Nuremberg, 1997.

[32] T. Schütze, H. Berg, M. Hierholzer, « Futher improvements in the realiability of IGBT modules », IEEE Industry Applications Conference 33rd IAS, vol.2, pp. 1022-1025, 1998.

[33] D. Frey *et al.* “Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurement”, IEEE Industry Application Conference IAS 38th, Vol. 2, pp 1000-1005, Salt Lake city, USA, 2003.

[34] J-H. Fabian, S. Hartmann, A. Hamidi, “Partial discharge failure analysis od AlN substrates for IGBT modules”, Microelectronic Reliability, Vol. 44, pp 1425-1430, 2004.

[35] G. Mitic, T. Licht, G. Lefranc, “IGBT module technology with high partial discharge resistance”, IEEE Industry Applications Society 36th Annual Meeting - IAS'01, vol.3, pp. 1899-904, 2001.

[36] J-H. Fabian, S. Hartmann, A. Hamidi, “Analysis of insulation failure modes in hight power IGBT module”, IEEE Industry Applications Society 40th Annual Meeting - IAS'05, pp 799-805.

[37] M. Berth, « Partial discharge behaviour of Power electronic packaging insulation », Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, pp 565 – 568, 1998.

[38] T. Lebey, D. Malec, S. Dinculescu *et al*, « Méthode originale de mesure des décharges partielles dans les modules de puissance haute tension », REE, N°. 2, pp 31-36, 2004.

[39] T. Lebey, D. Malec, S. Dinculescu *et al*, « Partial discharges phenomenon in high voltage power modules », IEEE Trans. on Elec. Insul., Vol. 13, N°4, pp 810 – 819, 2006.

[40] T. Lebey, D. Malec, S. Dinculescu, “Partial Discharges Testing of Power Module”, 2004 IEEE international conference on solid dielectrics ICSD, Vol.2, pp. 896-899, 2004.

[41] M.T. Do, J-L. Augé, O. Lesaint, « Optical measurement of partial discharges in silicone gel under repetitive pulse voltage”, Proceedings of 2005 International Symposium on Electrical Insulating Materials ISEIM 2005, Vol. 2, pp. 360-363, Japan, 2005.

[42] M.T. Do, J-L. Augé, O. Lesaint, “Partial discharges in silicone gel in temperature range 20-150°C», IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP 2006, pp 590-593, USA, 2006.

[43] M.T. Do, J-L. Augé, O. Lesaint, “Partial discharges and streamers in silicone gel used to encapsulate power electronic components”, 2007 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena CEIDP, pp 155-158, 2007.

[44] M.T. Do, J-L. Augé, O. Lesaint,, “Streamers and partial discharge mechanisms ih silicone gel under impulse and AC voltages”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.15, no.6, pp. 1526-1534, Dec 200.

[45] F. H. Kreuger, « Partial discharge detection in high voltage equipments", Butterworth-Heinemann, 1990.

[46] F.H. Kreuger, E.Gulski, A. Krivda, « Classification of partial discharges », IEEE Transaction on electrical Insulation, Vol.28, No.6, pp 917 – 931,1993.

[47] D. König, Y. Narayana Kao, « Partial discharges in electrical power apparatus », VDE VERLAG, 1993.

[48] Y. Segui, "Diélectriques – Courant de conduction", Techniques de l'Ingénieur, D2301, 2000.

[49] L. E. Lundgaard, « Partial discharge – Part XIII : acoustic partial discharge detection – Fundamental considerations », IEEE Elec. Ins. Mag., Vol. 8, N°4, pp 25 – 31, 1992.

[50] A.G. Day, « Optical detection of electrical discharge in insulation", Fourth International Conference on Dielectric Material, IEE, pp 229-232, London, 1984.

[51] P. P. Lebarny, « Electroluminescence des matériaux organiques. Principes de base », Techniques de l'ingénieur, E 3106, 2006.

[52] P. Lebarny, " Electroluminescence de matériaux organique. Technologies », Techniques de l'ingénieur, E 3107, 2006.

[53] C. Laurent, C. Mayoux, S. Noel, "Mechanisms of electroluminescence during aging of polyethylene", Journal of Applied Physics, Vol. 58, N° 11, pp 4346-4353, 1985.

[54] G. Teyssedre, D. Tardieu, D. Mary, C. Laurent, « AC and DC electroluminescence in insulating polymers and implication for electrical ageing », Journal of Physics D : Applied Physics, vol. 34, N° 14, pp 2220-2229, 2001.

[55] P. Canet, C. Laurent, J. Akinnifesi, B. Despax, « Ligh emission from metal – insulator – metal structure », Journal of Applied Physics, Vol. 73, N° 1, pp 384 – 393, 1993.

[56] G.A. Wolff, I. Adam, J.W. Mellichamp, « Electroluminescence of AlN », Physical Review, Vol. 114, N° 5, pp 1262-1266, 1959.

[57] R.F. Rutz, « Ultraviolet electroluminescence in AlN », Applied Physics Letters, Vol. 28, N° 7, pp 379-381, 1976.

[58] A.B.F. Duncan, Walter Gordy, R. Norman Jones, F.A. Matsen, Camille Sandorfy, W. West, "Technique of Organic Chemistry. Volume IX: Chemical applications of spectroscopy", Interscience Publishers, INC, Newyork, 1956.

[59] Stellar Industrie, http://www.stellarind.com/

[60] Document technique du gel silicone SYLGARD 527, Dow Corning®.

[61] Document technique de l'huile silicone Rhodorsil 47V.

[62] Document technique de l'huile silicone Baysilone Fluids P

[63] Document technique de Jarylec®, Arkema.

[64] Document technique d'Ugilec T, Prodolec.

[65] R. Fournié, R. Coelho, « Diélectrique – Base théoriques », Techniques de l'ingénieur, D2300, 2001.

[66] G. William, D. K. Thomas, « Phenomenological and molecular theories of dielectric and electrical relaxation of materials", Novocontrol, 1998.

[67] C. Menguy, « Mesure des caractéristiques des matériaux solides », Techniques de l'Ingénieur, 1997, D 2 310.

[68] G. William, Dielectric Newsletters, Novocontrol, March 1994.

[69] Y.C. Lan, X.L. Chen *et al*, « Low temperature synthesis and photoluminescence of AlN », Journal of Crystal Growth, Vol. 207, pp 247 – 250, 1999.

[70] B.C.SHIN, S.C.KIM, C.W.NAHM, S.J. JANG, "Non destructive testing of ceramic capacitors by partial discharge method", Materials Letters, 50 (2-3), pp 82-86, 2001.

[71] I.O. OWATE, R.FREER, "AC breakdown characteristics of ceramic material", J. Appl. Phys., vol 72, pp 2418-2422, 1992.

[72] P. Gournay and O. Lesaint, "On the gaseous nature of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids. II: Propagation, growth and collapse of gaseous filaments in pentane", J. Phys. D: Appl. Phys., 27, pp. 2117-2127, 1994.

[73] J.M. Haussonne, J. Lostec, J.P. Bertot, L. Lostec, S. Sadou, « Nouveau procédé de synthèse du nitrure d'aluminium », J. Phys. III France 3, pp 689-701, 1993.

[74] F. Breit, « Contribution à l'intégration hybride de puissance : Etude de l'environnement diélectrique des semiconducteurs », Thèse de l'université Paul Sabatier, 2003.

[75] Y. Taniyasu, M. Kasu, T. Makimoto « An aluminium nitrite light emitting diode with a wavelength of 210 nanometres », Nature, Vol. 441, 04760, May 2006.

[76] O. Lesaint, « Claquage et pré-claquage dans l'huile minérale sous tension alternative », Thèse de l'Institut Polytechnique de Grenoble, 1987.

[77] L.E. Lundgaard, O. Lesaint, "Discharges in liquids in point-plane gap under AC and impulse stress", Proceedings of 1995 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp 596-599, USA, 1995.

[78] O. Lesaint, P. Gournay, "On the gaseous nature of positive filamentary streamers in hydrocarbon liquids. I: Influence of the hydrostatic pressure on the propagation", J. Phys. D: Appl. Phys., 27, pp. 2111-2116, 1994.

[79] P. Gournay, O. Lesaint, “A study of the inception of positive streamers in cyclohexane and pentane”, J. Phys. D: Appl. Phys., 26, pp. 1966-1974, 1993.

[80] O. Lesaint, P.Gournay, “Initiation and propagation thresholds of positive prebreakdown phenomena in hydrocarbon liquids”, IEEE Trans. on Diel. and Elec. Insul., ITDEI vol.1, n°4, pp.702-708, 1994.

[81] O. Lesaint, T.V. Top, "Streamer initiation in mineral oil. Part I: Electrode surface effect under impulse voltage", IEEE Trans. on DEI, Vol.9, pp.84-91, 2002.

[82] E. Jones, L. Angerer, « Electroluminescence of transformer oil and liquid paraffin in high DC fields », Nature 210, pp 1219 – 1220, 1966.

[83] O. Lesaint, “Streamers” in liquids: relation with practical high voltage insulation and testing of liquids”, 16$^{th.}$ Int. Conf. on Cond. and Break. in Diel. Liq. (ICDL), IEEE, pp.84-89, Poitiers (France), June30-July4, 2008.

[84] T. Tran Van, “Etude de la génération des streamers dans l'huile minérale sous tension impulsionnelle et alternative,” Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1999.

[85] O. Lesaint, P. Gournay, R. Tobazéon, “Investigations on transient currents associated with streamer propagation in dielectric liquids”, IEEE Trans. on Elec. Insul., EI 26, n°4, pp.699-707, 1991.

[86] L. Dumitrescu, O. Lesaint, N. Bonifaci, A. Denat and P. Notingher, "Study of streamer inception in cyclohexane with a sensitive charge measurement technique under impulse voltage", J. of Electrostatics, vol 53-2, pp135-146, 2001.

[87] R. Coelho, J. Debeau, “Properties of the tip-plane configuration”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.4, pp 1266-1280, 1971.

[88] O. Lesaint and R. Tobazéon, “Study of the generation by sharp electrodes of a gaseous phase in dielectric liquids subjected to high ac or step voltages”, IEEE Trans. on Elec. Insul., EI 20, n°2, pp.269-273, 1985.

RESUME

Ce travail concerne l'étude du phénomène de décharges partielles dans les matériaux isolants utilisés en électronique de puissance. En utilisant des méthodes de détection électrique et optique, le mécanisme de décharge partielle sur des substrats d'AlN dans l'huile silicone a été étudié sur un grand nombre d'échantillons. La variation de la nature du substrat (AlN, Al_2O_3 et composite verre/époxy) et du matériau d'encapsulation (huile silicone, huile de colza, huile minérale de transformateur, liquide d'imprégnant du condensateur Jarylec et Ugilec) met en évidence l'origine des décharges partielles de l'ensemble substrat – encapsulant. Les décharges partielles sur les substrats céramiques frittés ne dépendent pas du passivant, et se produisent dans le volume du substrat. L'évolution temporelle de la lumière émise dans les liquides en configuration pointe – plan et sur le substrat dans différents liquides montre que l'émission de lumière est un phénomène très complexe influencé par de nombreux paramètres : électroluminescence du solide, de l'encapsulant, décharges partielles, absorption des matériaux. Le phénomène d'électroluminescence du liquide est activé par une illumination extérieure. Les mesures de spectroscopie diélectrique haute tension n'apportent pas d'information supplémentaire sur le phénomène de décharges partielles, car les pertes correspondantes sont très faibles.

Mots clés : Décharge partielle, électroluminescence, Nitrure d'aluminium, Alumine, huile silicone, diélectrique liquide, électronique de puissance

ABSTRACT

This work concerns the study of partial discharge phenomena on insulating materials used in power electronics. Using electrical and optical detection methods, the mechanism of partial discharges on AlN substrates in silicon oil is studied with a large number of samples. Changing the nature of substrates (AlN, and Al2O3 composite glass/epoxy) and of encapsulating materials (silicone oil, rapeseed oil, mineral transformer oil, capacitor impregnating liquids Jarylec and Ugilec) provides a number of conclusions about the origin of partial discharges on embedded substrates. Partial discharges on sintered ceramic substrates do not depend on the encapsulating material nature, but on the nature of the substrates themselves. The temporal evolution of light emitted by the liquid in a point - plane configuration, and on embedded substrates shows that the light during emission is a very complex phenomenon influenced by many parameters: electroluminescence of the solid, of the encapsulating material, partial discharges, and light absorption of materials. The electroluminescence of the liquid is activated by external light. Measurements of high voltage dielectric spectroscopy are also performed, but no additional information on partial discharges is obtained since corresponding losses are very low.

Keywords: Partial discharges, Electroluminescence, Aluminium nitride, Alumina, silicone oil, dielectric liquid, power electronics