

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique
Laboratoire de Génie Electrique de Guelma - LGEG

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
DOCTORAT

Domaine : **Génie électrique** Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Techniques de haute tension**

Présentée par

MOUSSAOUI Aida

Intitulée

Etudes des phénomènes de charge et de neutralisation des milieux diélectriques granulaires en utilisant la décharge à barrière diélectrique

Soutenue le : 08/07/2019

Devant le Jury composé de :

Mr. LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr. KACHI Miloud	Professeur	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr. ZOZOU Nouredine	MCF-HDR	Univ. de Poitiers	Co-encadreur
Mr. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. de Guelma	Examineur
Mr. GOURI Rabah	MCA	ENST, Rouiba	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

A ma mère

REMERCIEMENTS

D'abord et avant tout, louanges et remerciements à **Dieu** de m'avoir donné la volonté et la force d'atteindre ce point.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, **M. Miloud KACHI**, pour ses multiples conseils, suggestions et pour toutes les heures qu'il a consacré à établir cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande générosité, disponibilité et ses qualités d'écoute et de compréhension.

Je voudrais aussi exprimer mes sincères reconnaissances envers mon codirecteur de thèse **M. Noureddine ZOUZOU** de l'institut Pprime de l'université de Poitiers, de m'avoir accueilli au sein de son laboratoire et pour le suivi minutieux de mes travaux, pour ses remarques et conseils pertinents et surtout sur son soutien à l'étranger, ce qui a été un grand privilège pour moi d'avoir travaillé sous sa direction.

Je suis également reconnaissante à **M. Ayyoub ZOUAGHI** et **M. Fouad KHERBOUCHE** à l'institut Pprime de l'université de Poitiers, pour leurs aides précieuses à la réalisation des manip.

J'adresse tous mes remerciements à **M. Ahcene LEMZADMI** d'avoir accepté de présider le jury de soutenance. Mes remerciements vont également aux membres du jury, Messieurs : **Kamel BOUNAYA** et **Rabah GOURI** qui m'ont fait l'honneur d'examiner, évaluer et juger cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes enseignants de département de Génie électrique, je cite en particulier **Mokdad REMADNIA**, **Faïssel BELOUCIF**, **Abdelaziz LADJIMI**, **Chams-eddine FERAGA**, **Said GOUAIDIA** et **Abdelkrim MOUSSAOUI**.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de l'institut Pprime de l'université de Poitiers, de LGEG de l'université de Guelma et personnellement à l'ingénieur de laboratoire LGEG **M. Mourad DAFRI**.

ملخص

يعد القضاء والسيطرة على الشحنات الكهربائية على سطح المواد العازلة موضوعاً مهماً للغاية وجزءاً لا غنى عنه من عملية الالكتروستاتية. يمكن أن تؤدي الشحنات غير المرغوب فيها التي تم إنشاؤها بواسطة إحدى آليات الشحن (الاحتكاك ، التفريغ الكهربائي ، التأثير ، إلخ) إلى مخاطر أكثر أو أقل خطورة تتراوح من إزعاج بسيط ، مثل ترسب الغبار على الأجسام المشحونة أو الصدمات الكهربائية لسائق السيارة عندما يغادر مقعد السائق ، إلى مشاكل خطيرة للغاية ، مثل تلف المكونات الإلكترونية ، التآكل والتساقط الجزئي في نظام ناقل ، أو حتى حالات أكثر كارثية ، مثل الحريق أو الانفجار.

الحد من الشحنات الكهروستاتيكية غير المرغوب فيها على مستوى آمن هو الهدف من أي جهاز لتحديد الشحنات. تعتبر السلامة والكفاءة من الخصائص التي لا بد من تحقيقها من خلال محايد الشحنات الكهربائية. يعتبر تفريغ الحاجز العازل (DBD) ، الذي يتمتع بميزة منع انتقال القوس الكهربائي ، أداة مثيرة للاهتمام لتحديد الشحنات غير المرغوبة فيها بأمان. الهدف من هذه الرسالة هو التحكم في حالة شحن المواد البوليميرية الحبيبية باستخدام تفريغ الحاجز العازل (DBD). تم أخذ شكلين من أقطاب DBD في الاعتبار: DBD بسيطة و DBD مع شبكة معدنية مثبتة. تم أخذ العديد من العوامل في الاعتبار ، مثل سعة وتواتر جهد التيار المتناوب. تم التركيز على شكل القطب DBD مع الشبكة ، بحيث تمت دراسة ثلاثة أشكال موجية ، جيبيية ، مربعة وثلاثية. تمت مقارنة معدلات التحديد التي تم الحصول عليها من أشكال الموجات الثلاثة للجهد للتوصية بأفضل إشارة عالية الجهد التي تؤدي إلى أفضل تحديد.

يمكن أن يعطي استخدام DBD نتائج تحديد ممتازة عند تثبيت الشبكة. بفضل الجهد والتردد المناسبين وبتثبيت الشبكة ، يمكن إزالة ما يقارب 99% من شحنات السطح الأولية. الشبكة المعدنية المثبتة بين قطب DBD والهدف تحسن بشكل كبير من فعالية التحديد. شكل الموجة المربع هو الإشارة الأكثر ملاءمة للحصول على أفضل نتائج للتحديد مقارنة بالإشارات الجيبية والمثلثية.

الكلمات المفتاحية: تحديد الشحنات ، البوليميرات الحبيبية ، تفريغ الاكليل ، تفريغ الحاجز

RÉSUMÉ

L'élimination et le contrôle des charges électriques à la surface des matériaux diélectriques est un sujet très important et un élément indispensable pour un processus électrostatique. Les charges indésirables créées par l'un des mécanismes de charge (frottement, décharge électrique, induction, etc.) peuvent entraîner des risques plus ou moins graves allant d'une simple gêne, comme un dépôt de poussière sur les corps chargés ou les décharges électriques du conducteur lorsqu'il quitte le siège pilote d'une voiture, à des problèmes très graves, tels que l'endommagement de composants électroniques, l'agglomération et le collage de particules dans un système de convoyage, ou même des situations plus catastrophiques, comme un incendie ou une explosion .

La réduction de la charge électrostatique indésirable à un niveau sûr est l'objectif de tout dispositif de neutralisation de la charge. La sécurité et l'efficacité sont deux caractéristiques qui doivent être satisfaites par un neutralisateur de charge électrique. La décharge à barrière diélectrique (DBD), qui a l'avantage d'empêcher la transition de l'arc, est un outil intéressant pour neutraliser en toute sécurité les charges indésirables. L'objectif de cette thèse est le contrôle de l'état de charge des matériaux polymères en forme de granules en utilisant la décharge à barrière diélectrique. Deux configurations d'électrodes DBD ont été considérées: une DBD simple et une DBD avec une grille métallique installée. Plusieurs facteurs ont été pris en compte, tels que l'amplitude et la fréquence de la tension alternative. L'accent a été mis sur la configuration d'électrode DBD avec grille, de sorte que trois formes d'onde, sinusoïdale, carrée et triangulaire ont été étudiées. Les taux de neutralisation obtenus des trois formes d'onde de tension ont été comparés afin de recommander le meilleur signal haute tension conduisant à la meilleure neutralisation.

L'utilisation de la DBD peut donner d'excellents résultats de neutralisation lorsque la grille est installée. Avec une tension et une fréquence appropriées et avec la grille installée, il est possible d'éliminer près de 99% des charges de surface initiales. La grille métallique placée entre l'électrode DBD et la cible améliore considérablement l'efficacité de la neutralisation.

La forme d'onde carrée était le signal le plus approprié permettant d'obtenir les meilleurs résultats de neutralisation par rapport aux signaux sinusoïdaux et triangulaires.

Mots clés: Neutralisation des charges, polymères granulaires, décharge couronne, décharge à barrière

ABSTRACT

Elimination and control of static electricity on the surface of a dielectric material is a very important subject and a necessary part of an electrostatic process. The unwanted charges created by one of the charging mechanisms (friction, electric discharge, induction...) may cause risks of different degrees ranging from a simple annoyance, like dust deposition on charged bodies or electric shocks of car driver when he is leaving pilot seat, to a very serious problems, like damage of electronic components, agglomeration and sticking of particles in a conveying system, or even more catastrophic situations, like fire and explosion.

Reducing the unwanted electrostatic charge to a safe level is the goal of any charge neutralization device. Safety and efficiency are two characteristics that must be satisfied by an electric charge neutralizer. The dielectric barrier discharge (DBD), which has the advantage of preventing arc transition, is an interesting tool to safely neutralize unwanted charge. The aim of this thesis is the control of the charge level of polymer granular material using the dielectric barrier discharge. Two DBD electrode configurations were considered: simple DBD and a DBD with metallic grid. Several factors were considered such as the amplitude and the frequency of the AC voltage. The DBD electrode configuration with grid was the main object of the presented study, so that three waveforms, sinusoidal, square and triangular were considered. The obtained neutralization rates of the three voltage waveforms were compared in view to recommend the best high voltage signal leading to best neutralization.

Using the DBD can lead to excellent neutralization results when the grid is installed. With the appropriate voltage amplitude and frequency and with grid installed, the elimination of nearly 99% of the initial surface charges can be achieved. The metallic grid placed between the DBD electrode and the target enhances significantly the neutralization efficiency. The square waveform was the more convenient signal leading to best neutralization results in comparison to the sinusoidal and triangular signals.

Key words: Neutralization of charges, granular polymers, corona discharge, barrier discharge

LISTE DES PUBLICATIONS

Articles parus dans des Revues Internationales

- **A. Moussaoui**, M. Kachi, A. Zouaghi, N. Zouzou, “Neutralization of charged dielectric materials using a dielectric barrier discharge,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 87, pp. 102-109, 2017.
- M. Kachi, A. Nadjem, **A. Moussaoui**, L. Dascalescu, N. Zouzou, “Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, N°.2, pp. 390-395, 2018.

Communications Internationales

- M. Kachi, A. Nadjem, **A. Moussaoui**, N. Zouzou, L. Dascalescu, “Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode,” 10ème Conférence de la société française d'électrostatique (SFE), Université de Poitiers, 29-31 Août, Poitiers, France, 2016.

Communications Nationales

- M. Kachi, **A. Moussaoui**, A. Nadjem, “Neutralization of Charged Granular Insulating Materials Using DC Corona Discharge”, 10ème Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT), Université de Sciences et Technologies, Houari Boumediene (USTHB), 24-26 May, Alger, Algérie, 2016.

Tables des matières

Introduction générale	21
Chapitre I État de l'art	25
I. 1 Risques électrostatiques.....	27
I. 1.1 Cas des milieux industriels.....	27
I. 1.2 Cas particulier des composants microélectroniques.....	30
I. 2 Les isolants polymères.....	31
I. 2.1 Propriétés diélectriques des polymères.....	32
I. 2.1.1 Polarisation des diélectriques.....	33
I. 2.1.2 Phénomènes de conduction.....	40
I. 3 Mécanismes d'apparition de charges.....	44
I. 3.1 Phénomènes d'électrisation.....	44
I. 3.1.1 Électrisation par frottement (triboélectricité).....	44
I. 3.1.2 Électrisation par contact (transfert de charges).....	46
I. 3.1.3 Électrisation par influence.....	47
I. 3.1.4 Piézoélectricité.....	48
I. 3.2 Chargement par décharge couronne.....	48
I. 3.2.1 Décharge couronne positive	49
I. 3.2.2 Décharge couronne négative.....	49
I. 3.2.3 Décharge couronne alternative.....	50
I. 4 Techniques de neutralisation des charges de surface.....	51
I. 4.1 Neutralisation passive par décharge inverse.....	52
I. 4.2 Mise à la terre des corps isolants.....	52
I. 4.3 Neutralisation par décharge couronne.....	53
I. 5 La décharge à barrière diélectrique.....	55
I. 5.1 Types de DBD.....	56
I. 5.1.1 Décharge volumique.....	56
5.1.1.1 Principe de fonctionnement.....	56
5.1.1.2 Configurations de DBD volumique.....	58
5.1.1.3 Différents régime de DBD.....	58
I. 5.1.2 Décharge surfacique.....	63
5.1.2.1 Principe de fonctionnement.....	64

5.1.2.2.	Configurations de DBD surfacique.....	65
I. 5.1.3	Décharge coplanaire.....	65
I. 5.2	Interaction plasma-surface et phénomènes apparentes.....	66
I. 5.2.1	Bombardement ionique de solides.....	67
I. 5.2.2	Interactions Radicaux-Surface.....	67
I. 5.2.3	Interactions des photons avec la surface.....	67
I. 5.2.4	Interactions des ions négatifs et électrons avec la surface.....	68
I. 5.3	Applications des décharges à barrière diélectrique.....	68
I. 5.3.1	Production d’ozone.....	68
I. 5.3.2	Traitement des gaz.....	69
I. 5.3.3	Traitement de surfaces.....	71
I. 5.3.4	Les écrans plasmas (PDP : Plasma Display Panels).....	72
I. 5.3.5	SD lasers CO2.....	75
I. 5.3.6	Excimères.....	76
Chapitre II	Installations expérimentales.....	78
II. 1	Procédure de neutralisation des matériaux diélectriques par contact et par décharge couronne.....	80
II. 1.1	Déchargement des films polymères par contact direct.....	80
II. 1.1.1	Electrode de chargement.....	81
II. 1.1.2	Poste de neutralisation.....	82
II. 1.1.3	Mesure du potentiel de surface.....	83
II. 1.1.4	Matériaux étudiés.....	84
II. 1.1.5	Protocole expérimental.....	84
II. 1.2	Déchargement des granules de PE par décharge couronne.....	85
II. 1.2.1	Description de l’ensemble du banc de contrôle de l’état de charge des granules de PE par décharge couronne.....	86
II. 2	Caractérisation électrique de la décharge à barrière diélectrique Fil-cylindre- plan.....	87
II. 2.1	Description de l’ensemble du banc d’étude électrique de la DBD.....	88
II. 2.1.1	Système d’alimentation électrique.....	88
II. 2.1.2	Le système d’électrodes DBD.....	89
II. 2.1.3	La cellule de mesures électriques.....	89
II. 2.1.4	Les organes de visualisation et d’acquisition.....	89

II. 2.1.5	Matériaux étudiés.....	89
II. 3	Contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par la décharge à barrière diélectrique (DBD).....	89
II. 3.1	Description du deuxième banc expérimental.....	89
II. 3.1.1	Poste de chargement.....	91
II. 3.1.2	Poste de neutralisation.....	93
II. 3.1.3	Poste de mesure.....	94
II. 3.1.4	Système de déplacement.....	95
II. 3.1.5	Matériaux étudiés.....	96
II. 3.1.6	Techniques de mesure et procédures expérimentales.....	98
II. 3.2	Protocole expérimental.....	99
II. 4	influence de la forme d'onde sur l'élimination des charges des granules de polyéthylène par la décharge de barrière diélectrique	100
II. 4.1	Installation expérimentale.....	100
II. 4.1.1	Poste de charge électrique.....	101
II. 4.1.2	Poste de neutralisation.....	102
II. 4.1.3	Échantillon.....	102
Chapitre III Contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par contact et par décharge couronne.....		104
III. 1	Neutralisation par contact.....	106
III. 1.1	Plaques mises à la terre.....	106
III. 1.2	Plaques alimentées en courant continu.....	107
III. 1.2.1	Effet du matériau.....	107
III. 1.2.2	Influence de l'électrode.....	108
III. 1.2.3	Retour de potentiel.....	108
III. 1.3	Plaques alimentées en courant alternatif.....	109
III. 1.3.1	Effet de la tension.....	109
III. 1.3.2	Effet de la fréquence.....	110
III. 1.4	Base théorique.....	111
III. 2	Neutralisation par décharge couronne.....	112
III. 2.1	Effet de temps de chargement.....	112
III. 2.2	Reproductibilité de la charge.....	113
III. 2.3	Influence de configuration d'électrode.....	114

III. 2.3.1	Effet de la tension.....	114
III. 2.3.2	Effet de la fréquence.....	116
III. 2.4	Influence de la vitesse de balayage.....	117
Chapitre IV Caractérisation électrique de la décharge à barrière diélectrique...		120
IV. 1	Forme d'onde du courant.....	122
IV. 2	Figures Lissajous.....	124
IV. 2.1	Influence de la tension sur la charge transférée.....	127
IV. 2.1.1	Basse fréquence - 3 Hz.....	127
IV. 2.1.2	Fréquence moyenne - 300 Hz.....	129
IV. 2.1.3	Fréquence relativement élevée - 1000 Hz.....	131
IV. 2.2	Influence de fréquence sur le transfert de charges.....	132
IV. 2.2.1	Forme d'onde triangulaire.....	133
IV. 2.2.2	Forme d'onde sinusoïdale.....	134
IV. 2.2.3	Forme d'onde carrée.....	134
IV. 3	Puissance consommée	135
IV. 3.1	Influence de la tension	136
IV. 3.2	Influence de la fréquence	137
IV. 3.3	Influence de la grille	139
IV. 3.4	Influence de la présence de particules	144
Chapitre V Contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par la décharge à barrière diélectrique		147
V. 1	Influence de l'amplitude de la tension	149
V. 2	Influence de la fréquence	153
V. 3	Influence du mode de charge	157
V. 4	Influence de la régularité de la surface à neutraliser	158
Chapitre VI Influence de la forme d'onde de la tension sur l'élimination des charges à la surface des granules de polyéthylène par DBD		160
VI. 1	Profile du potentiel de surface	162
VI. 1.1	Influence de la tension	162
VI. 1.1.1	Influence de la tension à basse fréquence (3 Hz)	162
VI. 1.1.2	Influence de la tension à haute fréquence (300 Hz)	163
VI. 1.2	Influence de la fréquence	164
VI. 1.2.1	Influence de la fréquence à basse tension (14 kV)	164

VI. 1.2.2	Influence de la fréquence à haute tension (18 kV)	165
VI. 2	Taux de neutralisation	166
VI. 3	Discussion sur l'effet de la forme du signal	171
VI. 4	Effet de la vitesse de balayage.....	172
	Conclusion générale	174
	Références Bibliographiques	178

TABLE DES FIGURES

Figure I.1 : Mécanisme de chargement non uniforme du revêtement diélectrique dans l'espace.

Figure I.2 : Modèle de décharge : (a) modèle du corps humain (HBM), (b) modèle de machine (MM) et (c) modèle d'appareil chargé (CDM).

Figure I.3 : Une macromolécule composée de n monomères.

Figure I.4 : Représentation schématique des quatre types de polarisation.

Figure I.5 : Représentation schématique de la relation entre la constante diélectrique et la fréquence montrant divers mécanismes.

Figure I.6 : Les différents matériaux : représentation de leurs bandes d'énergies.

Figure I.7 : Schématisation de la présence d'état localisés (à gauche) ou d'une bande continue de conduction au sein de la bande d'énergie interdite.

Figure I.8 : Diagramme de bande d'énergie pour le cas des matériaux polymères semi cristallins.

Figure I.9 : L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces: (a) :1.Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3.Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1.Deux particules neutres de même taille en contact ; 2.les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement.

Figure I.10 : Mécanismes possibles de transfert de charge : (a) Transfert d'électrons, (b) Transfert d'ions.

Figure I.11 : Electrification par influence.

Figure I.12 : Zones d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne.

Figure I.13 : Principe de décharge couronne pointe – plan, polarité positive continue.

Figure I.14 : Principe de décharge couronne pointe – plan, polarité négative continue.

Figure I.15 : Principe de neutralisation par décharge couronne de type triode.

Figure I.16 : Tube à décharge utilisé par W. Siemens en 1857 comme ozoneur.

Figure I.17 : Configuration classique d'une DBD.

Figure I.18 : Principe de fonctionnement d'une DBD.

Figure I.19 : Différentes configurations d'une Décharge à Barrière Diélectrique volumique.

Figure I.20 : Décharges à barrière diélectrique obtenues à pression atmosphérique.

Figure I.21 : Oscillogramme d'une décharge filamentaire à 10 kHz.

Figure I.22 : Décharge luminescente dans l'hélium à la pression atmosphérique.

Figure I.23 : Décharge homogène de type Townsend dans l'Azote à la pression atmosphérique.

Figure I.24 : (a) Sens de l'écoulement induit par la force paraélectrique (Post et Corke, [119]), (b) Configuration géométrique des électrodes utilisée par Roth et Sherman pour établir la OAUGDP.

Figure I.25 : Schéma de principe de la décharge surfacique et repère utilisé.

Figure I.26 : Différentes configurations d'une Décharge à Barrière Diélectrique surfacique.

Figure I.27 : Dispositif de décharge coplanaire (CD).

Figure I.28 : Schéma des interactions plasma-surface.

Figure I.29 : (a) Schéma des tubes à décharge (b) photographie d'un grand générateur d'ozone à l'usine de filtration de l'aqueduc de Los Angeles.

Figure I.30 : Réacteur à décharge à barrière diélectrique pour les études de gaz à effet de serre.

Figure I.31 : Diagramme schématique du traitement DBD à grande vitesse des feuilles en plastique.

Figure I.32 : Configurations d'électrodes coplanaires (ACC) et matricielles (ACM) des PDPs AC.

Figure I.33 : Vue simplifiée d'un PDP coplanaire. L'observateur est sur le côté de la plaque frontale.

Figure I.34 : Coupe transversale d'un écran plasma à écran plat pour écran large, télévision couleur à haute définition.

Figure I.35 : (a) Cellules de pixels avec électrodes opposées (b) et coplanaires.

Figure I.36 : (a) Schéma de principe du SD laser CO₂ [148], (b) Photographies du laser CO₂.

Figure I.37 : Configurations de lampes excimères UV cylindriques et planaires.

Figure II.1 : Montage expérimental.

Figure II.2: Représentation schématique de la décharge couronne de type dual (fil-plan) utilisée pour le chargement des films.

Figure II.3: Système de neutralisation par contact en DC: (a) plaque capacitive, (b) plaque simple.

Figure II.4 : Plaque capacitive alimentée en AC.

Figure II.5 : Représentation schématique du poste de mesure du potentiel de surface.

Figure II.6 : Représentation schématique de la configuration expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules de PE par décharge couronne.

Figure II.7 : Photographie de l'installation expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules de PE par décharge couronne.

Figure II.8 : Dispositifs de neutralisation par décharge couronne (a) type dual (fil-plan), (b) type triode (fil-grille-plan).

Figure II.9 : Installation expérimentale pour la caractérisation électrique de la DBD.

Figure II.10 : Représentation schématique de la configuration expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules par décharge à barrière diélectrique.

Figure II.11 : Installation expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules par décharge à barrière diélectrique.

Figure II.12 : Photographie du système de charge par effet triboélectrique.

Figure II.14 : Système de charge par décharge couronne de type dual (fil-plan) : (a) Représentation schématique, (b) Photographie du dispositif expérimental.

Figure II.15 : Systèmes de neutralisation DBD (a) Électrode DBD sans grille métallique; (b) Électrode DBD avec grille métallique.

Figure II.16 : Photographie de l'électrode DBD avec grille métallique.

Figure II.17 : Poste de mesure du potentiel de surface : (a) photographie : (a) ordinateur équipée par logiciel LabVIEW ; (b) voltmètre électrostatique ; (c) carte électronique pour l'adaptation des impédances ; (d) carte d'acquisition, (b) représentation schématique.

Figure II.18 : Photographie du système de déplacement : (a) Système mécanique, (b) masse, (c) moteur, (d) unité de commande.

Figure II.19: Matériaux de l'étude : (a) granules de polyéthylène (PE), (b) film de polypropylène (PP).

Figure II.20: Photographie de la balance.

Figure II.21: photographie du hygromètre numérique.

Figure II.22: Représentation schématique de la configuration expérimentale pour l'étude de l'effet de la forme d'onde de la tension sur l'efficacité de neutralisation des charges des granules de polyéthylène.

Figure II.23: Représentation schématique de la décharge couronne de type dual (fil-plan) utilisée pour charger les particules en polyéthylène.

Figure II.24: Système de neutralisation DBD: (a) représentation schématique, (b) la grille métallique.

Figure III.1 : Potentiel de surface résiduel et le taux de neutralisation de films mis à la terre à l'aide d'une plaque simple et d'une plaque capacitive.

Figure III.2 : Taux de neutralisation obtenus par l'électrode capacitive à deux niveaux de charge initiale (a) + 3300 V et (b) + 1600 V.

Figure III.3 : Comparaison du taux de neutralisation obtenu par une plaque simple et une plaque capacitive.

Figure III.4 : Variation du potentiel de surface en fonction du temps juste après neutralisation pour les films PP chargé avec une tension $U_{ch} = + 12.5$ kV pour : (a) $U_n = -1$ kV et (b) $U_n = -1,5$ kV.

Figure III.5 : Effet de la tension sur la variation du potentiel de surface après neutralisation des films en PP à $f = 50$ Hz avec $U_{ch} = + 8.8$ kV.

Figure III.6 : Effet de la fréquence sur la variation du potentiel de surface après neutralisation des films en PP à $U_n = 2$ kV avec $U_{ch} = + 8.8$ kV.

Figure III.7 Circuit équivalent au moment de neutralisation: (a) plaque simple, (b) plaque capacitive.

Figure III.8 : Effet du temps de chargement par effet triboélectricité sur le potentiel de surface initiale d'une couche granulaire de polyéthylène (PE).

Figure III.9 : Distribution du potentiel de surface des granules de polyéthylène après chargement par effet triboélectrique pendant 2 min.

Figure III.10 Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation de couches granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectrique : effet de la tension de neutralisation par décharge couronne "fil - plan" à 50 Hz : (a) sans grille, (b) avec grille.

Figure III.11 : Taux de neutralisation en fonction de la tension de neutralisation correspondant à la décharge couronne avec et sans grille, $f = 50$ Hz.

Figure III.12 : Distribution du potentiel de surface avant et après la neutralisation des couches granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectrique; Effet de la fréquence pour la neutralisation par décharge couronne "fil- plan" à 9 kV: (a) sans grille, (b) avec grille.

Figure III.13 : Taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à la décharge couronne avec et sans grille, $U_n = 9$ kV.

Figure III.14 : Distribution de potentiel de surface après neutralisation de couche granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectricité à différentes vitesses de déplacement par décharge couronne de type duelle (sans grille) $U_n = 9$ kV, $f = 50$ Hz.

Figure IV.1 : Formes d'onde de la tension appliquée et du courant de décharge en fonction du temps : (a) onde triangulaire à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (b) onde triangulaire à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV, (c) onde sinusoïdale à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (d) onde sinusoïdale à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV, (e) onde carrée à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (f) onde carrée à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV.

Figure IV.2 : Evolution de la tension appliquée et du courant de décharge en fonction du temps durant le demi-cycle positif pour: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée. $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV.

Figure IV.3 : Evolution temporelle de la charge et courbes de charge-tension correspondantes pour: (a, b) onde triangulaire, (c, d) onde sinusoïdale, (e, f) onde carrée. $f = 1$ kHz $U_n = 16$ kV.

Figure IV.4 : Représentation de la capacité résultante selon l'état de la décharge.

Figure IV.5 : Courbes de charge-tension pour différentes tensions appliquées à 3 Hz: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Figure IV.6 : Courbes de charge-tension concentriques pour différentes tensions appliquées à 300 Hz: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Figure IV.7 : Courbes de charge-tension concentriques pour différentes tensions appliquées à 1000 Hz: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Figure IV.8 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d'onde triangulaire.

Figure IV.9 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d'onde sinusoïdale.

Figure IV.10 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d'onde carrée.

Figure IV.11 : Effet de la tension appliquée sur la puissance consommée moyenne pour $f = 3$ Hz, 300 Hz et 1000 Hz.

Figure IV.12 : Effet de la fréquence sur la puissance consommée moyenne pour trois niveaux de tension appliquée $V= 14$ kV, 16 kV et 18 kV: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Figure IV.13 : L'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée pour la forme d'onde sinusoïdale à $f= 1$ kHz.

Figure IV.14 : Courbes de charge-tension pour une DBD avec grille est une simple DBD (sans grille) au milieu et à l'extrémité de la plaque pour la forme d'onde sinusoïdale à $f= 1$ kHz, $U_n = 18$ kV.

Figure IV.15 : Représentation schématique du processus de décharge d'une DBD (création des streamers) : (a) DBD avec grille, (b) simple DBD (au milieu de la plaque), (c) simple DBD (à l'extrémité de la plaque).

Figure IV.16 : l'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour la forme d'onde sinusoïdale à $U_n = 18$ kV.

Figure IV.17 : Photographie de la DBD sans grille métallique pour diverses fréquences à $U_n = 18$ kV : (a) $f= 50$ Hz, (b) $f= 400$ Hz, (c) $f= 1000$ Hz.

Figure IV.18 : Photographie de la DBD avec une grille métallique pour diverses fréquences à $U_n = 18$ kV : (a) $f= 50$ Hz, (b) $f= 400$ Hz, (c) $f= 1000$ Hz.

Figure IV.19 : Influence de la présence des particules sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée pour la forme d'onde sinusoïdale à $f= 1$ kHz.

Figure IV.20 : L'influence de la présence des particules sur l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour la forme d'onde sinusoïdale pour deux niveaux de tension 14 kV et 15 kV à $f= 1$ kHz.

Figure V.1 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires chargées par triboélectricité: Effet de la tension de neutralisation pour une DBD sans grille métallique.

Figure V.2 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires PE chargé par triboélectricité : Effet de la tension et la fréquence pour une électrode DBD avec grille métallique (a) à 50 Hz, (b) 400 Hz.

Figure V.3 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée correspondant à une DBD avec et sans grille pour $f= 400$ Hz.

Figure V.4 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée dans le cas d'une DBD avec grille pour $f=50$ et 400 Hz.

Figure V.5 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires de PE chargées par triboélectricité : effet de la fréquence pour une électrode sans grille (a) à 15 kV, (b) à 19 kV.

Figure V.6 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation de couches granulaires de PE charge chargé par triboélectricité : Effet de la fréquence pour une électrode DBD avec grille à 12 kV.

Figure V.7 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à une électrode DBD sans grille.

Figure V.8 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à une électrode DBD sans et avec grille

Figure V.9 : Influence de la grille métallique sur le processus de neutralisation (a) DBD sans grille (b) DBD avec grille.

Figure V.10 : Photographie de la décharge DBD avec la grille pour $U_n = 18$ kV et $f = 1$ kHz.

Figure V.11 : Distribution de potentiel de surface avant et après neutralisation en utilisant une DBD avec grille à 400 Hz, 18 kV pour des couches granulaires PE chargées par: (a) Effet triboélectrique pendant 2 min, (b) DBD sans grille (400 Hz, 15 kV), (c) décharge couronne DC négatif $U_{ch} = -6,4$ kV et (d) décharge couronne DC positive $U_{ch} = +8,5$ kV.

Figure V.12 : Potentiel de surface avant et après neutralisation en utilisant une DBD avec grille à 400 Hz, 18 kV pour (a) couches granulaires PE, (b) film PP. Les échantillons sont chargés par décharge couronne DC positive, $U_{ch} = 8,5$ kV.

Figure VI.1 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD avec différents signaux: sinusoïdal, triangulaire et carré en fonction de la tension à $f = 3$ Hz : (a) 12 kV, (b) 14 kV, (c) 16 kV et (d) 18 kV.

Figure VI.2 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD alimentée avec différents signaux: sinusoïdal, triangulaire et carré à fréquence $f = 300$ Hz et différentes tensions: (a) 12 kV, (b) 14 kV, (c) 16 kV et (d) 18 kV.

Figure VI.3 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD alimentée à 14 kV de forme sinusoïdal, triangulaire et carré en fonction de la fréquence : (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 100 Hz et (d) 1000 Hz.

Figure VI.4 : Distribution du potentiel électrique à la surface des couches de polyéthylène granulé avant et après exposition à une DBD alimentée à 18 kV avec des formes sinusoïdal, triangulaire et carré en fonction de la fréquence : (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 100 Hz et (d) 1000 Hz.

Figure VI.5 : Taux de neutralisation en fonction de la tension de neutralisation à différentes fréquences et formes d'ondes de tension : (a) $f = 3$ Hz, (b) $f = 30$ Hz et (c) $f = 300$ Hz.

Figure VI.6 : Taux de neutralisation en fonction de la fréquence à différentes amplitudes et formes d'onde de tension: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Figure VI.7 : Les trois formes d'onde des signaux alternatifs.

Figure VI.8 : Effet de vitesse de balayage sur le taux de neutralisation à 300 Hz pour: (a) 12 kV, (b) 14 kV.

TABLE DES TABLEAUX

Tableau I.1: principaux accidents dans lesquels l'électrostatique est en cause.

Tableau I.2: les valeurs de ϵ_r pour plusieurs matériaux [51].

Tableau I.3 : Ordres de grandeur des caractéristiques d'un canal de décharge filamentaire.

Tableau I.4 : Ordres de grandeur des caractéristiques du pic de courant de décharge filamentaire.

Tableau I.5 : Ordres de grandeur des caractéristiques du pic de courant de décharge homogène de type Townsend.

Tableau II.1 : Caractéristique principales des granulaires de PE utilisés.

Tableau II.2 : Principales caractéristiques du polypropylène(PP).

Tableau VI.1 : taux de neutralisation résultant des expériences d'élimination de charge par une électrode DBD avec grille énergisée pour des signaux alternatifs carrés, triangulaires et sinusoïdales.

INTRODUCTION GÉNÉRALE



LZ 129 Hindenburg,

(6 mai 1937)

« Le [zeppelin LZ 129 Hindenburg](#) est détruit par un incendie le 6 mai 1937 »

« L'accident est probablement dû à une décharge électrique ».

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Durant les dernières décennies, l'exploitation des phénomènes électrostatiques présentent un intérêt considérable en raison de nombreuses applications domestiques et industrielles dans lesquelles ces phénomènes sont mis à profit: photocopie [1, 2], peinture [3], poudrage électrostatique [4], précipitation électrostatique (PES) [5], pulvérisation électrique de liquides [6], guidage électrostatique de poudres (par rideaux électriques), séparation électrostatique de granules [7], etc. La charge électrique à l'origine de ces phénomènes électrostatiques est souvent de faibles valeurs, de l'ordre de micro Coulomb. Ainsi, dans toutes les applications suscitées, la charge électrique doit être aussi élevée que possible afin d'assurer de meilleures performances possibles.

Par ailleurs, l'électricité statique peut être à l'origine de plusieurs types de risques dus aux charges indésirables ou résiduelles souvent présentes à la surface des matériaux diélectriques. Parmi ceux-ci, les problèmes liés aux opérations de fabrication à rouleau [8], au chargement et à l'explosion de poudres [9, 10], aux dommages causés aux composants semi-conducteurs [11], au chargement et à l'agglomération de particules dans les systèmes de convoyage pneumatique [12-14] et dans de nombreuses autres situations.

Les matériaux granulaires peuvent acquérir une grande quantité de charge pendant les phases de production industrielle (en écoulement). En effet, le choc des particules entre elles ou sur les parois des équipements génère des charges électriques qu'elles peuvent conserver pour une longue durée.

Pour éviter les risques causés par les charges indésirables, ainsi que toute situation embarrassante, l'élimination des charges par neutralisation est une étape nécessaire et très importante pour tout processus impliquant des charges électrostatiques.

Parmi les solutions actives, les ioniseurs à décharge couronne AC et DC [7, 15-17] sont utilisés et ont fait l'objet d'études approfondies. Cependant, la solution basée sur l'effet de couronne peut évoluer vers une décharge complète, ce qui entraîne un problème d'arc. Cette situation peut surgir si un ou les paramètres sont modifiés. Ceci peut provoquer des dégâts matériels, voire un incident plus catastrophique dans un environnement à haut risque. Pour éviter de telles situations dangereuses, la sécurité de l'installation doit être d'abord assurée par l'intégration d'un système de neutralisation.

L'objectif de cette thèse est de mettre en place une nouvelle technique capable de neutraliser les charges électrostatiques indésirables efficacement et sans risque. Le système de neutralisation proposé est basé sur la décharge à barrière diélectrique (DBD) plutôt que la décharge couronne. La présence de la barrière diélectrique assure la génération de charges neutralisantes sans apparition de l'arc, ce qui rend le dispositif plus sûr. La neutralisation par DBD est étudiée dans cette thèse en considérant les différents paramètres électriques : tension, fréquence et forme d'onde. La thèse est répartie en six chapitres :

Le **premier chapitre** est une synthèse bibliographique sur l'état de l'art dans le domaine de la neutralisation des charges électrostatiques à la surface des matériaux diélectriques granulaires. Nous présentons les différents problèmes dues à l'électricité statique dans de nombreux secteurs industriels, ainsi que les techniques utilisées pour le chargement des matériaux diélectriques et les différentes techniques de neutralisation de charges électrostatiques. La décharge à barrière diélectrique est également présentée dans ce chapitre en y expliquant les principes de ce type de décharges.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la description des différentes installations et méthodes expérimentales utilisées.

Le **troisième chapitre** est consacré aux résultats du contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par contact direct et par décharge couronne. Les résultats comprennent l'effet des grandeurs électriques de la décharge : fréquence, tension.

Le **quatrième chapitre** présente les résultats de l'étude du comportement électrique de la décharge à barrière diélectrique avec grille. Des mesures de courant de décharge, de la charge transférée et la puissance consommée ont été réalisées. Trois signaux de tension ont été considérés: sinus, triangulaire et carré.

Le **cinquième chapitre** est consacré aux résultats du contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par la décharge à barrière diélectrique. Les résultats comprennent l'effet des grandeurs électriques de la décharge : fréquence, tension, polarité et mode de chargement. L'accent sera mis sur la configuration de l'électrode à savoir une électrode DBD simple et une électrode DBD avec grille en montrant à chaque fois la différence entre les deux et l'apport de la présence de la grille.

Le **sixième chapitre** présente l'étude de l'influence de la forme d'onde sur l'élimination des charges électrostatiques à la surface des matériaux diélectriques granulaires, en utilisant la décharge à barrière diélectrique avec grille. La neutralisation est étudiée pour trois signaux de tension (sinus, triangle et carré) avec plusieurs amplitudes et fréquences.

La technique de neutralisation par décharge à barrière diélectrique est une solution viable pour l'élimination complète des charges indésirables sur les surfaces des matériaux diélectriques granulaires, aussi bien pour assurer la sécurité des installations dans les usines, notamment les usines de fabrication des composants électroniques, et pour garantir la sécurité des individus dans un environnement à haut risque. La **conclusion générale** fournit des principales contributions de cette thèse et précise les **perspectives** ouvertes.

Chapitre I

ÉTAT DE L'ART.

L'étude bibliographique concernant la neutralisation des charges électrostatiques créées au niveau des matériaux diélectriques par l'utilisation de la Décharge à Barrière Diélectrique (DBD), comporte cinq parties. La première présentera les risques dus aux charges électrostatiques dans différents domaines avec quelques exemples de cas d'accidents enregistré au cours des dernières années et dont les décharges électrostatiques sont les principales causes. La deuxième partie définira les isolants polymères. La troisième partie présentera les différents mécanismes qui sont responsables de la création de charge au niveau des matériaux diélectriques. La quatrième partie présentera les techniques de neutralisation des charges de surface. La dernière partie présentera une brève synthèse bibliographique sur la décharge à barrière diélectrique à pression atmosphérique et quelques-unes de leurs applications.

I.1 Risques électrostatiques

Depuis longtemps et jusqu’à nos jours, les charges électrostatiques ont été considérées comme une source de nuisance et de problèmes multiples. À la fin des années 1970, l’électricité statique est devenue un problème dans l’industrie électronique, un problème qui a été déjà posé pour l’industrie cinématographique dans les années 40 et 50. L’électricité statique a été identifiée comme étant la principale raison des incidents survenus entre 1950 et 1960 [18] dans les industries pétrolière et chimique; et sur la période 1960 - 1970 dans les industries de manutention de la poudre. Ceci a donc stimulé à la fois le monde universitaire et l’industrie pour étudier le phénomène électrostatique dans les opérations industrielles et le risque d’inflammation associé [19].

De manière générale, ces problèmes vont de la simple déposition de la poussière sur le meuble jusqu’aux chocs électriques, la défaillance des équipements électroniques et plus gravement les incendies. A cause des décharges électriques, appelé aussi « ESD » (ElectroStatic Discharge), occasionnées par l’accumulation de charges à la surface des isolants, les conséquences dans les industries de haute technologie [20] ou dans les industries chimiques [21] peuvent être très graves et très coûteuses.

Les objets chargés créent aux alentours un champ électrique qui, selon le niveau de charge et la forme de l’objet, peut être assez intense pour provoquer une décharge. Une décharge électrostatique est un événement qui correspond à un transfert spontané de charges entre deux objets lorsqu’une différence de potentiel suffisamment élevée apparaît entre ces derniers [22]. La décharge est donc une conséquence directe de l’effondrement de l’isolant. C’est cette décharge justement qui constitue la source de risque puisqu’elle peut entraîner un incendie dans un milieu inflammable, endommager ou perturber un composant électronique...etc.

I.1.1 Cas des milieux industriels

L’électricité statique peut être une source de problèmes pendant les phases de production dans de nombreux domaines différents et cela à tous les niveaux de fabrication. Il y a non seulement le risque de pertes évidentes liées à la vie humaine, mais aussi le risque dû aux dommages des installations et à l’arrêt des activités de production. Ci-dessous des exemples liés à la présence de charges électrostatiques :

-Dans les industries du papier [23] et du plastique, l’apparition de charges électriques engendre des phénomènes de répulsions et d’attractions qui ont pour conséquence de gêner les travaux industriels.

-Dans l’industrie chimique [24], les conséquences les plus graves de l’électricité statique sont, sans aucun doute, les incendies et les explosions qu’elle peut engendrer. Le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, car même une étincelle peut déclencher une explosion.

-Explosions de poussière. En effet, les suspensions de poussières de matières pulvérulentes peuvent exploser à cause de décharges électriques d’énergie très faible [25]. D’autre part, des poussières peuvent également être attirées, se déposant alors en une couche épaisse sur les parois des machines, et obstruant parfois certains conduits ou filtres.

-Explosions de gaz et de vapeurs (inflammation des vapeurs ou des gaz inflammables) [24]. En effet, les atmosphères à risque (mélanges air/vapeurs d’hydrocarbure par exemple) peuvent exploser à cause de décharges électriques d’énergie très faible : de l’ordre de 10^4 joules pour un mélange vapeurs/air et 10^6 joules pour un mélange vapeurs/oxygène.

-Perturbation au niveau des satellites. Sous certaines conditions, des décharges électrostatiques peuvent apparaître et éventuellement induire la perte de fonctionnalités sur le satellite [26]. La **Figure I.1** explique le mécanisme de chargement dans l’espace.

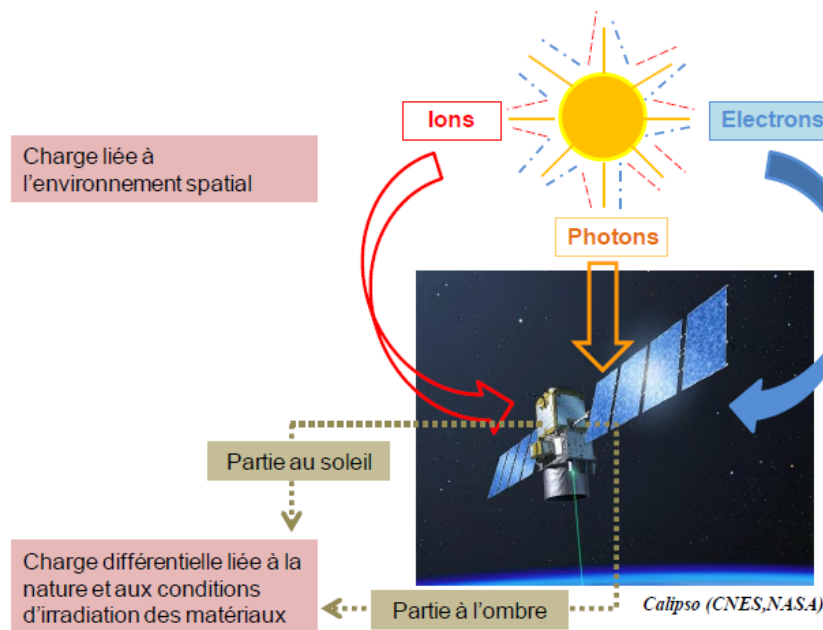


Figure I.1 : Mécanisme de chargement non uniforme du revêtement diélectrique dans l’espace [26].

Le **Tableau I.1** donne des exemples de cas d’accidents enregistré au cours des dernières décennies et dont les décharges électrostatiques sont les principales raisons.

Tableau I.1: principaux accidents dans lesquels l’électrostatique est en cause.

ANNEE	PAYS et SECTEUR	DEROULEMENT DE L'ACCIDENT	ANALYSE DES SOURCES D'INFLAMMATION
1965	Etats-Unis Industrie chimique	<p>Une explosion suivie d’un incendie se déclare lors d’une opération de remplissage (déversement en pluie) d’un réservoir de 1900 m³ (500 000 gallons) de crésol (cresilicacid).</p> <p>Pour mémoire le point clair du crésol est de 20.5 °C (69 °F).</p> <p>La toiture et le tiers supérieur du réservoir furent gravement endommagés et la majeure partie du produit fut consommée.</p>	<p>L’inflammation serait due à une décharge d’origine électrostatique initiée par la montée en potentiel de la surface du liquide électriquement chargée par son mouvement ainsi que par les phénomènes accompagnant le déversement en pluie [27].</p>
1980	Afrique du Sud Transport de produits inflammables	<p>Une explosion se déclare lors du remplissage d’un camion-citerne avec du xylène.</p> <p>Le camion avait été laissé sans surveillance, avant l’opération de remplissage, alors que la température extérieure était très élevée.</p> <p>L’explosion est suivie d’un incendie et fait deux blessés.</p>	<p>L’électrostatique est considérée comme la cause à l’origine de l’accident. Cette conclusion s’appuie sur les faits suivants :</p> <ul style="list-style-type: none"> - l’opération de transvasement était réalisée au moyen d’un tuyau flexible en polypropylène muni d’une spirale métallique reliée à son extrémité au filtre ; - la spirale métallique et le filtre n’étaient a priori pas reliés à la terre [27].
1989	France Fabrication de	<p>Une double explosion se produit dans une usine de bouchons. L’accident se</p>	<p>Il a été considéré que la première explosion, qui à elle-même déclenché la seconde explosion, était d’origine</p>

	bouchons	produit lors de l’opération de colmatage qui consiste à mélanger des bouchons de liège (préalablement conditionnés dans des sacs plastiques) à de la colle polyuréthane (de l’essence C constituant le solvant) et à de la sciure de liège. Il a été considéré que la première explosion de gaz (vapeurs de solvant) et que la seconde était une explosion de poussière (sciure de liège). L’accident fait deux blessés (brûlés au thorax).	électrostatique. Les mécanismes disruptifs pourraient être évoqués soit par les opérateurs qui auraient été électriquement chargés, soit par l’opération de déversement des bouchons à partir de leur emballage (sac plastique) [27].
1993	France Fabrication de peintures	Un incendie se déclare dans une entreprise de fabrication de peintures lors du nettoyage d’une tête d’injection sur une chaîne de conditionnement. Le dispositif pour le nettoyage utilise du toluène qui est récupéré dans un bac et est recyclé par pompage. L’accident fait un blessé, brûlé au bras gauche et au cou.	L’électrostatique est considérée comme la cause à l’origine de l’accident. En effet, les récipients métalliques, en particulier celui placé sous la tête d’injection, n’avaient pas été reliés à la terre [27].

I.1.2 Cas particulier des composants microélectroniques

Dans le domaine de la microélectronique [28-30], lorsqu’un appareil électronique est soumis à un courant ou une tension qui sont au-delà des limites de spécification de l’appareil (exposé à un événement ESD), il peut ne plus fonctionner [22]. L’événement ESD peut provoquer une fusion de métal, une rupture de jonction ou une panne d’oxyde. Les circuits de

l'appareil sont endommagés de manière permanente, provoquant l'arrêt total ou partiel de l'appareil [31].

Les événements ESD d'un composant microélectronique peuvent être décrits par différents modèles, en fonction des différentes situations rencontrées. Il existe trois types de modèles ESD [32]. Le plus courant est le modèle du corps humain, en anglais Human Body Model (HBM), qui décrit un événement ESD généré lorsqu'un humain interagit avec un composant électronique. De la même manière, le modèle de la machine (MM) décrit la décharge engendrée par un équipement. Le modèle du composant chargé, en anglais Charged Device Model (CDM), considère le cas où le composant lui-même est chargé et se décharge en entrant en contact avec un conducteur [30, 33]. La **Figure I.2** représente les trois types de modèles ESD.

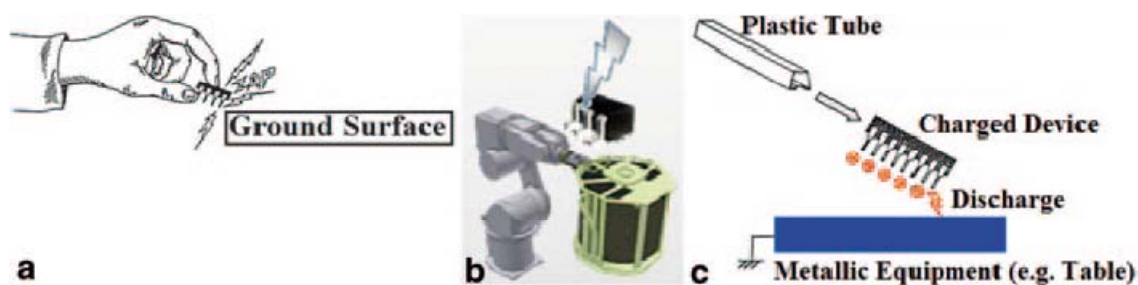


Figure I.2 : Modèle de décharge : (a) modèle du corps humain (HBM), (b) modèle de machine (MM) et (c) modèle d'appareil chargé (CDM) [34].

I.2 Les isolants polymères

Le polymère est un mot qui vient du grec formé de deux éléments, le préfixe « poly-» qui vient de l’adjectif « pollus » et qui signifie « plusieurs », et de « meros » qui a donné la racine « -mère » et qui signifie « partie » [35]. La notion de polymère a été définie pour la première fois par chimiste allemand *Hermann Staudiger* dans les années 1920, et la notion de macromolécules s’est imposée dans les années 1930 après s’être opposée à la théorie « micellaire » [36].

Un polymère est une macromolécule, organique ou inorganique, constituée de l'enchaînement répété d'un même motif, généralement des atomes de C, H, O, N...appelé monomère [20, 22], et reliés les uns aux autres par des liaisons covalentes. Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire M qui est en rapport avec le degré de polymérisation n (**Figure I.3**) [37, 38].



M : motif monomère

n : degré de polymérisation

Figure I.3 : Une macromolécule composée de n monomères [39].

Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finales (polymères) représente le degré de polymérisation. Si ce degré est élevé on parle de hauts polymères, par contre s’il est faible le composé est une oligomère [40].

Les polymères peuvent être d’origine naturelle (animale ou végétale) ou d’origine synthétique [39, 41]. Les macromolécules naturelles sont les caoutchoucs, les polysaccharides, le glycogène, l’acide désoxyribonucléique (ADN), les protéines. Les propriétés électriques, thermiques et mécaniques de ces macromolécules dépendent de la nature chimique des unités constitutives de la chaîne, de sa conformation mais aussi des conditions de mise en œuvre [39].

I.2.1 Propriétés diélectriques des polymères

Un diélectrique parfait est par définition un cas idéal où aucune charge ne peut traverser le matériau. Dans la réalité, tout diélectrique peut être le siège d’une grande variété de mécanismes de propagation des charges lorsqu’il est soumis à des champs électriques suffisants.

Les matériaux diélectriques réagissent à l’application d’un champ électrique par un mécanisme de polarisation ou encore de mécanismes d’injection et de transport de charges. Ces mécanismes de réaction du matériau à un champ influent directement sur le phénomène d’accumulation de charges à la surface de l’isolant et donc sur le phénomène de décharge électrostatique. Pour mieux comprendre les phénomènes de charge et décharge électrostatique, les mécanismes de polarisation d’injection et de transport de charge sont à prendre en compte.

I.2.1.1 Polarisation des diélectriques

Pour mettre en évidence le phénomène de polarisation, il suffit de réaliser une expérience simple sur un condensateur où un matériau diélectrique placé entre deux armatures.

L’application d’un champ électrique \vec{E} induit des mouvements des porteurs de charges. L’effet de ces mouvements est appelé polarisation induite. *Michael Faraday* en 1837 était le premier à découvrir l’effet de la polarisation diélectrique.

Le déplacement électrique \vec{D} induit est décrit par la loi de Gauss [42]:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} \quad (I.1)$$

Où $\varepsilon_0 = 8,854.10^{-12} F.m^{-1}$ est la permittivité du vide.

Maintenant, si un matériau diélectrique est placé entre deux armatures, il faut prendre en compte l’aptitude que possède le matériau à pouvoir se polariser sous l’action du champ. Le déplacement électrique induit devient alors :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P} \quad (I.2)$$

Dans un matériau homogène, linéaire et isotrope, la polarisation diélectrique \vec{P} induite est souvent proportionnelle au champ électrique \vec{E} :

$$\vec{P} = N_0 \alpha_g \vec{E} = \varepsilon_0 \chi \vec{E} \quad (I.3)$$

Où N_0 : densité de dipôles intrinsèques,
 α_g : polarisabilité globale,
 χ : susceptibilité diélectrique qui caractérise la polarisation créée par un champ électrique.

On en déduit, en tenant compte de l’équation (I.3):

$$\vec{D} = \varepsilon_0 (1 + \chi) \vec{E} \quad (I.4)$$

En posant :

$$\varepsilon_r = 1 + \chi \quad (I.5)$$

Où ϵ_r est la permittivité relative (ou constante diélectrique) du matériau.

Avec la permittivité relative du vide $\epsilon_r = 1$ et la susceptibilité $\chi = 0$ (n’est pas polarisable).

On obtient le déplacement diélectrique sous la forme :

$$\vec{D} = \epsilon_0 \epsilon_r \vec{E} \quad (I.6)$$

D’après les équations (I.3) et (I.5)

$$\vec{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \vec{E} \quad (I.7)$$

Plusieurs types de mécanismes par lesquels la polarisation diélectrique se produit : électronique, ionique (ou atomique), dipolaire et interfaciale (ou de charge d’espace) [43]. La

Figure I.4 représente les quatre types de polarisation.

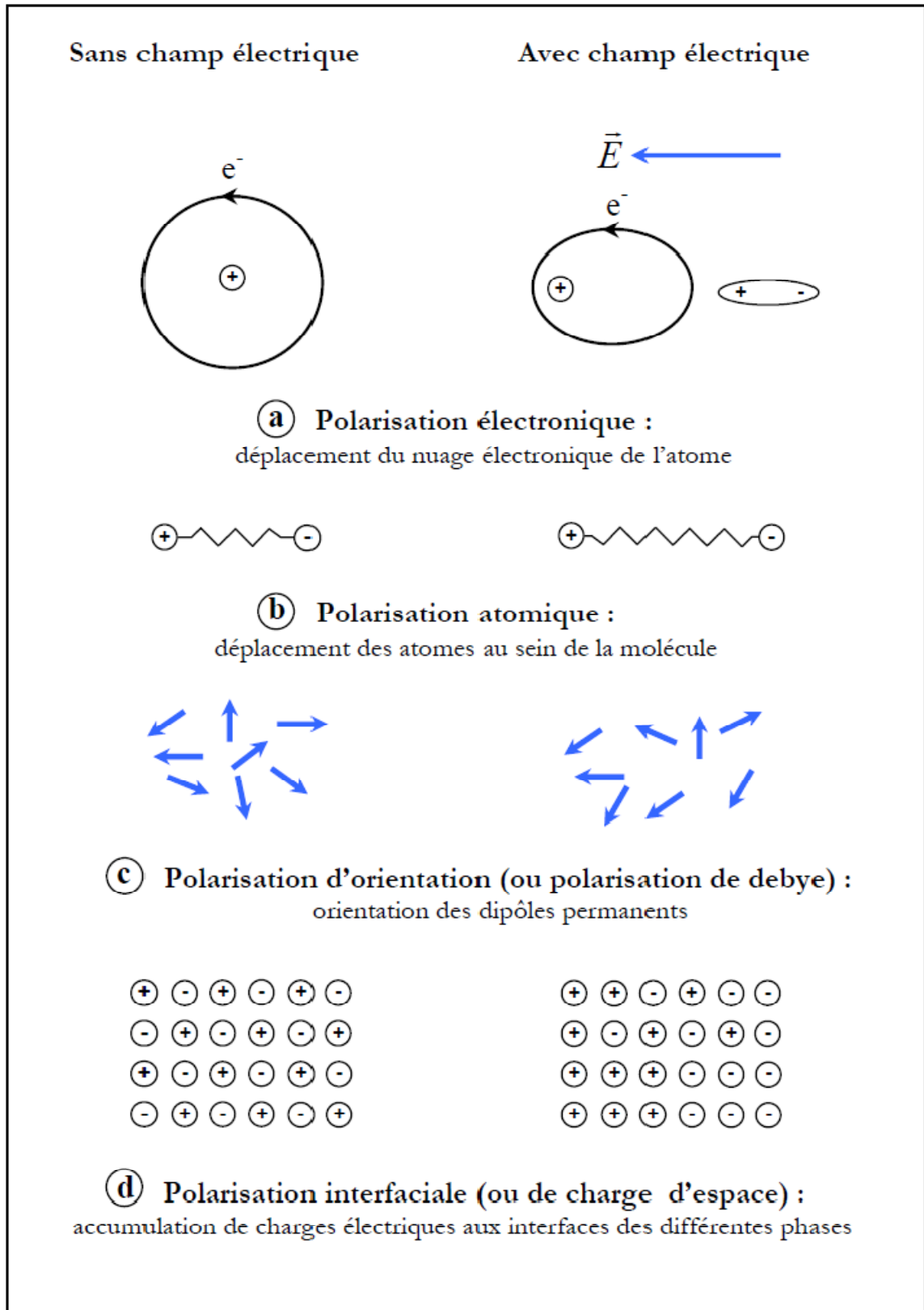


Figure I.4 : Représentation schématique des quatre types de polarisation [44].

- **Polarisation électronique:** Quand un diélectrique est placé dans un champ électrique \vec{E} , il y a un déplacement du nuage d’électrons par rapport au noyau. Il

apparaît ainsi un moment dipolaire induit dans la molécule. Ce phénomène est appelé polarisation électronique. Ce mécanisme ne dépend pas de la température [45].

Il résulte du déplacement du centre des électrons négatifs chargés par le champ électrique. Le déplacement du nuage d'électrons se traduit par un moment dipolaire. Le moment dipolaire est défini comme étant le produit de la charge et la distance de décalage.

$$\vec{p} = q \cdot \vec{d} \quad (\text{I.8})$$

\vec{p} : est directement proportionnel à la force du champ

$$\vec{p} = \alpha_e \vec{E} \quad (\text{I.9})$$

α : constante de proportionnalité et connu comme la polarisabilité électrique et il est indépendant de la température.

Un gaz monoatomique présente seulement ce type de polarisation.

$$\vec{P}_e = n\vec{p} = n\alpha_e \vec{E} \quad (\text{I.10})$$

La contribution de \vec{P} à la constante diélectrique peut être obtenue comme suit

$$\epsilon_r = 1 + \chi = 1 + \frac{P_e}{\epsilon_0 E} = 1 + \frac{n\alpha_e E}{\epsilon_0 E} \quad (\text{I.11})$$

$$\epsilon_r = 1 + \frac{n\alpha_e}{\epsilon_0} \quad (\text{I.12})$$

- **Polarisation ionique** : Ce type de polarisation se produit typiquement dans des éléments de cristaux ioniques tels que NaCl et KCl. Ce mécanisme contribue à la permittivité relative. A l'intérieur de ces matériaux, il n'y a pas de polarisation nette en l'absence de champ électrique. C'est parce que les moments dipolaires des ions négatifs sont annulés par les ions positifs. Lorsqu'un champ externe est appliqué, les ions sont déplacés, ce qui conduit à une polarisation induite. S'il y a N nombre de molécules polarisées présentes dans le volume unitaire du matériau, la polarisation ionique du matériau est donnée par [46]:

$$P_i = N\mu_i \quad (\text{I.13})$$

Où,

μ_i : Le moment dipolaire moyen induit de la molécule dû au champ électrique appliqué de l'extérieur. Ceci est évidemment proportionnel à la force du champ électrique appliqué.

Alors,

$$\mu_i = \alpha_i E \quad (\text{I.14})$$

Par conséquent

$$P_i = N \alpha_i E \quad (\text{I.15})$$

- **Polarisation d’orientation ou polarisation de Debye** : La polarisation d'orientation se produit lorsqu'il y a un moment dipolaire permanent dans le matériau. Les matériaux tels que HCl et H₂O auront un moment dipolaire permanent net parce que les distributions de charges de ces molécules sont biaisées. Par exemple, dans une molécule de HCl, l'atome de chlore sera chargé négativement et les atomes d'hydrogène seront chargés positivement, ce qui rendra la molécule dipolaire. La nature dipolaire de la molécule devrait provoquer un moment dipolaire dans le matériau, cependant, en l'absence de champ électrique, le moment dipolaire est annulé par une agitation thermique résultant en un moment dipolaire net nul par molécule [45]. Cependant, lorsqu'un champ électrique est appliqué, la molécule commencera à tourner pour aligner la molécule dans la direction du champ électrique [47], provoquant un moment dipolaire moyen net par molécule.
- **Polarisation interfaciale ou de charge d’espace : effet Maxwell – Wagner – Sillars** : Ce type de polarisation se produit lorsqu'il y a accumulation de charges dans une région séparant deux matériaux en raison d'un champ externe. Cette polarisation est également appelée polarisation de charge d'espace [46]. Par exemple, lorsqu'un champ électrique est appliqué à travers le diélectrique dans un condensateur, les électrons sont attirés vers l'électrode positive mais ils ne peuvent pas s'échapper. Donc, il y a une accumulation d'électrons et des charges positives l'entourent. Il en résulte une polarisation. Un type similaire de polarisation se produit dans les cristaux hétérogènes ou les cristaux contenant des défauts. Les électrons sont piégés dans ces défauts et des charges de polarisation sont créées dans les défauts. Cela donne lieu à une polarisation [47].

La constante diélectrique ou la permittivité relative d'un matériau est la permittivité du matériau normalisée par rapport à la permittivité du vide. La constante diélectrique complexe ε^* peut s'écrire comme $\varepsilon^* = \varepsilon' - i\varepsilon''$, où ε' est la partie réelle et ε'' est la partie imaginaire du constant diélectrique complexe [48].

La constante ε' est une mesure de la quantité de polarisation dans un matériau. Plusieurs espèces ou mécanismes polarisants peuvent être présents, chacun ayant une fréquence de relaxation caractéristique et une dispersion diélectrique associée centrée autour de cette fréquence de relaxation. La **Figure I.5** illustre les dispersions de ε_r que l'on trouve théoriquement dans un matériau dans la gamme de fréquences allant de 10^3 à 10^{15} Hz. Aux fréquences les plus hautes, les espèces polarisantes dans un matériau sont des électrons [48]. Aux fréquences inférieures à environ 10^{13} Hz, il existe également une contribution de la polarisation atomique. La polarisation dipolaire, l'orientation des molécules polaires, se produit à des fréquences inférieures à environ 10^{10} Hz. À des fréquences environ inférieures à 10^5 Hz environ, divers types de polarisations de charge se produisent et sont tous appelés collectivement dans la présente étude mécanismes de Maxwell-Wagner [49, 50].

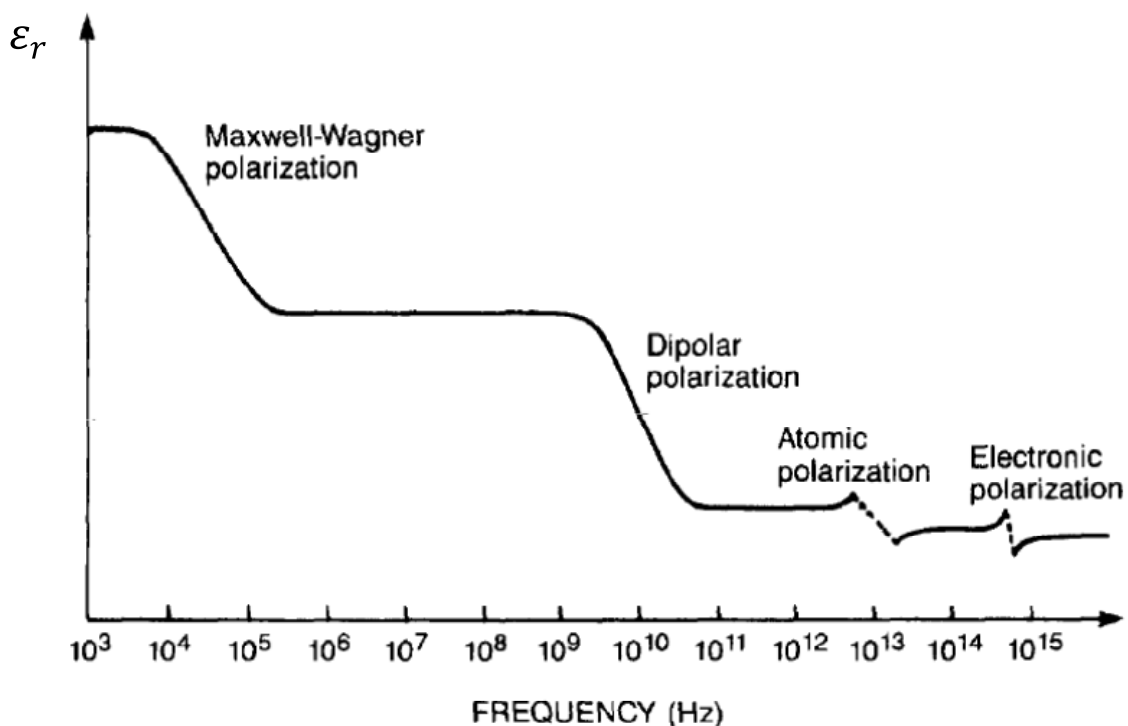


Figure I.5 : Représentation schématique de la relation entre la constante diélectrique et la fréquence montrant divers mécanismes [48].

Le **Tableau** suivant montre les valeurs de ϵ_r pour une variété de matériaux :

Tableau I.2 : les valeurs de ϵ_r pour plusieurs matériaux [48].

Matériau	ϵ_r
Quartz	4.5-4.7
Calcite	7-8
Schiste argileux	13-15
Gaz	1
Pétrole	2.2
Eau (H ₂ O)	80

Les polymères polaires

Les polymères polaires sont généralement des matériaux isolants qui possèdent dans leurs molécules en plus du carbone et de l’hydrogène, des atomes généralement électronégatifs tels que : le fluor, le chlore, l’oxygène, l’azote, ce qui favorise la distribution des charges asymétriques. Ces matériaux possèdent au contraire des polymères apolaires, une permittivité relative et un indice des pertes diélectriques élevées. Parmi ces polymères : le poly (chlorure de vinyle) PVC; le poly (fluorure de vinylidène) PVDF; le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA; les polycondensats tels que les polyamides et les polystères [38].

Les polymères apolaires

Contrairement aux polymères polaires, ces polymères présentent un indice de pertes diélectriques faibles et une permittivité relative quasi-constante dans un large domaine de température et de fréquence. Leur formule chimique ne contient que du carbone et de l’hydrogène et s’ils contiennent des atomes électronégatifs tels que le fluor, ces atomes sont placés symétriquement le long de la chaîne carbonée. Parmi ces polymères on peut citer [38] :

- le polyéthylène PE ;
- le polypropylène PP ;
- le poly (tétrafluoréthylène) PTFE.

I.2.1.2 Phénomène de conduction

Le polymère comme tous les diélectriques réels est un isolant imparfait, il possède des défauts de structure dus à la présence d’impuretés chimiques et physiques. Ces défauts de structure se traduisent par des états d’énergie intermédiaires dans la bande interdite, qui peuvent piéger des charges dans le polymère [39].

Toutes charges électriques entraînées dans un mouvement ordonné sous l’influence d’un champ électrique traduit le phénomène de conduction électrique. Ces charges susceptibles de donner naissance à un courant dans le circuit extérieur sont des ions ou des électrons ou à défaut des trous [51]. Ce courant a pour effet la modification des propriétés diélectriques. L’augmentation de ces charges dans le matériau provoque une diminution de la résistivité donc la rigidité diélectrique, on parle alors de vieillissement du matériau.

Les charges peuvent être classées selon leurs origines en deux catégories [52] :

- Les charges provenant de l’extérieur c’est-à-dire injectées dans le polymère, généralement ces charges proviennent des électrodes.
- Les charges intrinsèques dans les polymères isolants existant initialement, ou créées ultérieurement par des mécanismes, tel que l’électro –dissociation ou l’ionisation des impuretés qui proviennent des additifs, de réactions chimiques ou incluses au sein du polymère. Les impuretés sont aptes à se mouvoir dans l’isolant en créant ainsi des charges mobiles et participent à l’apparition des chemins de conduction électrique.

La conduction de charges sera contrôlée soit par des phénomènes d’interfaces électrodes/diélectrique ou air/diélectrique soit par des phénomènes de volume au sein du diélectrique [53].

Une fois que les charges existent dans le volume de l’isolant, et sous l’effet du champ, elles se déplacent d’un piège à l’autre suite aux divers mécanismes de piégeage – dépiégeage (effet Poole – Frenkel ou par saut) [53].

Quel que soit le matériau solide considéré, il est soumis à la théorie des bandes d’énergie (**Figure I.6**). Cependant, tous les matériaux n’ont pas les mêmes propriétés électriques. La classification des matériaux en 2 groupes principaux (isolants et conducteurs) est liée à une valeur d’énergie particulière appelée énergie de Fermi. Globalement, la

probabilité de présence d’un électron à un niveau d’énergie E est estimée par la fonction de Fermi [53, 54] :

$$f(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{kT}\right)} \quad (\text{I.16})$$

k : constante de Boltzmann ($k=8,61 \times 10^{-5}$ eV)

T : température absolue

E_f : énergie de Fermi, caractéristique de la substance, variant très peu avec la température.

Cette fonction évolue très vite entre les bornes $f(E) = 0$ et $f(E) = 1$. E_f est l’énergie pour laquelle la probabilité de présence d’un électron s’approche très fortement de 0. Au contraire, en dessous de cette énergie, la probabilité de présence d’un électron est très proche de 1. La définition des deux grands groupes de matériaux vis-à-vis de leurs propriétés électriques est liée à cette énergie. Si le niveau de Fermi est situé au niveau d’une bande d’énergie autorisée, on obtient un matériau possédant une bande d’énergie partiellement remplie. Ainsi, n’importe quel petit accroissement d’énergie peut suffire pour conduire un électron de son état d’origine vers un état d’énergie supérieur (on est dans un pseudo-continuum). Ceci est le cas des métaux.

Si le niveau de Fermi est situé dans la bande d’énergies interdites, alors la bande de valence est entièrement occupée. Il faut fournir une énergie au moins égale à $E_c - E_v = E_g$ pour qu’un électron puisse sortir de son état initial. Nous sommes dans le cas des matériaux isolants.

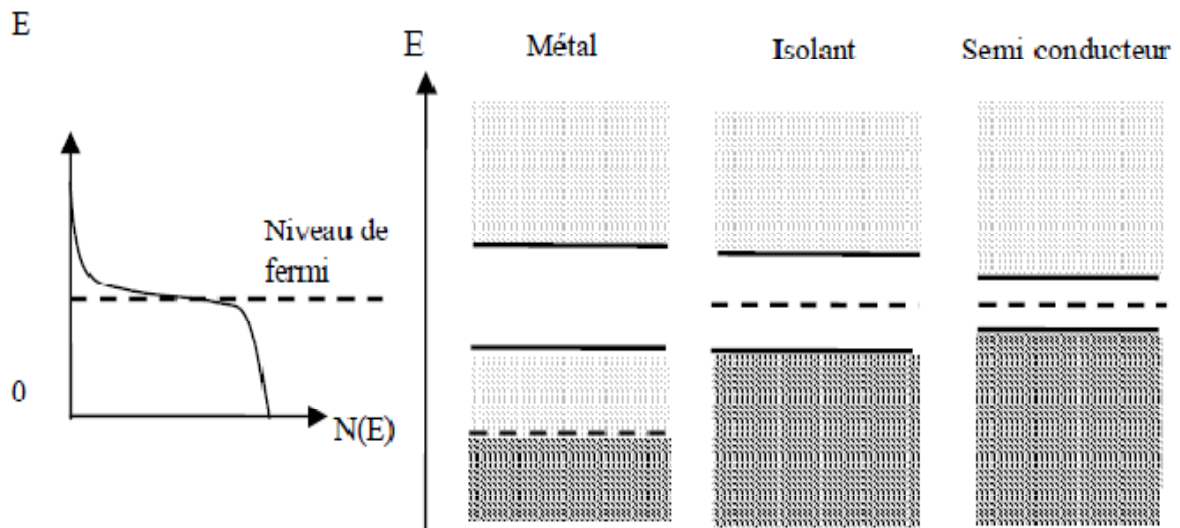


Figure I.6 : Les différents matériaux : représentation de leurs bandes d'énergies [55].

Pour le cas des solides réels, les matériaux peuvent contenir de multiples défauts qu'ils soient structuraux (grains, joints de grain), cristallographiques (dislocations, lacunes, interstitiels, ...), ou chimiques (impuretés). Ces défauts ont nécessité un ajustement de la théorie des bandes pour le cas des solides réels. En effet, ils peuvent être à l'origine d'états d'énergie compris dans la bande interdite. Ces états d'énergie sont disponibles sous 2 formes dans la bande interdite (**Figure I.7**) :

- Lorsque les états d'énergie créés par des défauts et situés dans la bande interdite sont suffisamment nombreux pour que leurs orbitales électroniques se recoupent, ils forment une bande d'énergie étroite. Cette bande d'énergie, appelée « bande d'impuretés », est située au sein de la bande interdite et fonctionne globalement comme une bande d'énergie à part entière.
- Lorsqu'ils ne sont pas en nombre suffisant pour créer cette bande, on parle d'états localisés. Ces bandes ou états localisés ne sont pas dépendants de leur énergie (si ce n'est qu'ils sont compris dans la bande interdite). Ils dépendent uniquement de la densité des états.

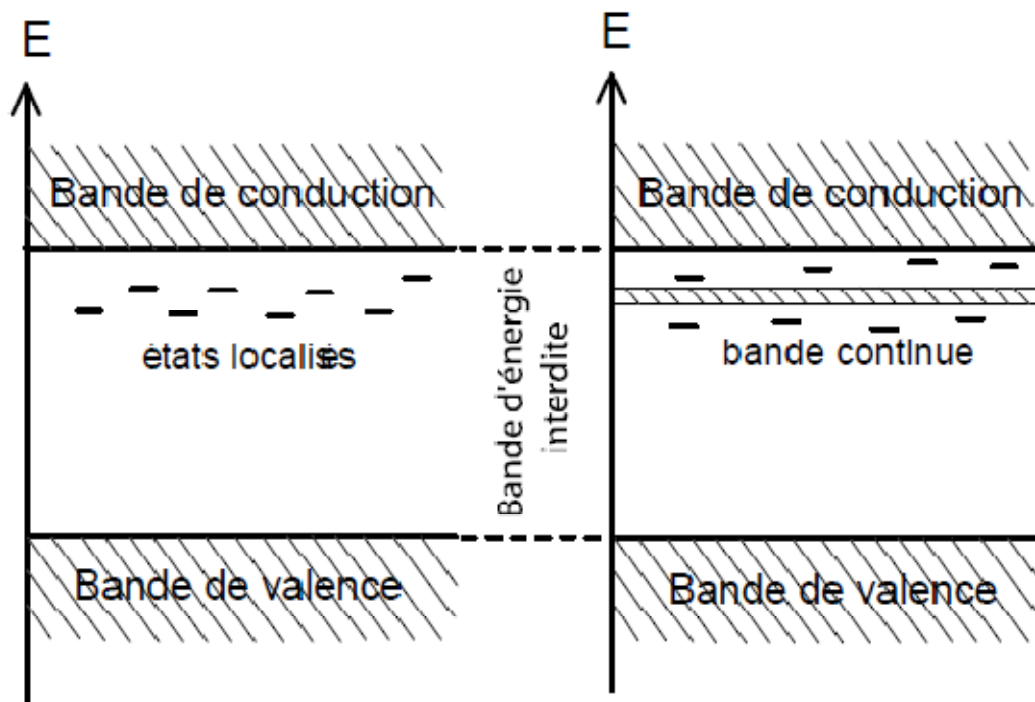


Figure I.7 : Schématisation de la présence d'état localisés (à gauche) ou d'une bande continue de conduction au sein de la bande d'énergie interdite [55].

Les polymères sont des isolants possédant généralement une bande interdite très large (6 à 8eV). Vue leur structure semi cristalline, ou amorphe, la notions de bandes séparées disparaît, puisque des états électroniques existent à tous les niveaux d'énergie. Ainsi pour les polymères des états localisés, appelés états d'Anderson, sont introduits au voisinage de la bande de valence et la bande de conduction [55-57] (**Figure I.8**).

Il faut distinguer deux types d'états localisés [57] :

- les sites peu profonds, qui sont dus au désordre physique (distorsion de la maille cristallographique). Ces niveaux d'énergie sont proches des bandes de valence ou de conduction, et les porteurs de charges (électrons et trous) ayant acquis une faible énergie peuvent se mouvoir en « sautant » de site en site.

- Les sites profonds, dus au désordre chimique. Ce sont des états isolés dans la bande interdite, dans lesquels les charges peuvent se piéger durablement. Ces niveaux d'énergie sont appelés pièges profonds, et ils participent peu au transport de charges.

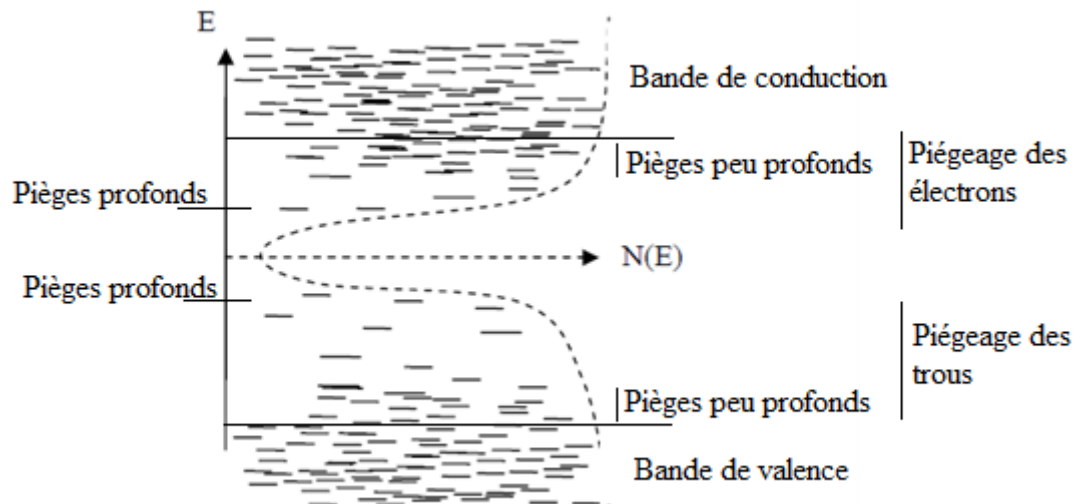


Figure I.8 : Diagramme de bande d'énergie pour le cas des matériaux polymères semi cristallins [53].

La conduction est dite ohmique si la vitesse d'injection de charges est égale à leur vitesse de déplacement dans le volume, il n'y a pas d'accumulation des charges au voisinage de l'interface. Ce type de conduction se produit lorsque le champ est faible. En champ relativement élevé, la conduction est limitée par charge d'espace où la dynamique de piégeage-dépiégeage contrôle l'écoulement des charges [58, 59]. Un traitement détaillé du phénomène de conduction est donné par *Segui* [59].

I.3 Mécanismes d'apparition de charge :

Plusieurs mécanismes physiques différents sont couramment responsables de la création de charges dans les matériaux diélectriques en particulier: l'effet couronne [60, 61], assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique (regroupant la charge par contact et la charge par frottement), impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact.

I.3.1 Phénomènes d'électrisation

I.3.1.1 Electrisation par frottement (triboélectricité)

La triboélectricité est un mot qui vient du grec « *tribein* » et qui signifie frotté. Le frottement peut être défini comme étant l'action qui tend à s'opposer au déplacement relatif de deux solides en contact [62].

La triboélectricité désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux différents sont mis en contact (**Figure I.9**). Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l’un à l’autre, il se produit un transfert de charges au niveau surfacique de l’un vers l’autre, dans un même sens. Ce processus utilise la différence de structure électronique des deux surfaces en fonction desquelles une des particules devient chargée positivement et l’autre chargée négativement [63, 64].

Si l’un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation. La charge transférée augmente généralement avec la pression entre les deux matériaux en contact, la surface du contact, ainsi qu’avec la vitesse du frottement. Elle diminue avec la rugosité des surfaces de contact [58, 65-67].

L’effet triboélectrique est en général associé à l’apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s’étend souvent au transfert de charges par contact, le frottement étant l’équivalent de contacts suivi de séparations, mais s’accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse [21]. La reproductibilité de la charge à obtenir par ce mécanisme est très difficile.

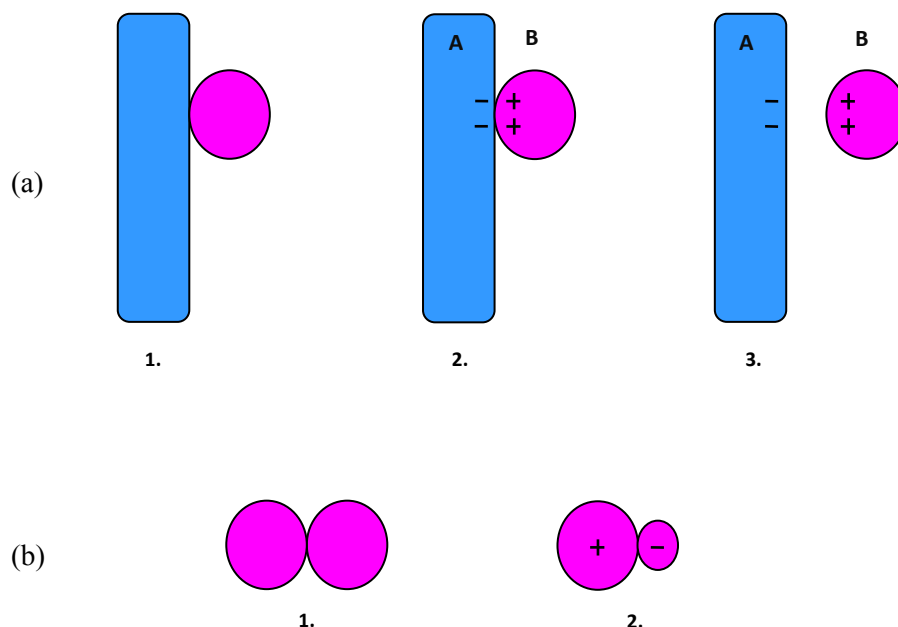


Figure I.9 : L’effet triboélectrique et l’échange de la charge électrique entre deux surfaces:
 (a) : 1. Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3. Après la séparation, la surface A a la tendance de se charger négativement, et la particule B positivement, (b) : 1. Deux particules neutres de même taille en contact ; 2. Les particules grandes ont la tendance de se charger positivement et les petites négativement.

I.3.1.2 Electrification par contact (transfert de charges)

L’électrification par contact est le processus par lequel deux matériaux dissemblables sont touchés ensemble, puis séparés [68], ce qui provoque le chargement de matériau neutre par un déplacement d’électron ou d’ions positifs (trous) [69, 70] ; c’est le phénomène de «l’électrification par contact».

Lorsqu’un corps négatif touche un corps neutre, des électrons peuvent passer sur le corps neutre qui devient ainsi négatif. Lorsqu’un corps positif touche un corps neutre, il attire des électrons du corps neutre qui devient alors positif (**Figure I.10**).

Le sujet tombe naturellement en trois divisions: l’électrification des métaux par les métaux; d’isolants par des métaux; et des isolateurs par des isolants. Le premier d’entre eux est bien compris; le transfert de charges entre métaux est de nature à faire coïncider les deux niveaux de Fermi. La deuxième division, l’électrification des isolants par les métaux, principalement en raison du manque de connaissances sur les états électroniques pertinents dans les isolants. Pour l’électrification des isolants par les isolants, il semblerait que la compréhension du cas métal / isolant peut conduire à une compréhension du cas isolant / isolant.

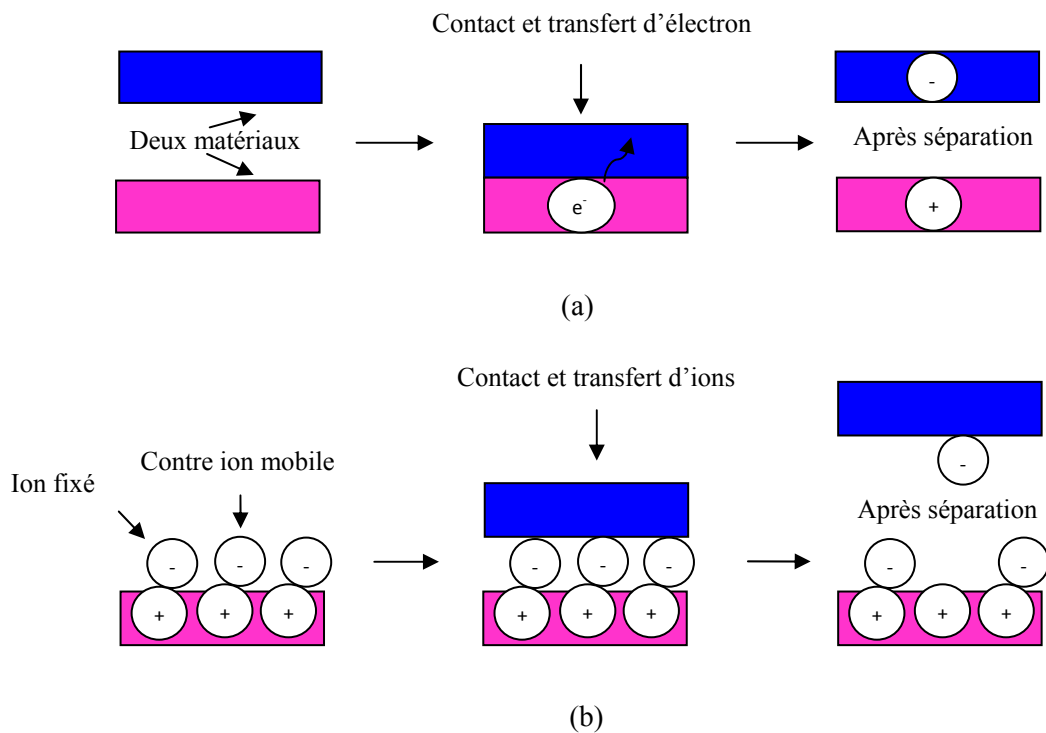


Figure I.10 : Mécanismes possibles de transfert de charge : (a) Transfert d’électrons, (b) Transfert d’ions.

I.3.1.3 Electrification par influence

L’électrification par influence résulte d’une redistribution de la charge électrique dans un objet, causée par l’influence de charges proches. En présence d’un corps chargé, un conducteur isolé développe une charge positive à une extrémité et une charge négative à l’autre extrémité [71].

Les phénomènes d’influence sont basés sur la propriété selon laquelle les charges de même signe se repoussent et de signe contraire s’attirent.

Considérons (**Figure I.11 (a)**) un corps conducteur « A » électrisé et de charge positive. Approchons de « A » un corps conducteur neutre « B », tenu par l’intermédiaire d’un manchon isolant. Les électrons libres de B sont attirés par la charge positive de A. Il en résulte l’apparition de charges négatives sur la partie la plus rapprochée de A et de charges positives sur la partie la plus éloignée. Il y a donc sur B deux régions portant des charges de signe contraire : nous avons électrisé B par influence. Ce type d’électrification dure tant que l’on maintient A à proximité de B, la charge totale du corps B restant nulle.

Si B n’est plus isolée de la terre (**Figure I.11 (b)**) mais relié à la terre, la présence de A va encore influencer les charges électrostatiques de B, mais, cette fois, les charges positives apparues dans la partie de B la plus éloignées de A disparaîtront car elles seront compensées par des électrons venus de la terre. Si l’on coupe brusquement le lien entre la boule B et la terre, on obtient alors un corps chargé par influence.

Dans tous les cas, la charge induite dans B est plus petite que la charge de A. Pour qu’elle soit égale, il faudrait que A englobe entièrement B et qu’il y ait influence totale (**Figure I.11 (c)**)

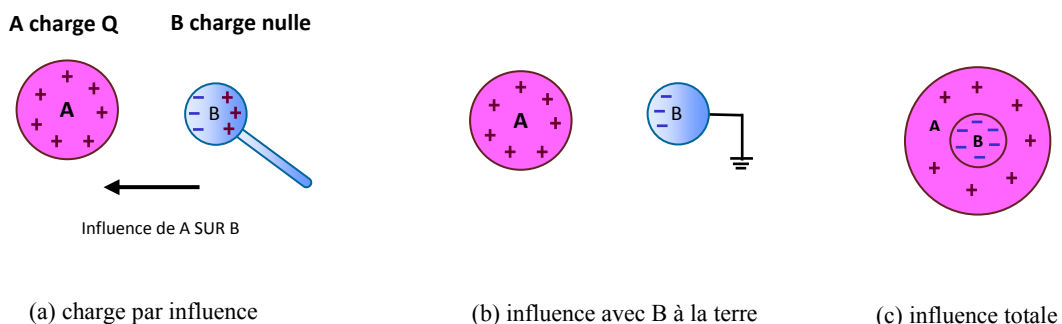


Figure I.11 : Electrification par influence.

I.3.1.4 Piézoélectricité

Le terme piézoélectricité nous vient du grec « piézein » signifiant presser ou appuyer. Ainsi le terme piézoélectricité désigne la propriété que présente certains corps de se polariser électriquement — soit de générer un champ ou un potentiel électrique — sous l'action d'une contrainte mécanique. On parle d'effet piézoélectrique direct. Car l'effet piézoélectrique inverse est également observé. Une tension électrique appliquée à un matériau présentant des propriétés piézoélectriques entraîne une modification des dimensions de ce matériau [72].

I.3.2 Chargement par décharge couronne :

Les décharges couronnes, également appelées décharges à effet corona, apparaissent généralement à pression atmosphérique [73].

On peut définir la décharge couronne comme une décharge électrique autoentretenue non destructive dans un gaz, qui peut apparaître entre deux électrodes asymétriques, dont l'une à un faible rayon de courbure reliée à une haute tension, appelée « électrode active », et l'autre électrode, généralement plane, et reliée à la terre, appelée « électrode passive ». La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes qui comporte deux zones : une zone active (zone d'ionisation) et une zone de dérive (**Figure I.12**).

Au voisinage de l'électrode à faible rayon de courbure (zone active ou zone ionisée) le champ est suffisamment élevé, ainsi une ionisation du gaz se produit et les phénomènes d'avalanche sont limités dans l'espace par la décroissance du champ électrique. Autour de cette zone on retrouve la zone de dérive ou unipolaire où les ions du même signe que l'électrode à faible rayon de courbure dérivent jusqu'à l'autre électrode.

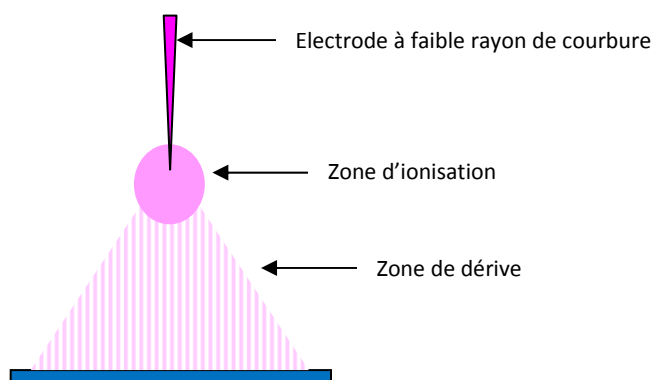


Figure I.12 : Zones d'ionisation et de dérive dans la décharge couronne.

L’intérêt porté à la décharge couronne à de multiples motivations [74] : il peut être lié par exemple à l’étude des phénomènes précurseurs au développement de l’arc, à la possibilité de charger des particules dans un gaz (pour la précipitation électrostatique par exemple), et même à la neutralisation des charges indésirables à la surface des matériaux diélectriques. Selon la polarité de la haute tension appliquée à l’électrode de faible rayon de courbure, la décharge couronne peut être positive, négative ou alternative [75].

I.3.2.1 Décharge couronne positive :

On appelle décharge couronne positive le cas où une électrode de faible rayon de courbure est reliée à une haute tension positive et la plaque reliée à la terre. Dans ce cas, dans la région d’ionisation autour de la pointe, les collisions non-élastiques entre les électrons et les molécules neutres du gaz produisent des paires électron-ion positif [76]. Les électrons produits sont accélérés vers l’anode (électrode de pointe) tandis que les ions positifs sont repoussés par l’anode, sous l’effet des forces de Coulomb, jusqu’à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ne permet plus la création d’ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (électrode de masse) (**Figure I.13**). Cette zone unipolaire, puisqu’il n’y a que des ions positifs [77], est appelée région de dérive.

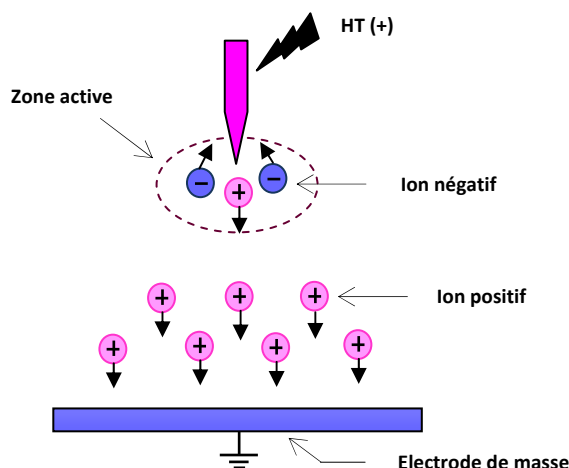


Figure I.13 : Principe de décharge couronne pointe – plan, polarité positive continue.

I.3.2.2 Décharge couronne négative :

Dans le cas où l’électrode de pointe est reliée à une haute tension négative, la création des électrons commence toujours dans la région d’ionisation concentrée près de l’électrode de champ élevé (cathode dans ce cas) comme la décharge couronne positive.

La décharge couronne négative est caractérisée par la présence d’impulsions dans la forme du courant. Ce régime est appelé couronne d’impulsion Trichel (couronne de conduction unipolaires) d’après **G. W. Trichel** [78] qui a étudié ce phénomène pour la première fois. Il est caractérisé par une courte durée (100-200 ns) des impulsions de courant (amplitude de ~ 1 mA) avec un taux de répétition élevé, une luminosité autour de l’extrémité de l’électrode active et un espace inter-électrodes sombre (zone de dérive). Le taux de répétition des impulsions de courant augmente de manière linéaire avec la valeur moyenne du courant et se situe au-dessus de 1 à 1000 kHz [79]. Seule la partie du courant de la zone de dérive est portée par des électrons (en dessous de 10-20 μ A de courant total), en raison de la fixation d’électrons (dans les gaz électronégatifs).

A des courants plus élevés, les charges spatiales rendent la distribution du champ électrique plus uniforme. La couronne d’impulsion Trichel est suivie par une couronne luminescente négative « moins d’impulsions » lorsque la tension appliquée augmente. Dans l’air statique, si la tension augmente progressivement, cette couronne « moins d’impulsions » stables se transforme directement en une décharge d’étincelle [80]. La **Figure I.14** représente le principe de décharge couronne négative.

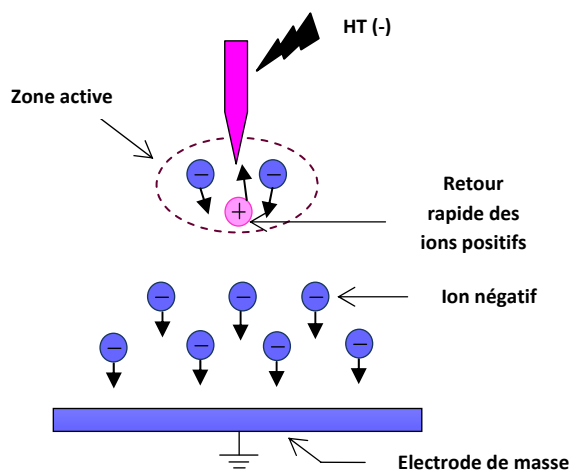


Figure I.14 : Principe de décharge couronne pointe – plan, polarité négative continue.

I.3.2.3 Décharge couronne alternative

A la place d’une haute tension continue appliquée à l’électrode de pointe, on peut appliquer une haute tension sinusoïdale à valeur moyenne nulle. Dans ce cas, le comportement du système dépend de la distance inter-électrode « d » et de la fréquence de l’alimentation électrique « f ».

La dérive d'ions à travers l'espace inter-électrodes prend un temps fini de l'ordre de $\tau_i \approx d/\mu_i E$ et régit l'établissement d'une couronne à courant continu unipolaire positif ou négatif. Si $\tau_i > T/2$ où $T = 1/f$ est la période de temps, les ions formés au cours de la demi-période précédente sont piégés dans la majeure partie de l'intervalle, par un champ électrique de sens opposé dans la demi-période suivante. La même situation se produit avec des ions négatifs aussi. Cela signifie que la région de dérive d'une couronne AC est remplie d'ions du signe opposé qui tendent à diminuer la charge d'espace résultante dans la région de dérive et qui sont soumis à une recombinaison volumique [81].

Dans le cas d'une décharge couronne alternative, le courant de décharge présente trois composantes [80] :

- le courant capacitif dû à l'espace inter-électrodes qui jouent le rôle d'un condensateur ;
- le courant synchrone, continu et en phase avec la tension appliquée ;
- le courant impulsionnel, somme des impulsions « streamers » pour les alternances positives et des impulsions de « Trichel » lors des alternances négatives.

On peut aussi utiliser des décharges couronnes pulsées. Elles consistent à appliquer des pics (des impulsions) de forte tension mais pendant un très court instant ($< 1 \mu s$) pour limiter le passage à l'arc. Dans ce cas, la valeur moyenne de la tension n'est pas nulle [82].

I.4 Techniques de neutralisation des charges de surface

En général, les procédures de neutralisation de charge électrique peuvent être classées en deux catégories : les techniques d'évacuation et les techniques basées sur la recombinaison. Le principe des techniques d'évacuation consiste à évacuer vers la terre les charges non désirées accumulées. Cela comprend la mise à la terre des parties conductrices, le blindage et la modification de la conductivité de surface par l'ajout d'un autre matériau. Ces méthodes constituent un moyen simple d'empêcher l'apparition de charges électrostatiques mais elles sont souvent inappropriées.

De l'autre côté, les techniques basées sur la recombinaison consistent à créer des charges de polarité opposée à celles à éliminer. De cette façon, les charges positives et négatives se recombineront et seront ainsi neutralisées. Dans ce cas, l'équilibre entre la quantité de charges opposées et celles à éliminer doit être assuré. Sinon, il y aura un manque d'élimination des charges ou, le cas inverse, une recharge du matériel. Cette classe de techniques utilise souvent un ioniseur basé sur une décharge couronne pour générer les

charges opposées, ce qui rend la fonction de neutralisation tributaire des caractéristiques de la décharge et des conditions ambiantes. En plus de la libération de l’ozone, la décharge couronne peut évoluer en un arc électrique si un paramètre est soudainement modifié, ce qui peut endommager le matériau ou provoquer des incidents plus graves.

I.4.1 Neutralisation passive par décharge inverse

Le principe de la technique consiste à installer une électrode pointue, isolée de toute tension, au-dessus de la surface chargée. Ainsi, des charges de signe contraire sont créées par influence électrostatique sur l’électrode passive lorsqu’on s’approche d’une surface chargée. Les ions créés sont attirés par la surface chargée sous l’effet du champ électrique où les charges de signe contraire seront neutralisées par recombinaison et les charges de même signe seront repoussées. L’avantage du dispositif par rapport à la neutralisation active est qu’il ne nécessite pas d’alimentation électrique, ne provoque pas de chocs électriques lorsque l’électrode est touchée et ne présente aucun risque d’inflammation de gaz ou de vapeurs combustibles. Les neutralisants passifs sous la forme de «peignes statiques» ou de fils de métal enveloppés de clinquant métallique sont faciles à construire et relativement peu coûteux. Cependant, ils ont aussi leurs inconvénients. Ils ne sont efficaces que tant que le champ électrique à leurs points ne tombe pas en dessous d’environ 3MV / m. Comme la charge indésirable est diminuée par les décharges couronnes du neutraliseur, le champ au niveau de la pointe est réduit au-dessous de la valeur critique de rupture entraînant une cessation des décharges et la neutralisation de la charge indésirable. Cela signifie que les neutraliseurs passifs ne peuvent que réduire la charge indésirable d’un niveau élevé à un niveau bas sans l’éliminer complètement.

I.4.2 Mise à la terre des corps isolants

Le principe de la mise à la terre est généralement appliqué sur des corps métalliques. Cependant, compte tenu de la différence de potentiel entre le corps isolant chargé et la terre, une liaison directe pourrait entraîner la décharge du corps à travers l’évacuation de la charge grâce au potentiel appliqué.

Des essais ont été menés par *Kodama et al.* [83] afin de développer des éliminateurs électrostatiques de type passif sans alimentation pour empêcher les explosions de poussière causées par les décharges électrostatiques dans un silo lors du chargement de particules dans un système de transport pneumatique. Les résultats obtenus montrent que l’éliminateur de

type passif constitué d'ioniseurs de type buse sans alimentation électrique montée sur un tuyau court en PVC pourrait réduire la charge statique sur les pellets pour éviter des décharges de surface incendiaires à l'intérieur du silo dans les conditions expérimentales, sauf dans des conditions d'humidité relative supérieures à 50%.

I.4.3 Neutralisation par décharge couronne

Dans la littérature, plusieurs types de configurations d'électrodes sont utilisés parmi eux la configuration de type double et la configuration de type triode.

Plusieurs travaux ont été menés sur la décharge couronne de type double, *Kachi et al.* [84] ont caractérisé la décharge couronne générée par un électrode fil haute tension face à une plaque mise à la terre en présence de matériaux diélectriques de différentes formes: films, granules et supports non tissés. Les mesures montrent que la tension d'initiation de la décharge couronne et l'aspect des caractéristiques courant-tension dépendent à la fois de la forme et de l'épaisseur du matériau.

Le même auteur et ces collègues [85] menant des études du processus de neutralisation de matériaux granulaires isolants chargés en utilisant une décharge couronne DC, montrent que la tension continue appliquée à une électrode double couronne est une solution efficace, simple et économique puisqu'elle ne nécessite pas d'alimentation à très haute tension, ainsi que la neutralisation optimale de la couche granulaire est obtenue lorsque la tension de l'électrode couronne est ajustée à une valeur égale à la somme du niveau de début de la décharge et de la tension de la plaque qui porte la couche granulaire.

D'autres expériences réalisées par le même auteur *Kachi* et ces collègues [86] montrent que la neutralisation multiple à l'aide d'une décharge couronne de type double permet l'obtention d'une meilleure élimination possible de la charge statique. Ce passage multiple permet au matériau d'être exposé à une quantité plus grande de charges générées par la décharge, se traduisant ainsi par une meilleure neutralisation.

Par ailleurs, plusieurs études récentes ont été consacrées à la neutralisation des charges électrostatiques par décharge couronne de types triode.

- **Principe de fonctionnement d’une décharge couronne de type triode**

Le principe de fonctionnement du système triode est basé sur l’insertion d’une grille métalliques entres les deux électrodes (l’électrode active et le plan de masse), qui peut être portée à une tension ou reliée à la masse.

En effet, les charges produites durant la phase d’ionisation de l’air dans la zone active sont accélérées sous l’action du champ électrique vers l’électrode de masse, alors qu’une partie de ces ions traverse les pores de la grille.

La grille métallique crée une zone de champ électrique nul entre la grille et la plaque mise à la terre, de sorte que seul le champ électrique provenant de la charge de surface du diélectrique dominera cette région. En conséquence, les charges passant à travers la grille seront sélectionnées (imposées) par la surface chargée (champ électrique dû à la charge de surface du diélectrique). Les charges de même signe que la surface chargée sont repoussées et les charges de signe opposées sont attirées par la force de Coulomb (**Figure I.15**).

Les charges qui traversent les pores de la grille viennent se déposer sur la surface chargée et seront neutralisées par les charges de surface suite à leur recombinaison jusqu’à la neutralisation complète des charges de surfaces. À partir de ce moment-là, le champ entre la grille et la surface du diélectrique devient nul.

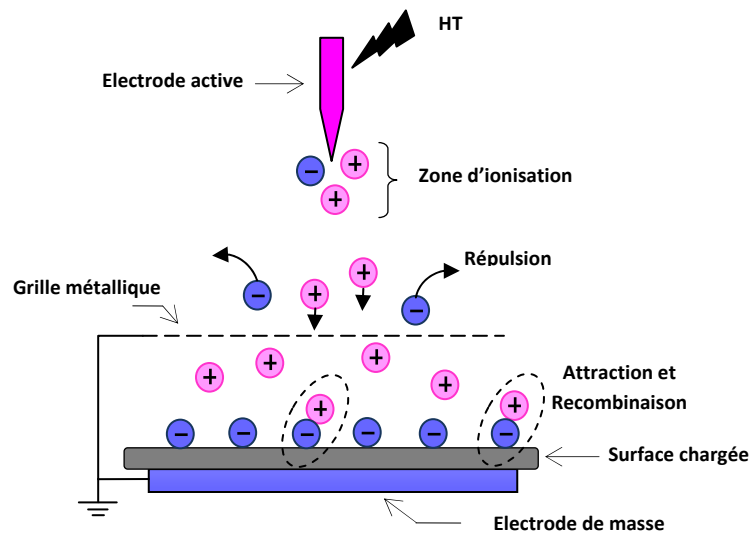


Figure I.15 : Principe de neutralisation par décharge couronne de type triode.

Des études réalisées par *Kachi* et ces collègues [7] sur la décharge couronne de type triode ont montré que cette technique peut constituer une solution efficace uniquement

lorsque les granules à neutraliser peuvent être exposés suffisamment longtemps à l'action de la décharge.

I.5 La décharge à barrière diélectrique

Les décharges à barrière diélectrique sont appelées aussi décharges silencieuses (*Silentdischarge*). Le nom de décharge silencieuse est proposé en 1860 par **Andrews** et **Tait** [87]. Les décharges à barrière diélectrique sont connues depuis le milieu du XIXe siècle suite à l’invention de l’ozoneur par **Siemens** en 1857 [88] (**Figure I.16**). Jusqu’aux dernières décennies, l’application industrielle principale de ces décharges est restée la production d’ozone, puis d’autres applications sont apparues comme la modification de surface, l’excitation laser (laser CO₂),...etc.

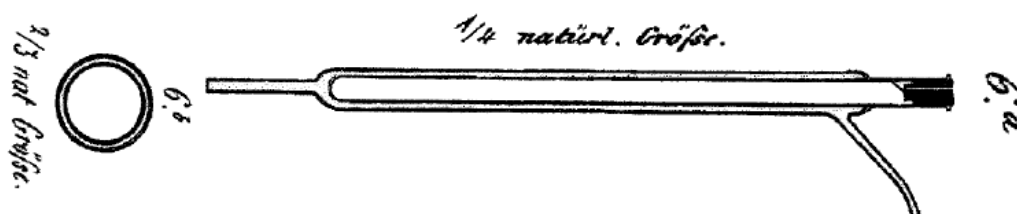


Figure I.16 : Tube à décharge utilisé par W. Siemens en 1857 comme ozonateur [88].

Une décharge à barrière diélectrique est un plasma froid hors-équilibre thermodynamique produit à la pression atmosphérique entre deux électrodes séparées par au moins un diélectrique.

L’ajout d’un diélectrique entre les électrodes métalliques permet d’augmenter le champ électrique sans passage à l’arc [89]. Ce plasma faiblement ionisé ($n_e = 10^9\text{-}10^{11} \text{ cm}^{-3}$) est caractérisé par une température électronique de quelques électron-volts (eV) bien supérieure à celle des espèces neutres ($\sim 300 \text{ K}$) qui sont majoritaires [90].

A cause de la présence des diélectriques qui, une fois polarisés, bloque le champ électrique, les DBD ne peuvent fonctionner qu’avec une alimentation alternative ou pulsée. La fréquence de travail (période du signal sinusoïdal, triangulaire, ... ou la fréquence de répétition des pulses) doit être adaptée à l’application.

I.5.1 Type de DBD

Il existe différentes configurations de décharge à barrière diélectrique qui peuvent être catégorisés en deux groupes principaux [91, 92] : les décharges volumiques et les décharges surfacique [93].

I.5.1.1 Décharge volumique

Pour la décharge volumique le plasma traverse un intervalle gazeux entre deux surfaces séparées par un gaz. La **Figure I.17** montre une configuration qui permet de générer cette décharge.

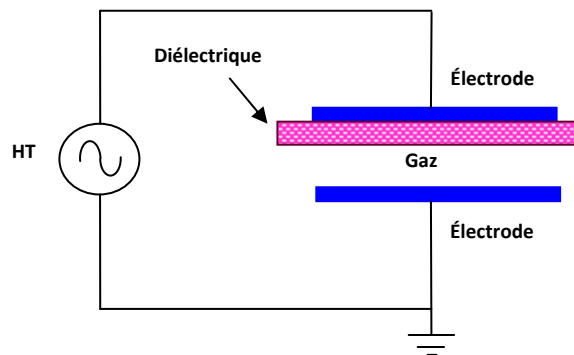


Figure I.17 : Configuration classique d’une DBD.

I.5.1.1.1 Principe de fonctionnement

Suite à l’application d’une tension suffisamment élevée sur les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d’un canal conducteur appelé micro-décharge (**Figure I.18 (a)**). Cette micro-décharge peut être représentée par le schéma équivalent de la **Figure I.18 (d)**. Le diélectrique en vis-à-vis de la micro-décharge se comporte comme l’isolant d’un condensateur C_{ds} , dont les armatures sont d’un côté la décharge et de l’autre l’électrode. Notons que ce schéma équivalent n’a de sens que si l’on considère uniquement une seule micro-décharge ou une décharge homogène sur toute la surface des électrodes [94]. Par la suite, nous noterons V_a la tension appliquée sur la cellule de décharge, V_g la tension aux bornes du gaz et enfin V_{ds} la tension aux bornes du diélectrique.

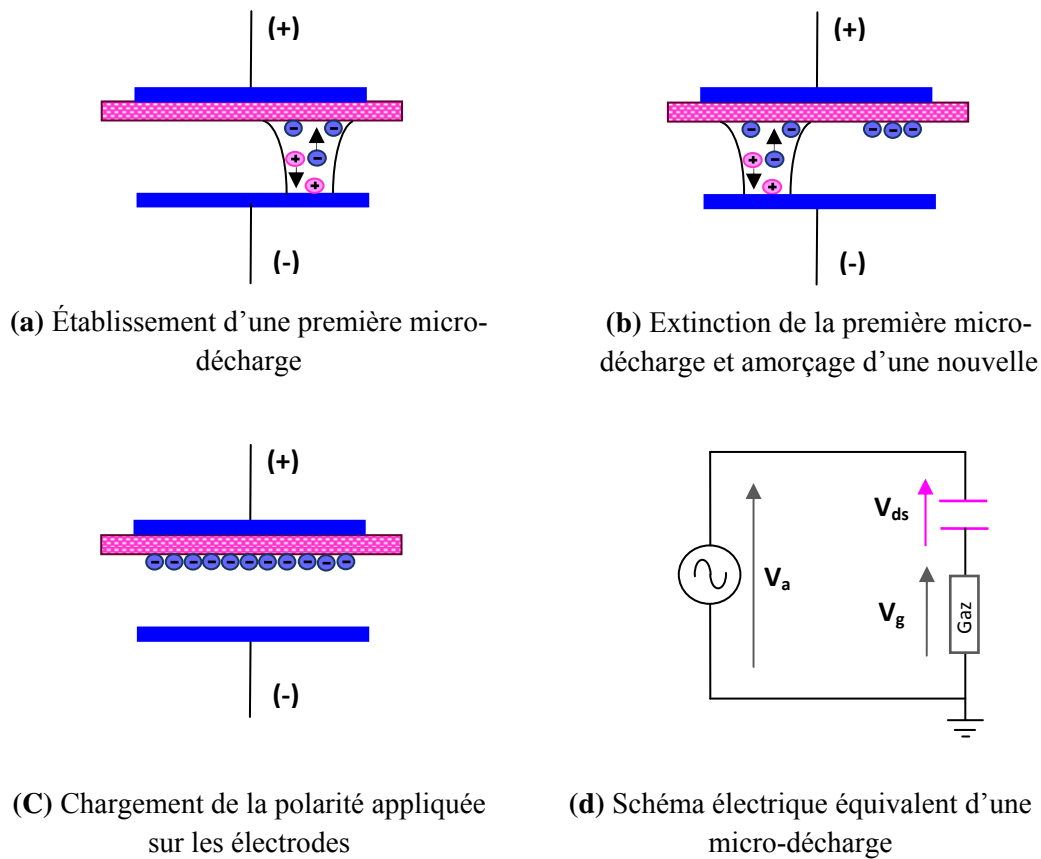


Figure I.18 : Principe de fonctionnement d’une DBD.

Le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface du diélectrique solide en vis-à-vis du canal de décharge, qui se traduit par une augmentation de la tension V_{ds} . Si l’augmentation de cette tension au fur et à mesure du développement de la décharge est plus rapide que l’augmentation de la tension V_a , elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz V_g , ce qui conduit à l’extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d’avoir atteint un degré d’ionisation suffisant pour transiter en régime d’arc.

Tant que la tension appliquée augmente, des micro-décharges s’initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées (**Figure I.18 (b)**). Au changement de polarité (**Figure I.18 (c)**), les charges précédemment déposées sur le diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la première alternance : $V_g = V_a - V_{ds}$ (avec V_a et V_{ds} de signes contraires lors du changement de polarité).

La fonction essentielle du diélectrique est de limiter la charge déposée sur les électrodes et par conséquent le courant transitant dans le canal afin que la décharge ne devienne par un arc comme cela peut arriver entre deux électrodes métalliques à pression atmosphérique. De plus, l’utilisation du diélectrique a également pour conséquence de tendre vers une répartition plus uniforme des micro-décharges sur toute la surface des diélectriques [95].

I.5.1.1.2 Configuration de DBD volumique

Les décharges à barrière diélectrique peuvent être créées dans des types de géométries très différents, à condition qu’il y ait au moins une barrière diélectrique (isolant) entre les deux électrodes. Les géométries les plus courantes utilisées pour la décharge volumique sont les décharges plan-plan, fil-fil, cylindre-cylindre concentrique (**Figure I.19**).

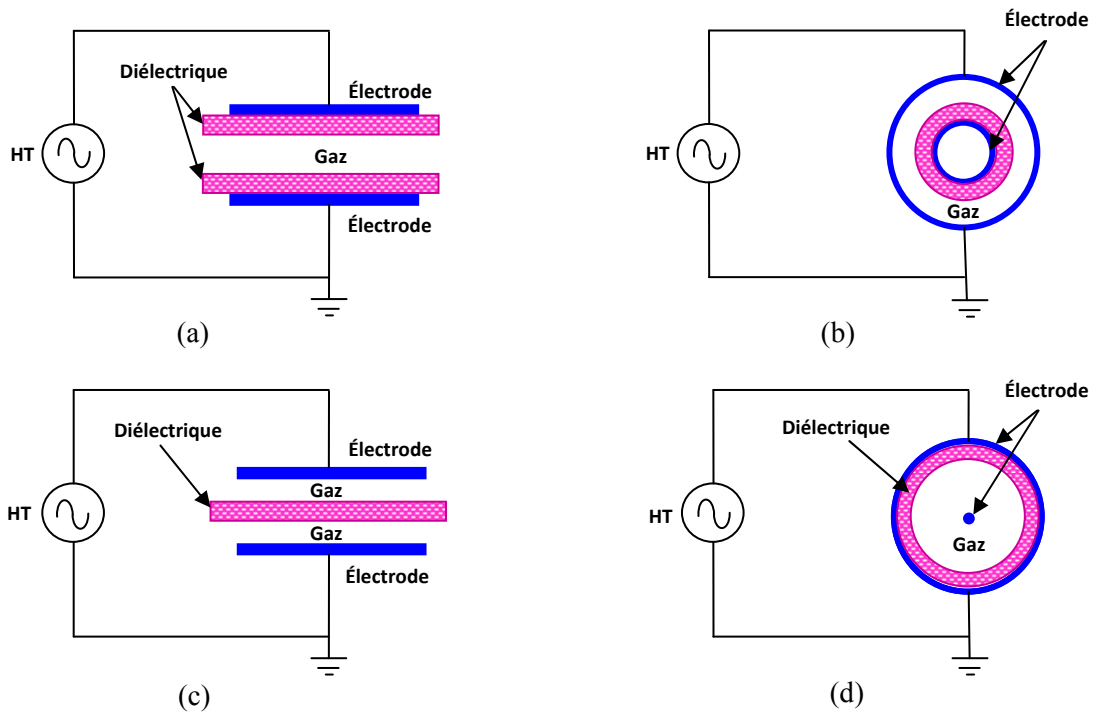


Figure I.19 : Différentes configurations d’une Décharge à Barrière Diélectrique volumique.

I.5.1.1.3 Différents régimes de DBD

Les régimes de décharge observés dans le cas des DBD volumiques à pression atmosphérique sont principalement le régime filamentaire de type streamer et le régime homogène (luminescent), dépendant principalement de la configuration de l’électrode, de la tension, de la pression ou du gaz utilisé.

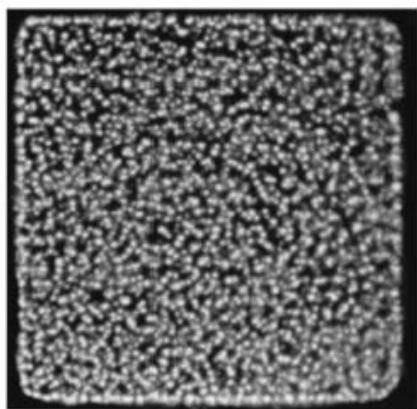
- **Régime filamentaire**

La décharge filamentaire est le premier mode de décharge à barrière diélectrique découvert [96] et constitue le régime dominant des DBD. Il est caractérisé par une multitude de micro-décharges (filaments ou streamers) de courte durée, de faible dimension ($\sim 100 \mu\text{m}$), distribués de façon aléatoire dans l’espace inter-électrodes et leur distribution spatiale et temporelle n'est pas reproductible d'une période de décharge à l'autre, c'est donc un régime non uniforme [90]. Leurs caractéristiques sont données dans le **Tableau I.3**.

Tableau I.3 : Ordres de grandeur des caractéristiques d’un canal de décharge filamentaire [97, 98].

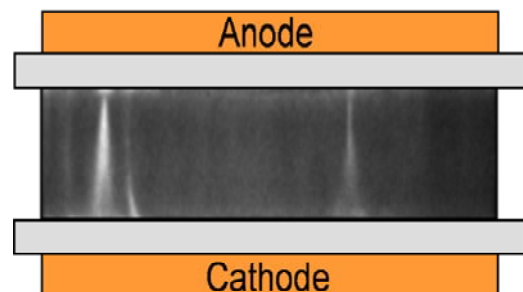
Durée	1 – 10 (ns)
Vitesse de propagation	$10^8 \text{ (cm.s}^{-1}\text{)}$
Rayon d’un filament	100 – 200 μm
Densité de courant	100 – 1000 (A.cm^{-2})
Densité électronique	$10^{14} - 10^{15} \text{ (cm}^{-3}\text{)}$
Énergie électronique moyenne	1 – 10 (eV)

La **Figure I.20** présente une photographie de l’espace inter-électrodes de la vue de haut et de côté présentant la présence des micro-décharges.



End-on view of microdischarges in a 1 mm gap with atmospheric-pressure dry air (original size: 6 cm x 6 cm, exposure time: 20 ms)

(a) vue de haut



(b) vue de coté

Figure I.20 : Décharges à barrière diélectrique obtenues à pression atmosphérique [99].

Le courant de décharge est caractérisé par de nombreux pics apparaissant à chaque alternance de la tension, chaque impulsion du courant à une durée moyenne de quelques dizaines de nanosecondes (**Figure I.21**). Cependant, sous certaines conditions, la décharge peut devenir homogène, c'est le régime appelé *APGD* (*Atmospheric pressure Glow Discharge*) qui permet des traitements plus homogènes que ceux obtenus par DBD [100].

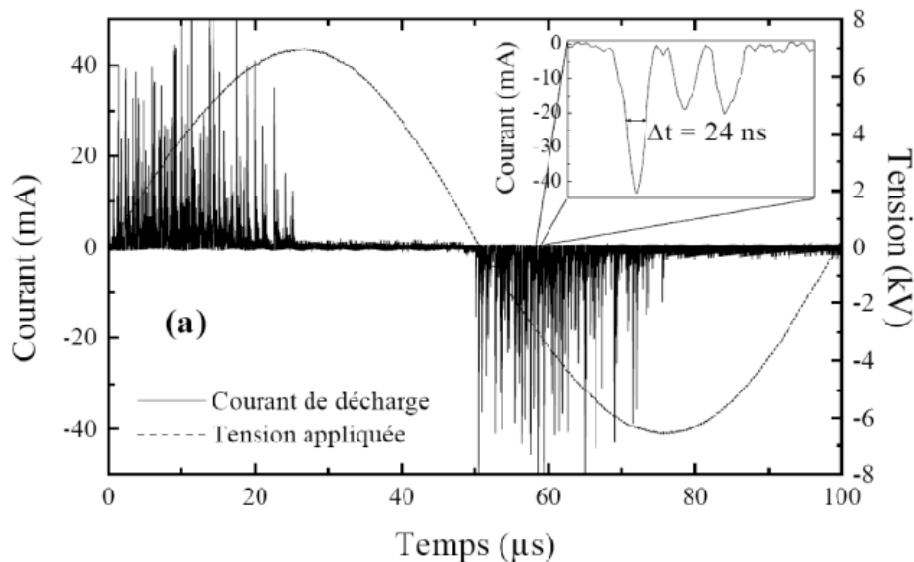


Figure I.21 : Oscillogramme d’une décharge filamentaire à 10 kHz [101].

On peut observer macroscopiquement, un phénomène de répulsion des filaments entre eux. La densité de micro-décharges est proportionnelle à l'amplitude de la tension appliquée [102].

- **Régime homogène**

Le régime homogène nécessite des conditions particulières. Il est atteint par génération d'une décharge de Townsend (dans l'azote par exemple) ou luminescente (pour les gaz rares). L'aspect filamentaire étant lié à des dépôts de charges ponctuels sur la surface du diélectrique. Un moyen pour accéder à une DBD homogène est de parvenir à une répartition homogène des charges sur la surface.

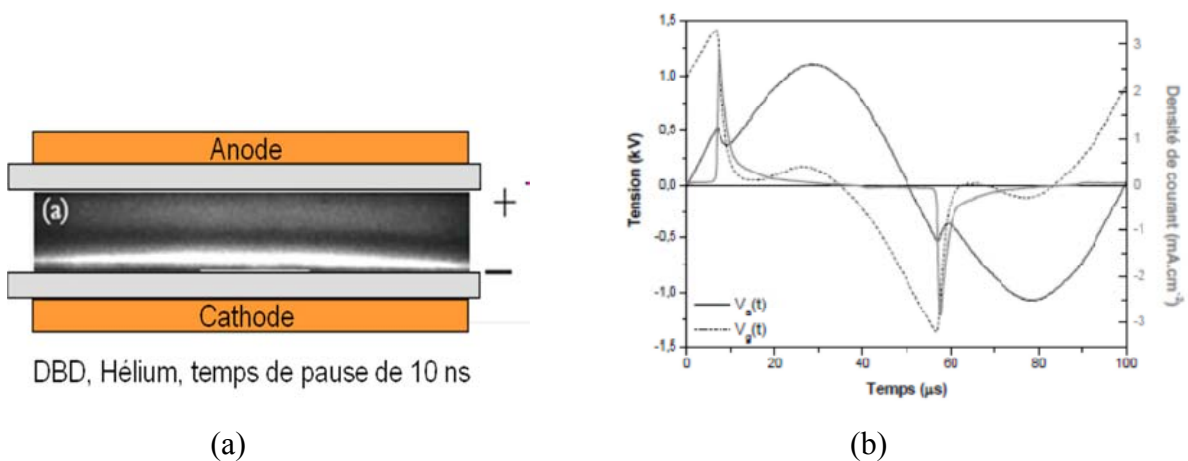
DBD homogène de type Glow (décharge luminescente): La décharge luminescente peut se produire à la pression atmosphérique ou à basse pression. En effet dès 1969, **R. Bartnikas** observait dans une DBD dans l'hélium un régime différent du régime filamentaire classique [103]. Plus récemment, **Okazaki et al.** Montrèrent l'existence d'un régime homogène à la pression atmosphérique, qu'ils appelèrent « luminescent » [104-106]. Elle est caractérisée par

un seul pic de courant par demi-période de la tension, d'une durée de quelques microsecondes. Cette caractéristique intrinsèque de la décharge luminescente suggère un développement unique de la décharge dans tout l'espace inter-électrodes. Les caractéristiques d’une décharge DBD homogène de type Glow sont données dans le **Tableau I.4**.

Tableau I.4 : Ordres de grandeur des caractéristiques du pic de courant de décharge filamenteaire [97, 98].

Durée du pulse	$< \frac{1}{4}$ de période
Densité de courant	10-100 (mA.cm ⁻²)
Densité électronique	10^{10} - 10^{11} (cm ⁻³)
Énergie moyenne électronique	\sim eV
Densité ionique	$\sim 10^{11}$ (cm ⁻³)
Densité des métastables	$\sim 10^{11}$ (cm ⁻³)

La **Figure I.22 (a)** présente une photographie de la vue de côté de l’espace inter-diélectrique dans le cas d’une décharge DBD homogène de type Glow. La caractéristique tension - courant d’une décharge luminescente, comme celle obtenue dans l’hélium, (**Figure I.22 (b)**) permet de mettre en évidence qu’une fois la décharge amorcée, la tension appliquée sur le gaz diminue alors que le courant continue à augmenter.



(a) Photographie rapide de l’espace inter-électrodes [107].

(b) Caractéristiques électriques. Conditions expérimentales ($f = 10$ Hz, $V_a = 2.4 V_{cc}$) [108].

Figure I.22 : Décharge luminescente dans l’hélium à la pression atmosphérique.

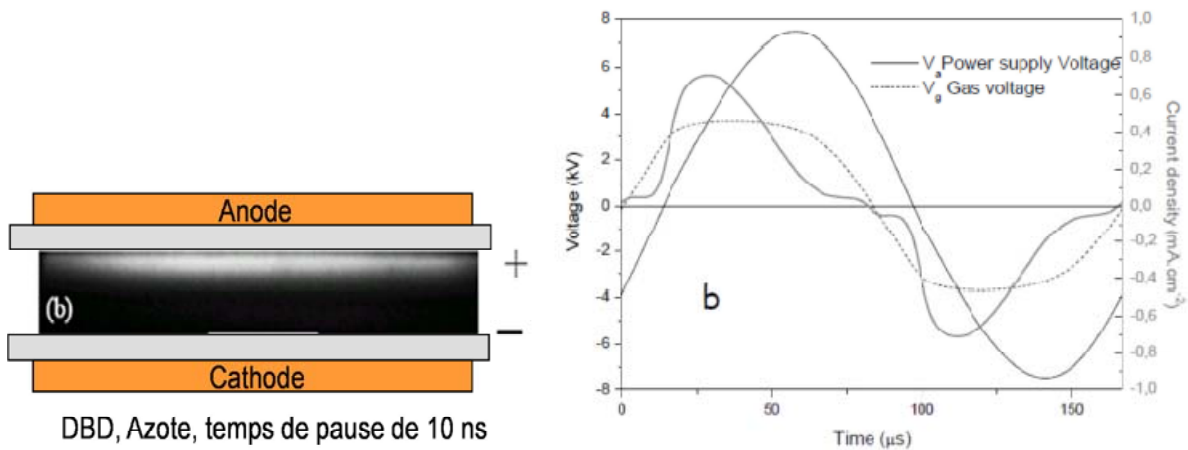
La décharge DBD homogène de type Glow est largement utilisée dans de nombreuses applications telles que le traitement de surface, les sources lumineuses et le revêtement en couche mince. Cependant, il est coûteux de la maintenir à basse pression. En raison de cette limitation, de nombreuses recherches ont été mises en œuvre sur la stabilisation du plasma luminescent à la pression atmosphérique.

DBD homogène de type Townsend: peu de temps après les travaux *d’Okazaki*, des travaux similaires furent réalisés par *Roth et al.* [109, 110] ainsi que par *Massines et al.* [111, 112] montrant l’existence d’un régime homogène à la pression atmosphérique, qu’ils appelèrent « Townsend DBD » [113]. La décharge de Townsend observée dans l’azote et aussi caractérisée par un seul pic par demi-période, mais le pulse de courant qui apparaît à chaque demi période est plus étendu, d’une durée de quelques dizaines de microsecondes. Les caractéristiques de la décharge de Townsend sont données dans le **Tableau I.5**.

Tableau I.5 : Ordres de grandeur des caractéristiques du pic de courant de décharge homogène de type Townsend [97, 98].

Durée du pulse	$< \frac{1}{4}$ de période
Densité de courant	0.1-10 (mA.cm ⁻²)
Densité électronique	10^7 - 10^8 (cm ⁻³)
Énergie moyenne électronique	< 1 eV
Densité ionique	$\sim 10^{10}$ (cm ⁻³)
Densité des métastables	$\sim 10^{13}$ (cm ⁻³)

La **Figure I.23 (a)** présente une photographie de la vue de côté de l’espace inter-diélectrique dans le cas d’une décharge DBD homogène de type Townsend. La **Figure I.23 (b)** présente la caractéristique tension - courant de la décharge homogène de type Townsend observée dans l’azote. À noter que pendant la croissance du courant, la tension aux bornes du gaz reste sensiblement constante.



(a) Photographie rapide de l’espace inter-électrodes [107].

(b) Caractéristiques électriques. Conditions expérimentales [108].

Figure I.23 : Décharge homogène de type Townsend dans l’Azote à la pression atmosphérique.

La décharge, qu’elle soit homogène ou filamentaire, est le siège de nombreux phénomènes parmi lesquels l’un des plus étudiés au sein de l’institut Pprime de l’Université de Poitiers est la production du vent électrique.

I.5.1.2 Décharge surfacique

La décharge à barrière diélectrique surfacique a été mise en évidence pour la première fois fin 1990 aux Etats-Unis par le **Pr. Roth** [114]. **Roth** nomme ce type de décharge «*OAUGDP*» (*One Atmosphere Uniform Glow Discharge Plasma*) car le plasma généré par la décharge surfacique apparaît uniforme à l’œil (il est en fait dans tous les cas composé de nombreux filaments, pour des DBD dans l’air à pression atmosphérique).

Ce genre de décharge est établit entre deux électrodes séparées de part et d’autre par un diélectrique. On l’appelle surfacique car il n’y a plus comme dans le régime précédent, d’espace gazeux entre les deux électrodes, c’est-à-dire que le diélectrique occupe tout l’espace inter-électrodes (**Figure I.24**) [82].

Roth a montré que ce type de décharge est utilisé comme actionneur pour contrôler un écoulement. De nos jours, les DBD surfaciques suscitent un très grand intérêt et leurs applications au contrôle d’écoulements aérodynamiques sont maintenant étudiées partout dans le monde (**Moreau** [115], **Enloe et al.** [116], **Grundmann et al.** [117] et **Corke et al.** [118]).

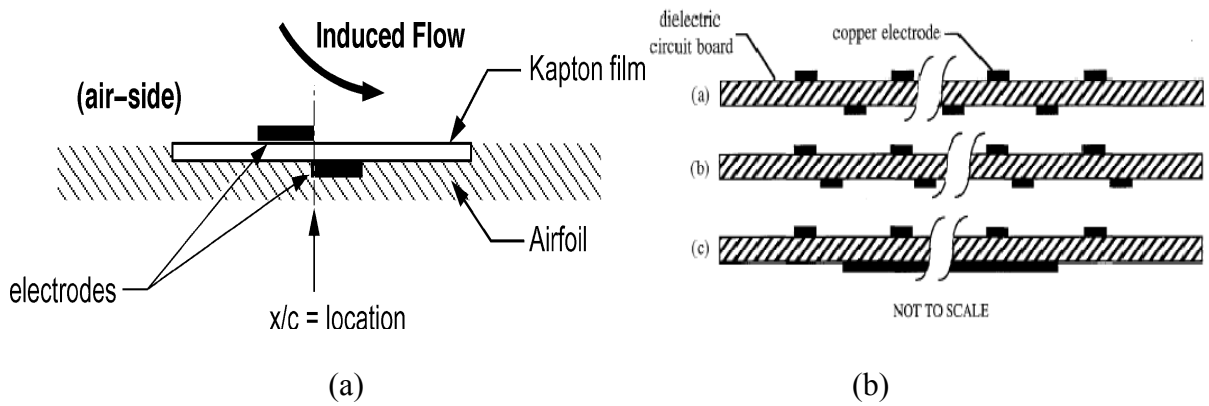


Figure I.24 : (a) Sens de l’écoulement induit par la force paraélectrique (Post et Corke, [119]), (b) Configuration géométrique des électrodes utilisée par Roth et Sherman pour établir la OAUGDP [114].

I.5.1.2.1 Principe de fonctionnement

Dans la décharge surfacique les électrodes sont situées sur le même diélectrique et le plasma (l’écoulement induit) se propage alors dans le gaz, le long de ce diélectrique. En effet, cet écoulement induit (vent ionique) apparaît sur les deux faces du diélectrique et sont de sens opposés. Du côté de l’électrode active, le vent ionique est dirigé de cette électrode vers l’extrémité la plus éloignée de l’électrode de masse. Et pour l’autre face, le vent ionique est dirigé de l’électrode de masse vers l’électrode active [82] (**Figure I.25**).

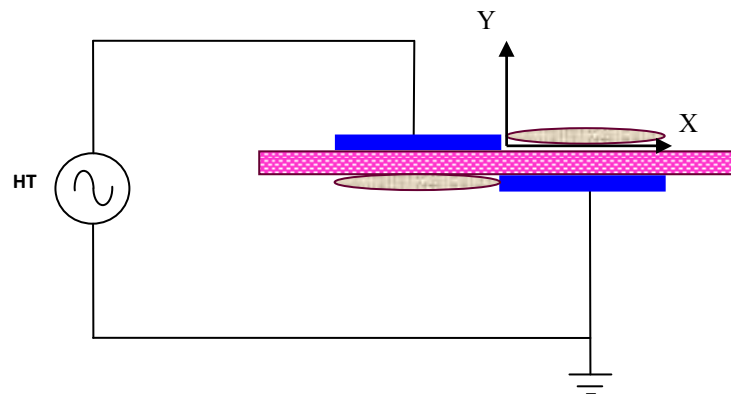


Figure I.25 : Schéma de principe de la décharge surfacique et repère utilisé.

Le mécanisme de formation du vent ionique induit peut être expliqué par les ions positifs qui sont créés à l’anode et les électrons qui sont créés à la cathode. Sous l’influence des forces coulombiennes, ces charges migrent vers l’électrode opposée en échangeant de la quantité de mouvement avec les particules neutres.

Roth [114] a établi un modèle physique simple, a montré que la vitesse induite par le déplacement des électrons est 400 à 800 fois plus faible que l’écoulement induit par les ions.

En effet, la masse des électrons est très inférieure comparée à celle des ions. Par conséquent, leur contribution à l’échange de quantité de mouvement est faible. Le vent ionique est donc essentiellement dû aux ions positifs et est dirigé de l’anode vers la cathode.

Le vent ionique, tangentiel à la paroi de l’isolant, constitue donc la base du contrôle d’écoulement.

I.5.1.2.2 Configuration de DBD surfacique

La **Figure I.26** montre les différentes configurations d’électrodes pour une DBD surfacique.

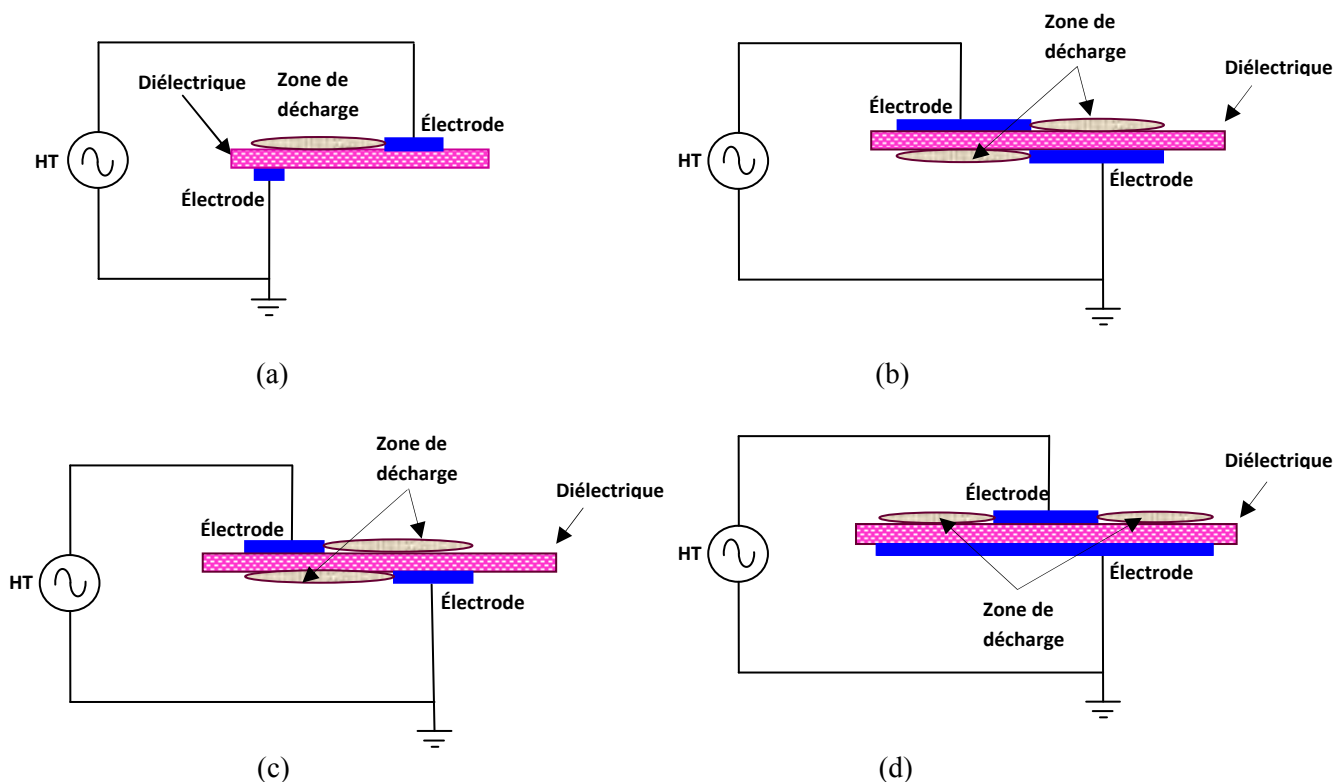


Figure I.26 : Différentes configurations d’une Décharge à Barrière Diélectrique surfacique.

I.5.1.3 Décharge coplanaire

La DBD coplanaire se développe entre deux électrodes recouvertes de diélectrique (**Figure I.27**). La configuration coplanaire permet d’obtenir une distance très faible entre les électrodes (quelques centaines de μm) sans passage à l’arc. Un fort champ électrique apparaît dans la région de gaz entre les électrodes et la décharge comble cet espace très rapidement.

Cette configuration présente des propriétés de décharges similaires à la décharge en volume, notamment son caractère filamentaire, et bénéficie des mêmes avantages que la décharge en surface, comme sa propriété d'allumage à tension faible [102].

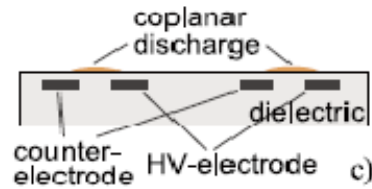


Figure I.27 : Dispositif de décharge coplanaire (CD) [120].

I.5.2 Interactions plasma-surface et phénomènes apparentes

La décharge à barrière diélectrique DBD est soumise à différentes interactions plasma-surface. Généralement, les radicaux, les ions et les photons jouent un rôle important dans le transfert d’énergie du plasma à la surface du matériau [121, 122]. On distingue quatre types d’interactions avec la surface : interactions des ions positifs, des radicaux, des photons, des ions négatifs et des électrons avec la surface du matériau (Figure I.28).

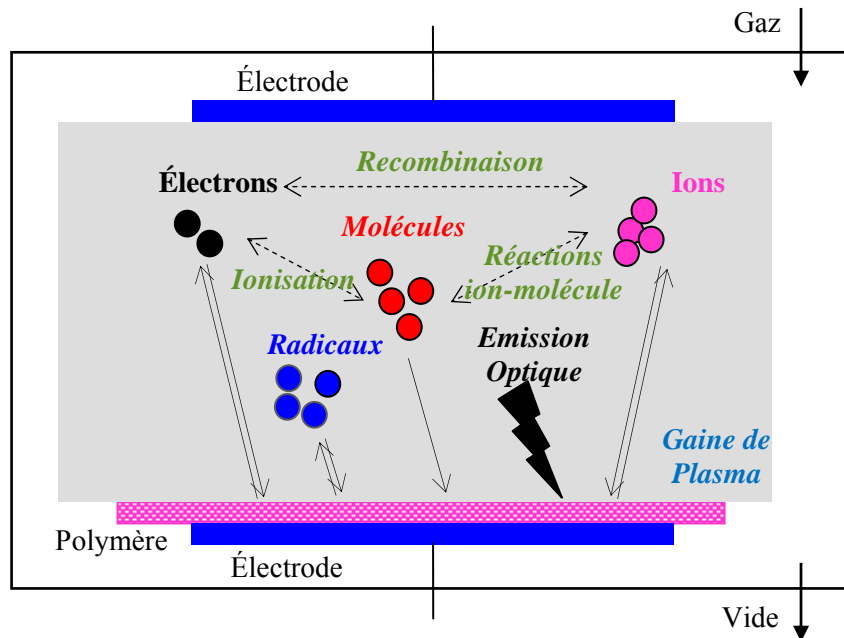


Figure I.28 : Schéma des interactions plasma-surface [123].

I.5.2.1 Bombardement ionique de solides

Il existe de nombreuses méthodes qui ont été utilisées pour le traitement des surfaces dans des décharges luminescentes nécessitent un bombardement d'ions positifs énergétique, l'énergie des ions est comprise entre 100 et 1000 eV. Les ions ayant des énergies dans cette gamme, lors de la collision avec une surface solide, peuvent entraîner des changements importants dans les propriétés de la surface. Lorsqu'un ion énergétique entre en collision avec une surface solide, son énergie est transférée aux atomes du réseau, créant ainsi une cascade de déplacement des atomes dans le réseau de très courte durée (10^{-11} à 10^{-2} s) [124].

I.5.2.2 Interactions Radicaux-Surface

La capacité d'une décharge luminescente réactive de gaz à générer des flux de radicaux élevés relativement uniformes revêt une importance technologique presque égale à la capacité de génération de flux d'ions des plasmas.

Les radicaux réagissent en général avec les surfaces à basses températures (à la température ambiante) et un traitement chimique unique des surfaces peut être obtenu, ce qui entraîne un dépôt, une gravure ou une modification de la surface. Lorsque la chimie surface-radicaux est combinée à un bombardement ionique énergétique, de résultats fascinants et importants peuvent être obtenus, et une décharge luminescente de gaz réactif est peut-être la meilleure façon de produire cette situation synergique [124].

I.5.2.3 Interactions des photons avec la surface

Différents collisions dans le plasma sont responsables de la production des photons. On peut même parfois distinguer le gaz utilisé par la couleur de la décharge. Les photons émis par un plasma ont des énergies allant de l'ultraviolet de très haute énergie (vacuum UV ou VUV, $\lambda < 180$ nm) à l'infrarouge lointain [125]. Pour les métaux et les céramiques, les photons de cette gamme d'énergie n'interagissent pas significativement avec leurs surfaces et donc leurs impacts sont négligés. Pour les polymères par contre des effets importants peuvent se produire selon la longueur d'onde des photons qui interagissent avec la surface. Par exemple, les radiations infrarouges ne modifient pas la surface du polymère mais peuvent être absorbées et dissipées sous forme de chaleur dans le polymère. Par contre, les radiations VUV peuvent être fortement absorbées par les polymères et provoquer la scission des liens chimiques dans le polymère [126]. La scission et la recombinaison des radicaux générées par VUV créent des doubles liens et de la réticulation dans le polymère [127]. De plus,

l’utilisation d’un gaz de monomères pour le plasma peut conduire à l’absorption de radiations UV et initier des réactions de polymérisation dans le plasma. L’effet des UV n’est donc pas négligeable lorsqu’on parle de traitements de surface sur des polymères ou lors de polymérisation par plasma.

I.5.2.4 Interactions des ions négatifs et électrons avec la surface

L’impact des ions négatifs et des électrons sont généralement négligés dans les discussions de traitement de surfaces par plasma, en raison du fait que le potentiel de la décharge est généralement plus positif que le potentiel des surfaces en contact avec la décharge. Ainsi, pour des raisons électrostatiques, les ions négatifs et les électrons créés dans le plasma ne peuvent pas atteindre les surfaces. Cette généralisation s’est révélée incorrecte dans certaines décharges de gaz électronégatifs à basse fréquence [124]. Cependant, en général, l’effet des ions négatifs et des électrons est considéré négligeable et il n’y aura donc pas de discussion sur leurs impacts sur les traitements de surface.

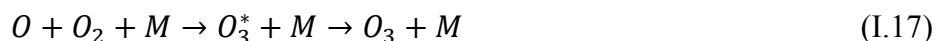
I.5.3 Applications des décharges à barrière diélectrique

Les DBDs à la pression atmosphérique ont de multiples applications, elles sont couramment utilisées en raison de leur simplicité de mise en œuvre à l’échelle industrielle. Les applications industrielles comprennent la génération d’ozone, le contrôle de la pollution, le traitement de surface, les lasers CO₂ à haute puissance, les lampes à ultra-mini-excimère, les lampes fluorescentes sans mercure à base d’excimères et les écrans plasma plats [95]. Elles touchent de nombreux domaines industriels : électronique, textile, emballage, automobile... etc.

I.5.3.1 Production d’Ozone

La première et la plus importante des applications des DBDs est la génération d’ozone provenant du traitement de l’air ou de l’oxygène, ou d’autres mélanges gazeux composés d’oxygène et d’azote « N₂ ».

La formation de l’ozone (O₃) à partir d’un plasma DBD dans l’air ou de l’oxygène et réalisée par la réaction chimique suivante [128]:



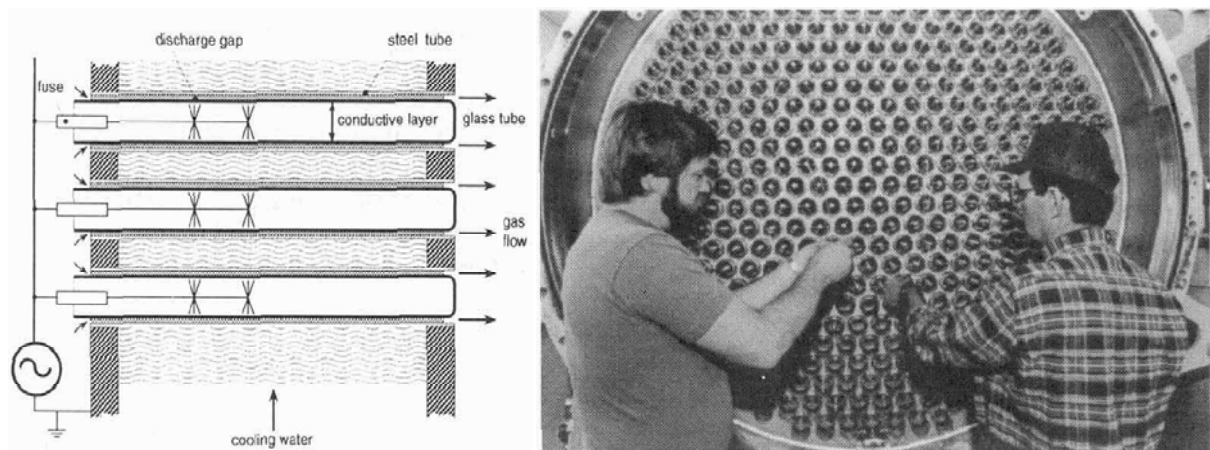
Avec

M : molécule d’oxygène ou une molécule d’azote si l’air est utilisé.

O_3^* : molécule d’ozone à l’état excité.

Les premières grandes installations de génération d’ozone dans les usines d’eau potable pour la désinfection ont été construites au début du siècle dernier à Paris (1897) et à Nice (1904), en France, et à Saint-Pétersbourg, en Russie (1910). Des plaques diélectriques ou des diélectriques tubulaires sous la forme de tubes de verre ont été utilisés [95].

Aujourd’hui, quelques milliers d’installations sont en fonctionnement. Les plus importantes atteignent des puissances de plusieurs MW et produisent quelques tonnes d’ozone par jour. Bien que la purification de l’eau potable reste le plus important marché de l’ozone, d’autres applications ont émergé. La **Figure I.29** représente un schéma des tubes de décharges ainsi qu’une photographie d’un générateur d’ozone à l’usine de filtration de Los Angeles.



(a)

(b)

Figure I.29 : (a) Schéma des tubes de décharge, (b) photographie d’un grand générateur d’ozone à l’usine de filtration de l’aqueduc de Los Angeles [129].

En raison du coût élevé de l’oxygène pur, de nombreux petits générateurs d’ozone utilisent l’air comme gaz d’alimentation [130].

I.5.3.2 Traitement des gaz

Des recherches récentes dans le domaine des décharges à barrière diélectrique abordent le problème du réchauffement de la planète et les changements climatiques menaçant. Le réchauffement climatique dû aux émissions de gaz à effet de serre a été longtemps discuté parmi les scientifiques comme une cause possible des changements

climatiques observés. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère qui avait été constante à environ 280 ppm pendant au moins 1000 ans, a commencé à augmenter vers 1750 avec l'avènement de l'industrialisation et de l'utilisation accrue des combustibles fossiles. En l'espace de seulement 200 ans, la concentration de CO₂ dans l'atmosphère est passée à 360 ppm et augmente à un rythme croissant.

En ce qui concerne les quantités émises, les principaux gaz à effet de serre sont le dioxyde de carbone et le méthane. Près de 60% de l'effet de serre produit par l'homme peut être attribué au CO₂ dont les émissions s'élèvent à 30 Gt par an. Afin d'éviter l'évacuation du CO₂ dans l'atmosphère, de nombreuses activités de recherche approfondies visant à l'utilisation et l'élimination du CO₂ [129]. Une proposition consiste à recycler le CO₂ en tant que vecteur énergétique, peut-être combiné à l'hydrogène sous la forme d'un combustible liquide, ou en tant que matière première dans l'industrie chimique [131].

La **Figure I.30** présente un réacteur DBD pour étudier la décomposition des gaz à effet de serre CO₂ et CH₄ dans différentes conditions de fonctionnement.

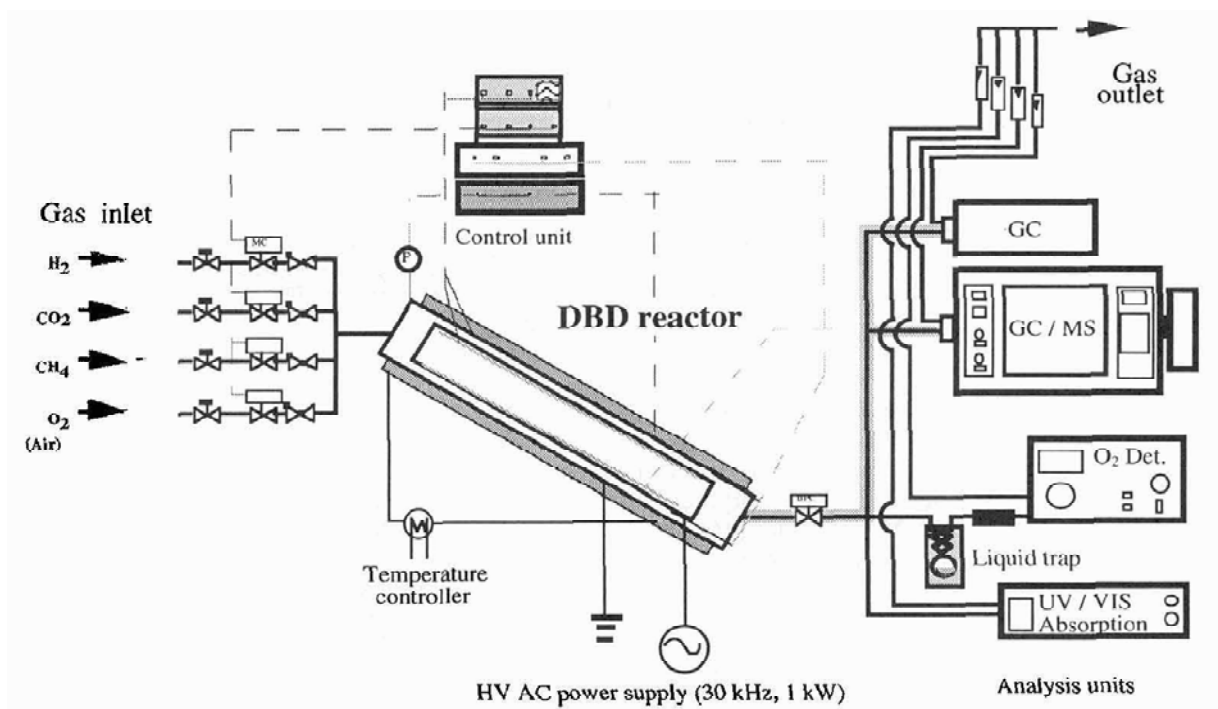


Figure I.30 : Réacteur à décharge à barrière diélectrique pour les études de gaz à effet de serre [129].

Les études menées sur ce réacteur ont démontré que les deux gaz à effet de serre CO₂ et CH₄ peuvent être décomposés dans la décharge et que de nouveaux produits sont formés.

La formation de CO, O₂ et O₃ est observée lorsque le CO₂ est traité. Les H₂, C₂, H₆ et d’autres alcanes sont détectés lorsque le CH₄ pur est utilisé. Dans les mélanges de méthaneloxygène, le méthanol est formé avec les CO et H₂O [132-134].

I.5.3.3 Traitement de surfaces

La plupart des plastiques ont des surfaces inertes chimiquement et non polaires, ce qui les rend peu réceptifs au collage, aux encres d'impression, aux revêtements et aux adhésifs. La principale propriété responsable de ce comportement est la faible énergie de surface [95]. Une possibilité d'augmenter substantiellement l'énergie de surface de différents substrats par un traitement au plasma, un processus souvent appelé "traitement corona" [135]. Il s'est développé en un processus de traitement de surface fiable qui peut correspondre à la vitesse de production des feuilles [135-137]. Dans la plupart des applications, une décharge à barrière diélectrique est utilisée. Typiquement, la pièce à usiner ou un revêtement sur les rouleaux de transport ou les électrodes à haute tension sert de barrière diélectrique. Pour traiter de grandes feuilles sur un ou deux côtés, elles sont passées à grande vitesse sous une décharge silencieuse maintenue par une haute tension alternative appliquée entre une électrode de bord de couteau et un tambour couvert par un diélectrique (**Figure I.31**) [129].

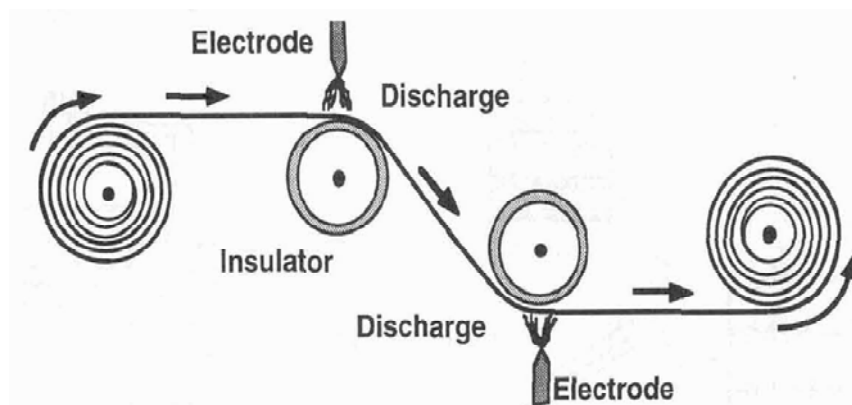


Figure I.31 : Diagramme schématisé du traitement DBD à grande vitesse des feuilles en plastique [129].

Le dépôt de couches minces dans des décharges à barrière diélectrique a également été étudié. En 1979, *Donohoe et Wydeven* [138] ont décrit un réacteur de polymérisation par plasma fonctionnant à la pression atmosphérique. Un groupe autour de *S. Okazaki et M. Kogoma* [139-142] a estimé que les micro-décharges discrètes ne sont pas idéales dans ce but et ont essayé d'obtenir une décharge homogène qu'ils ont appelée décharge APG (*pression atmosphérique*). L'homogénéité spatiale des DBD peut être influencée par l'utilisation de deux

barrières diélectriques et des électrodes métalliques de forme spéciale, par la fréquence de fonctionnement, en utilisant de grandes fractions de l'hélium ou du néon ou de certains autres additifs tels que l'acétone ou le méthane dans de l'argon. Ce travail sur les DBD homogènes a été étudié plus en détail par *Massines et ses collègues* [143, 144]. Une approche alternative a été présentée ces dernières années par *J. Salge et ses collaborateurs* [145, 146]. Ils ont montré que l'utilisation de décharge à barrière diélectrique pulsé peut mener à une meilleure modification de surface et des revêtements d'excellente qualité peuvent être obtenus.

Récemment, *Nadjem et al.* [147] ont pu augmenter la charge triboélectrique des particules de PVC et PP grâce à un traitement de surface par une DBD. Ce résultat, appliqué à la séparation électrostatique des granules, a permis d'améliorer le processus de récupération tant en pureté qu'en quantité.

I.5.3.4 Les écrans plasmas (PDP : Plasma Display Panels)

Les écrans plasma AC utilisant le rayonnement Xe VUV pour exciter les phosphores sont un ajout aux applications de décharge à barrière diélectrique [95]. L'idée originale d'utiliser des décharges à barrière diélectrique pour les écrans de grande surface a été lancée à l'Université de l'Illinois à Urbana-Champaign en 1964 par les deux professeurs *Bitzer et Slottow* [148, 149].

Un écran plasma est constitué de deux plaques de verre séparées par un espace gazeux d'environ 100 μm rempli d'un mélange de gaz rare (généralement Xe-Ne ou Xe-Ne-He) capable d'émettre des photons UV. Des réseaux d'électrodes sont déposés sur chaque plaque. Les réseaux d'électrodes sont recouverts d'une couche diélectrique de 20 à 40 μm d'épaisseur [150].

Deux géométries des électrodes sont disponibles dans le commerce, la matrice (ACM) et la structure coplanaire (ACC) [151] (**Figure I.32**).

Dans la configuration ACM, des réseaux d'électrodes parallèles sont déposés sur chaque plaque de verre et les électrodes sur les faces opposées sont orthogonales entre elles. Une décharge peut être initiée dans l'intervalle de gaz à l'intersection de chaque ligne et colonne avec l'application des tensions appropriées aux électrodes de ligne et de colonne. Chaque cellule de décharge est donc définie par deux électrodes. Dans la configuration d'électrode ACC (**Figures I.32 et Figure I.33**) une cellule de décharge est définie par trois électrodes: deux électrodes parallèles sur une plaque de verre (plaque frontale) et une

électrode, orthogonale aux deux électrodes coplanaires, sur la plaque de verre opposée (plaque arrière).

Les électrodes coplanaires (également appelées électrodes d'affichage) dans les PDP ACC sont faits de matériau conducteur transparent (ITO). Leur largeur est de l'ordre de 200-300 μm dans un panneau de 42 pouces.

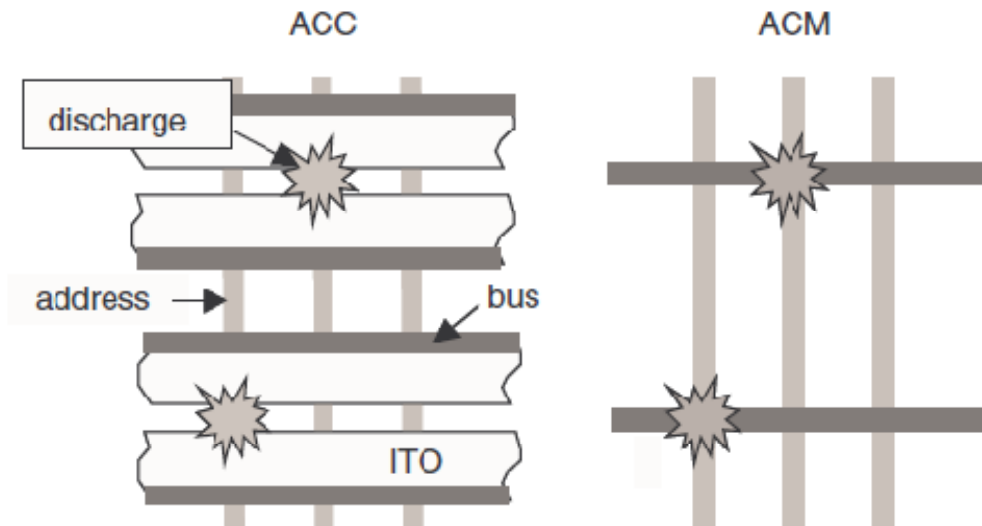


Figure I.32 : Configurations d'électrodes coplanaires (ACC) et matricielles (ACM) des PDPs AC [150].

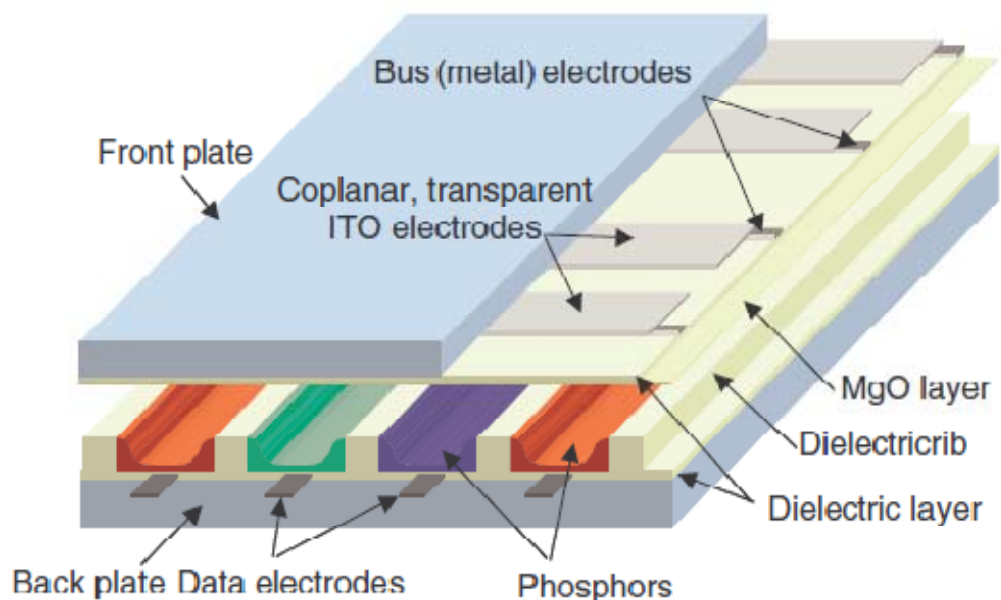


Figure I.33 : Vue simplifiée d'un PDP coplanaire. L'observateur est sur le côté de la plaque frontale [150].

Dans chaque cellule, le rayonnement VUV excite les revêtements de phosphore interne en rouge, vert ou bleu. Chaque cellule agit comme une lampe fluorescente miniature. Les cellules de décharge sont regroupées en triplets de couleurs RGB (Red, Green, Blue) ou en quadruplets (RGBG). Un grand écran a jusqu'à 1280 par 1024 de ces points d'image. Toutes les électrodes dans ces afficheurs plasmas, sont couvertes par des couches diélectriques et d'un revêtement d'une couche résistive de MgO (Oxyde de Magnésium). La couche de MgO protège les couches diélectriques du bombardement ionique et réduit la tension de claquage grâce à son fort coefficient d'émission d'électrons secondaire. La **Figure I.34** représente une coupe transversale d'un écran plasma pour une télévision couleur à haute définition.

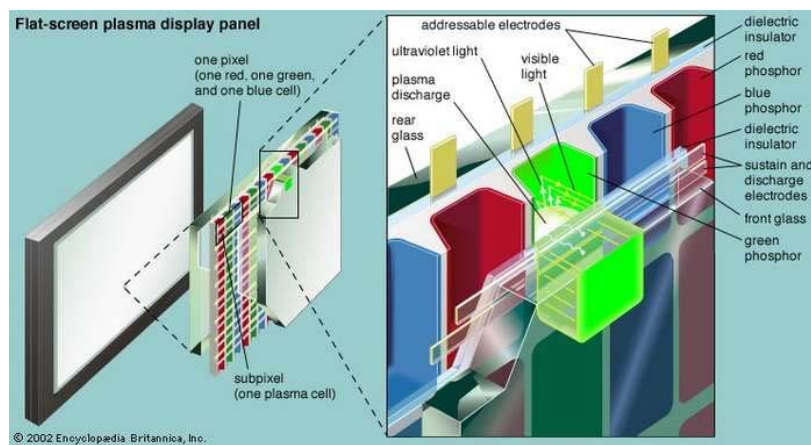


Figure I.34 : Coupe transversale d'un écran plasma à écran plat pour écran large, télévision couleur à haute définition [152].

Sur la **Figure I.35** présente un schéma avec deux dispositions d'électrodes : (a) électrodes opposées et (b) électrodes coplanaires.

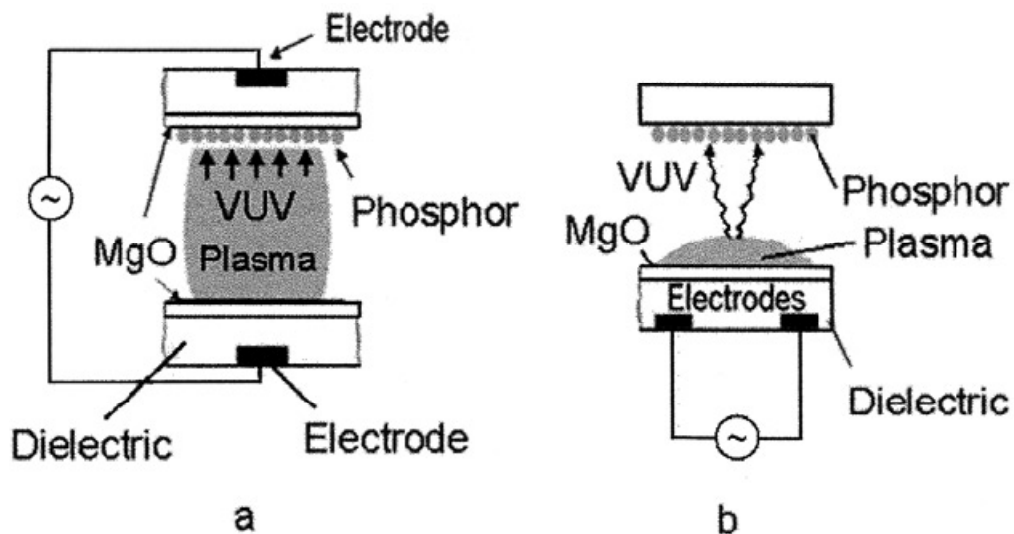


Figure I.35 : (a) Cellules de pixels avec électrodes opposées, (b) et coplanaires [95].

I.5.3.5 SD LASERS CO₂

Les décharges à barrière diélectrique sont aujourd’hui largement utilisées pour le pompage de lasers CO₂ à haute puissance. *Ishchenko*, 1975 [153] et *Christensen*, 1979 [154] étaient probablement les premiers à utiliser des DBDs pulsées pour obtenir des impulsions laser CO₂. Deux ans plus tard, *Yagi et ses collègues* [155-159] développèrent leur laser CO₂ SD (*Silent Discharge*), sur la base de leur expérience avec des décharges à barrière diélectrique dans des générateurs d’ozone. La **Figure I.36** représente le schéma de principe ainsi qu’une photographie d’un laser CO₂.

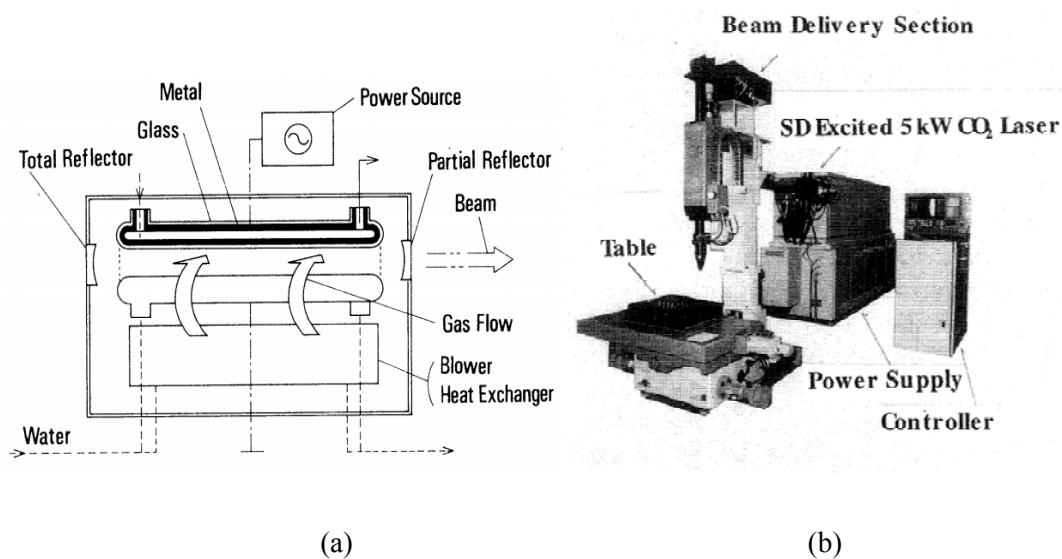


Figure I.36 : (a) Schéma de principe du SD laser CO₂ [156], (b) Photographies du laser CO₂ [159].

Ce SD laser CO₂, est devenu rapidement le laser commercial le plus performant pour le traitement des matériaux sur le marché japonais. Le soudage à grande vitesse et le découpage de plaques métalliques épaisses et d'autres matériaux est l'application principale de ce laser SD CO₂.

Contrairement à d'autres lasers CO₂ commerciaux de haute puissance fonctionnant à 13,65 MHz ou à 27,3 MHz, le laser SD utilise des fréquences relativement basses comprises entre 50 kHz et 200 kHz. L'avantage de la basse fréquence est que les couches diélectriques sur les électrodes (en verre ou en alumine) limitent efficacement le courant de décharge et stabilisent la décharge. Un autre avantage est la disponibilité des alimentations d'énergie à semi-conducteurs peu coûteuses et fortement efficaces [95]. Les mélanges gazeux typiques sont CO₂ / N₂ / He (1/8/4) à une pression totale de 6,5 - 20 kPa [157, 158, 160]. La décharge

semble assez homogène et a été décrite comme une décharge de piégeage d'ions. Il n'y a pas assez de temps pour que les ions se désintègrent ou soient éliminés entre les demi-ondes successives. En conséquence, la décharge se comporte un peu comme une charge résistive [129]. La décharge est maintenue par une onde sinusoïdale haute tension fournie par des alimentations à transistors fonctionnant entre 100 et 500 kHz, typiquement à 170 kHz. Un rayonnement infrarouge limité à la diffraction proche est obtenu à un niveau de puissance de 5 kW et un rendement dépassant 10% [129].

I.5.3.6 Excimères

L’excimère vient du mot anglais excimer (excited dimer) [161], qui est une molécule excitée et instable, formée par deux atomes d’un gaz rare. *Tanaka* a probablement été le premier quia réalisé des excimères de gaz rares peuvent se former dans des décharges silencieuses [162]. D'autres recherches sur les continus d'excimères gazeux rares dans les décharges silencieuses ont été rapportées par *Volkova et al.* [163].

Les décharges à barrière diélectrique (silencieuses) sont idéales pour l'excitation efficace du rayonnement UV de haute intensité des excimères [164].

Lorsqu'une décharge à barrière diélectrique est utilisée dans des gaz rares ou dans un mélange de gaz halogène rare, les conditions de plasma dans un canal de micro-décharge sont similaires à celles des lasers à excimères pulsés [129]. En conséquence, chaque micro-décharge peut agir comme une source intense de rayonnement ultraviolet (UV) ou ultraviolet sous vide (VUV) [164-167].

La **Figure I.37** montre une version cylindrique refroidie à l'eau et une configuration planaire.

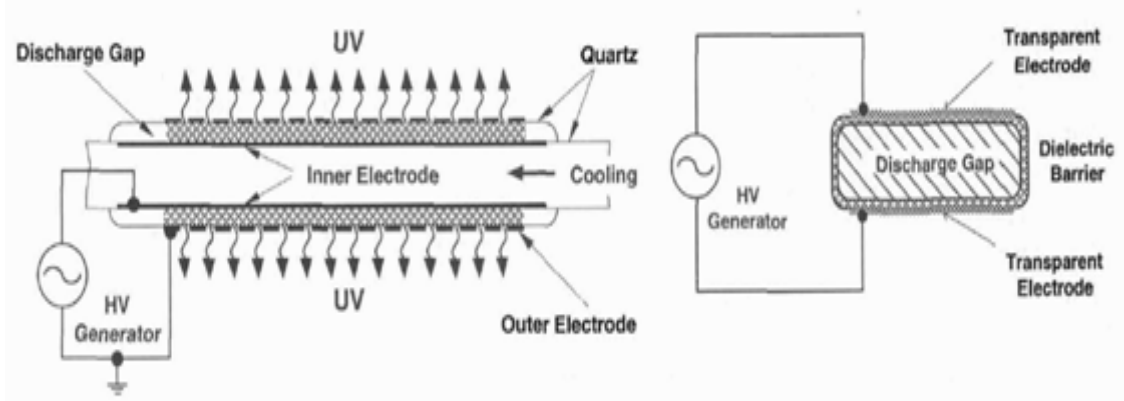


Figure I.37 : Configurations de lampes excimères UV cylindriques et planaires [129].

Ces lampes peuvent fonctionner à des densités de puissance élevées avec l’utilisation des espacements de quelques mm, des tensions de quelques kV et des fréquences de quelques centaines de kHz. Les alimentations à découpage fiables peuvent être adaptées aux caractéristiques de la décharge pour atteindre des rendements de 90 % en ce qui concerne l’énergie déposée dans le plasma. Dans un dispositif pratique, 5 à 15 % de la puissance de décharge peuvent être convertis en rayonnement UV ou VUV.

Conclusions

Nous avons présenté succinctement dans ce chapitre, les éléments essentiels à la compréhension de la suite de nos travaux. D’après l’étude bibliographique que nous avons faite on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les problèmes dus à l’électricité statique touchent plusieurs secteurs industriels : industrie électronique, industrie pétrolière, industrie chimique...etc.
- Tout diélectrique peut être le siège d’une grande variété de mécanisme de propagation des charges. Plusieurs mécanismes physiques différents sont couramment responsables à la création de la charge des matériaux diélectriques: l’effet couronne, l’effet triboélectrique, par contact ou par influence électrostatique.
- La création des charges sur la surface des isolants polymères peut être réalisée par plusieurs procédés : décharge couronne, triboélectricité, piézoélectricité ou par faisceaux d’électrons.
- Plusieurs techniques de neutralisation de charge ont été étudiées par de nombreux chercheurs. Parmi ces techniques, la neutralisation passive, la neutralisation active tels que la décharge couronne. La technique la plus utilisée pour le contrôle de la charge de surface est la décharge couronne à cause de sa simplicité et du faible coût.
- L’avantage de la décharge à barrière diélectrique DBD par rapport à une décharge couronne est sa stabilité et sa capacité à limiter le passage à l’arc.
- Les DBDs à pression atmosphérique est largement utilisée dans de nombreuses applications industrielles, elles sont couramment utilisées en raison de leur simplicité de mise en œuvre à l’échelle industrielle.

Chapitre **II**

INSTALLATIONS EXPERIMENTALES

Ce chapitre décrit les installations et les méthodes expérimentales utilisées dans le cadre de cette thèse. Il est structuré en quatre parties : la première est consacrée au contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par contact directe et par décharge couronne. La deuxième partie décrit l'étude du comportement électrique de la décharge à barrière diélectrique. La troisième partie est consacrée au contrôle de l'état de charge des matériaux diélectriques par la décharge à barrière diélectrique. La quatrième partie présente l'étude de l'influence de la forme d'onde sur l'élimination des charges électrostatiques à la surface de matériaux diélectriques granulaires.

II.1 Procédure de neutralisation des matériaux diélectriques par contact et par décharge couronne

Dans cette section nous présentons les deux bancs expérimentaux conçus pour l'étude de l'élimination des charges à la surface des matériaux diélectriques moyennant deux techniques : une décharge couronne et par la mise en contact avec une électrode plane qui peut être sous tension ou mise à la terre.

II.1.1 Déchargement des films polymères par contact direct

L'installation expérimentale est essentiellement de trois postes : (**Figure II.1**), à savoir : poste de chargement, poste de mesure de potentiel de surface et un poste pour la neutralisation des charges.

Le poste de chargement contient les éléments suivants :

- Le système d'électrodes de chargement ;
- L'alimentation électrique (Fug Modèle HCP 140-12500, + 12,5 kV, 10 mA) ;

Le poste de neutralisation des charges électriques est composé des éléments suivants :

- Les systèmes d'électrodes de neutralisation ;
- L'alimentation électrique ;

Le poste de mesure de potentiel de surface est composé des éléments suivants :

- Un voltmètre électrostatique (Trek Inc, modèle 347), doté d'une sonde (Trek Inc, modèle 6000B-7C) ;

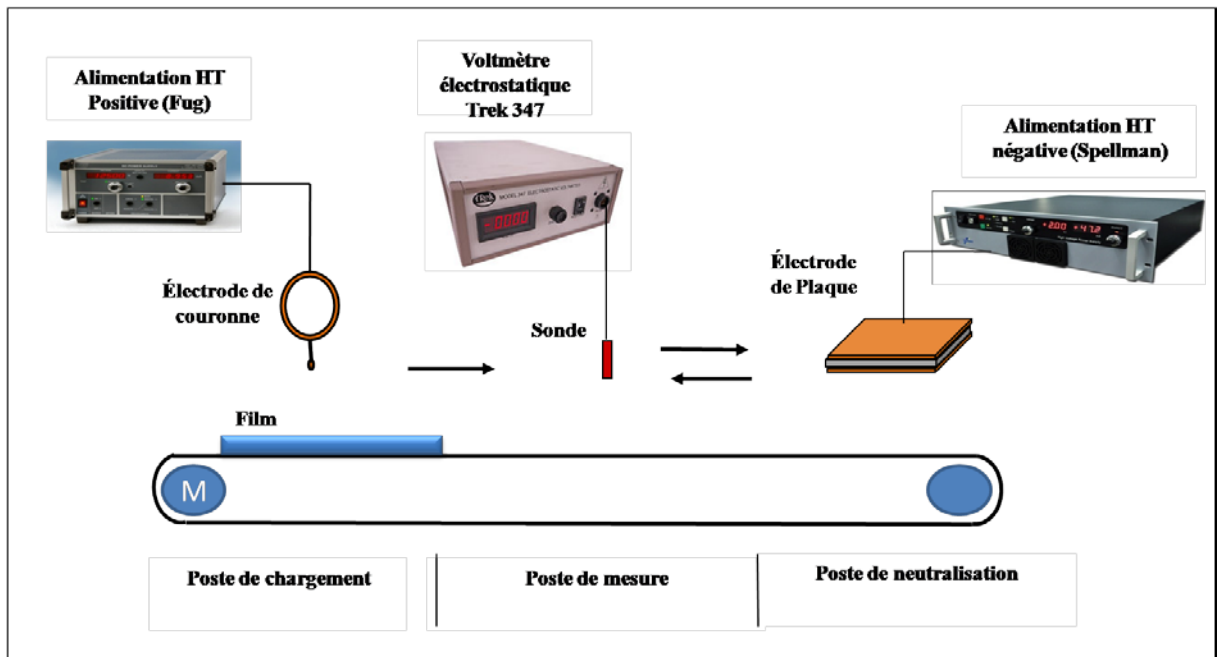


Figure II.1 : Montage expérimental.

II.1.1.1 Electrode de chargement

Ce système contient l'électrode active de type dual qui se compose d'un fil de tungstène (0,2 mm de diamètre) fixé à un cylindre en cuivre (20 mm de diamètre) et situé à 16 mm au-dessus de l'électrode de plaque mise à la terre (**Figure II.2**).

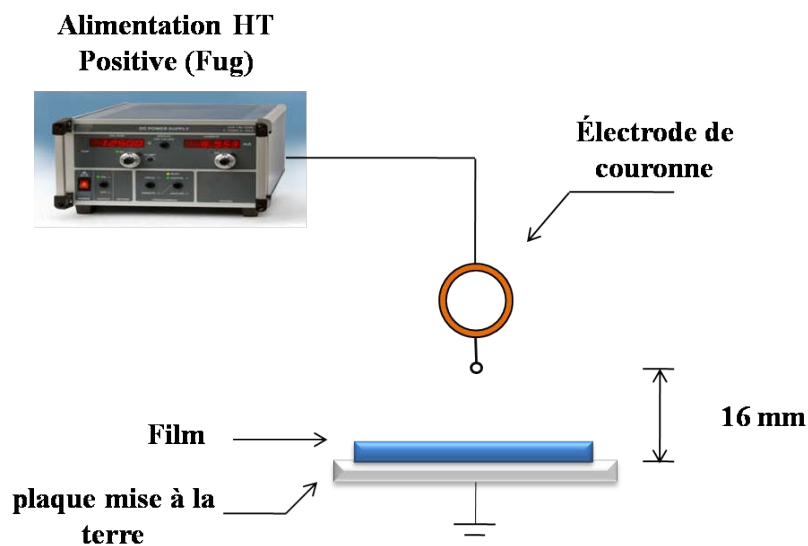


Figure II.2 : Représentation schématique de la décharge couronne de type dual (fil-plan) utilisée pour le chargement des films.

L'électrode dual est alimentée à partir d'une source de haute tension continue positive (Fug Modèle HCP 140-12500, + 12,5 kV, 10 mA).

II.1.1.2 Poste de neutralisation

A. Electrode de neutralisation

Deux plaques conductrices de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ ont été utilisées pour neutraliser les films diélectriques (**Figure II.3**) : une simple plaque de cuivre et une plaque de forme capacitive. La plaque capacitive est constituée de deux plaques en cuivre collé de part et d'autre d'un isolant de type résine époxy. Cette plaque a été fabriquée à partir de plaques pour circuit imprimé (**Figure II.3 (a)**). La durée de contact était environ une seconde ou un peu moins ($\leq 1 \text{ s}$).

Durant cette étude de déchargement des matériaux isolant par contact avec une plaque conductrice, trois situations ont été considérées : plaque directement reliée à la terre, plaque alimentée en tension continue et plaque alimentée en tension alternative. Dans la première séries d'expériences, en plus de la situation de la plaque mise à la terre, une alimentation haute tension continues négative a été utilisée (TECHNIX modèle SR10-N-300, - 10 kV, 30 mA).

Dans le cas de la tension alternative, l'électrode capacitive est alimentée par un amplificateur haute tension (Trek Inc, modèle 20 / 20C), commandé par un générateur de fonctions (TG TTi modèle 1010A) (**Figure II.4**).

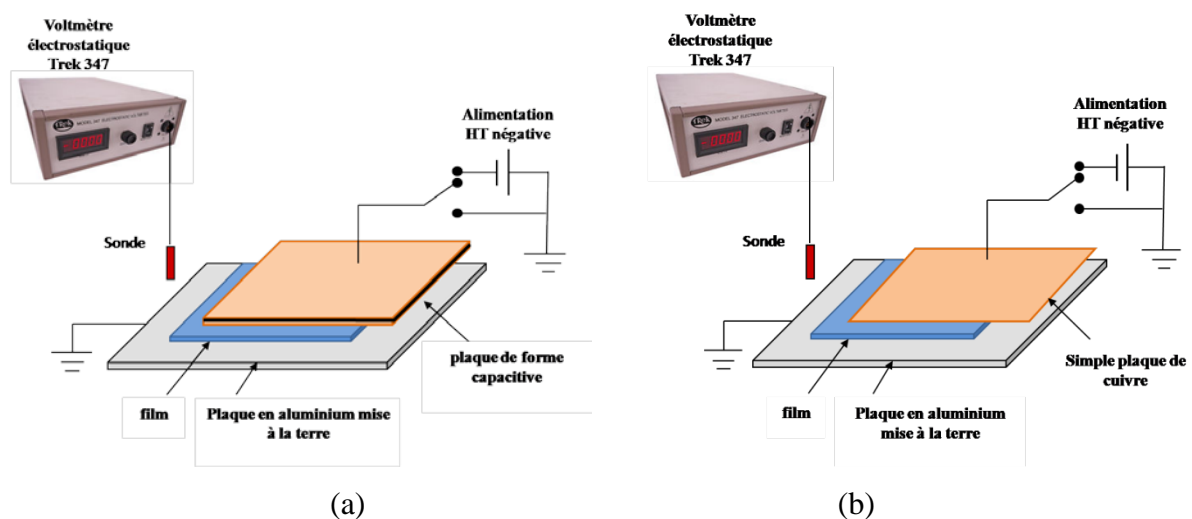


Figure II.3 : Système de neutralisation par contact en DC: (a) plaque capacitive, (b) plaque simple.

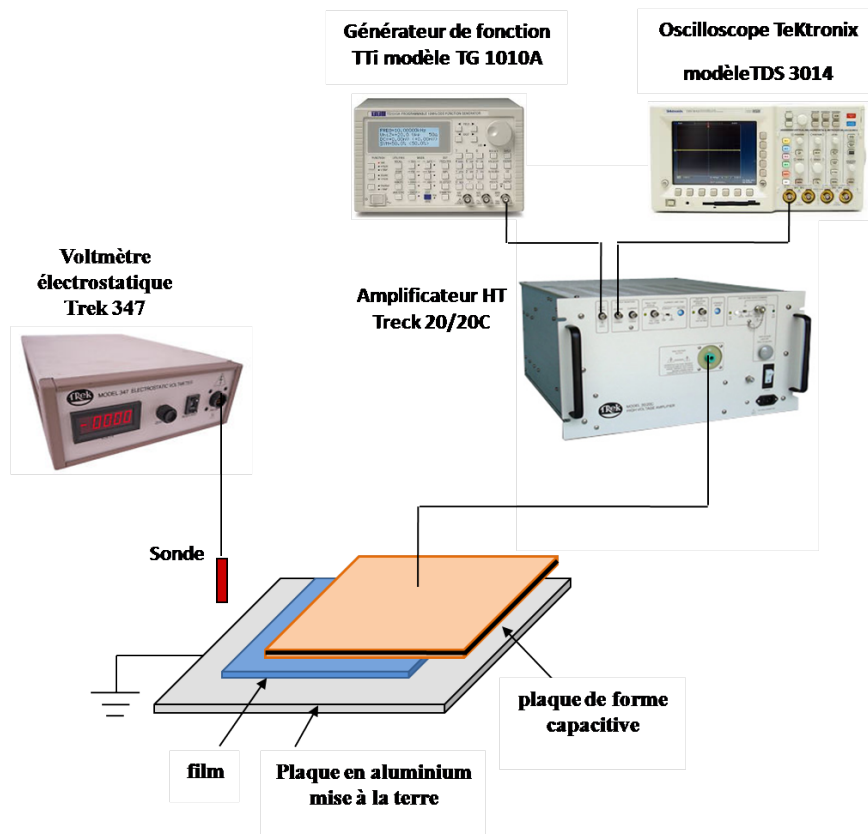


Figure II.4 : Plaque capacitive alimentée en AC.

II.1.1.3 Mesure du potentiel de surface

Le potentiel de surface a été mesuré au point milieu de l'échantillon à l'aide d'un voltmètre électrostatique (Trek Inc, modèle 347) (**Figure II.5**). Ces mesures de potentiel ont été réalisées avant et après neutralisation afin de pouvoir quantifier la qualité et le taux de neutralisation.

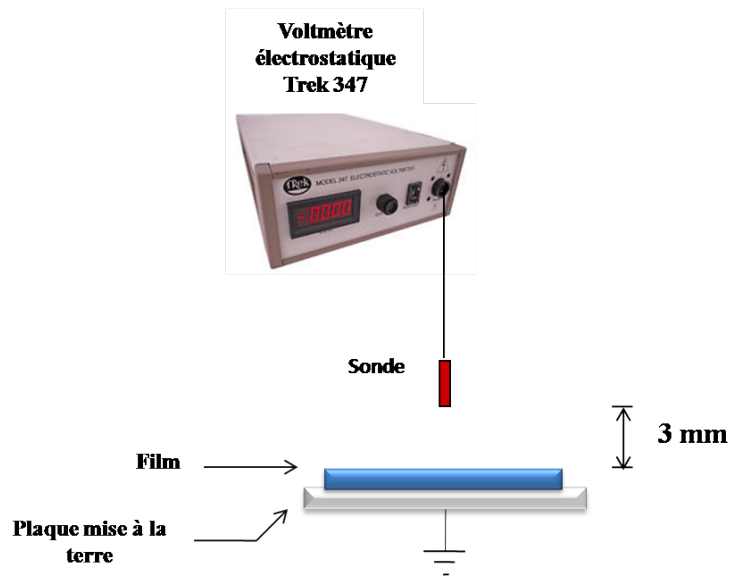


Figure II.5 : Représentation schématique du poste de mesure du potentiel de surface.

II.1.1.4 Matériaux étudiés

Les expériences ont été effectuées sur deux films diélectriques: polypropylène (PP) et Polychlorure de vinyle (PVC). Les dimensions de chaque échantillon sont de $50 \times 50 \text{ mm}^2$ et une épaisseur de 0,18 mm. Au cours de toutes les expériences, les échantillons ont été placés sur une plaque en aluminium mise à la terre, fixée à un convoyeur assurant un mouvement de va-et-vient.

II.1.1.5 Protocole expérimental

Les échantillons ont été d'abord chargés pendant 10 s à l'aide d'une électrode à décharge couronne. Après le chargement, les échantillons ont été transférés sous une sonde électrostatique afin de mesurer le potentiel de surface initial de l'échantillon. Après la mesure du potentiel de surface, les échantillons ont été neutralisés par contact direct à l'aide de l'une des méthodes présentées ci-dessus. Lorsque le processus de neutralisation est achevé, les échantillons sont déplacés à nouveau sous la sonde électrostatique pour la mesure du potentiel de surface après neutralisation.

Au cours de ces expériences, la température ambiante et l'humidité étaient dans la limite, respectivement, de 18-21 °C et de 39,1% - 56,3%.

II.1.2 Déchargement des granules de PE par décharge couronne

Dans cette partie de l'étude, nous utiliserons les mêmes blocs que utilisées pour la neutralisation par DBD, à savoir :

- Le poste de charge électrique ;
- Le poste de mesure de potentiel de surface ;
- Le poste de neutralisation des charges électriques.

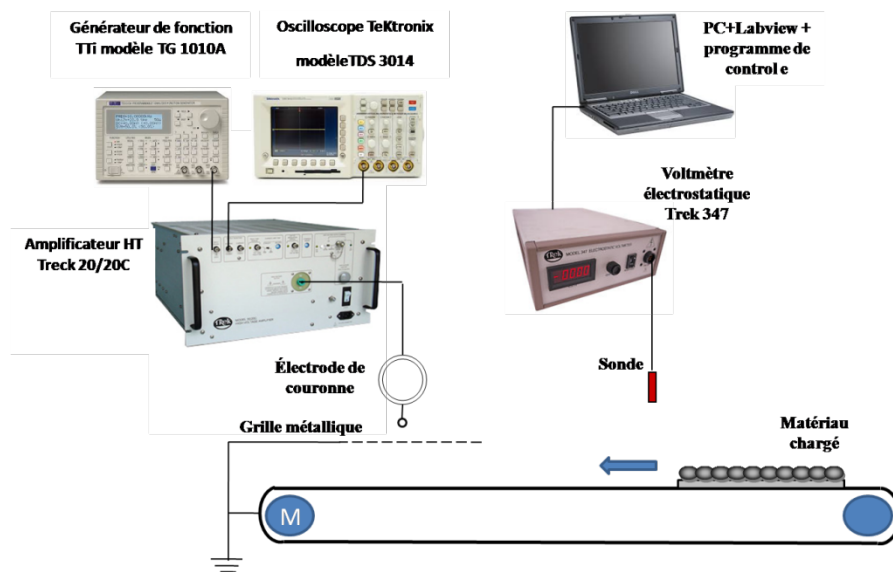


Figure II.6 : Représentation schématique de la configuration expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules de PE par décharge couronne.

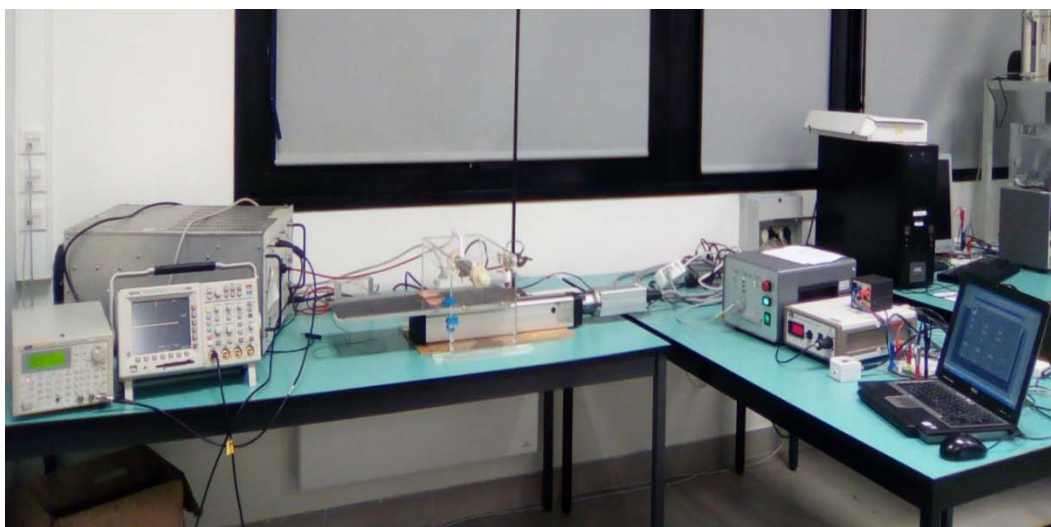


Figure II.7 : Photographie de l'installation expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules de PE par décharge couronne.

II.1.2.1 Description de l'ensemble du banc de contrôle de l'état de charge des granules de PE par décharge couronne

L'installation expérimentale utilisée pour la neutralisation des charges à la surface des granules de PE par décharge couronne ressemble rigoureusement à celle utilisée pour la neutralisation des granules de PE par DBD avec quelques modifications sur le poste de chargement et le poste de neutralisation des charges. La **Figure II.6** et la **Figure II.7** illustrent le dispositif expérimental utilisé.

A. Poste de chargement

Dans cette étude, nous avons utilisés l'effet triboélectrique pour le chargement des granules de polyéthylène (PE) à l'aide d'un système vibrant (Endecotts Octagon, modèle D200 Digital Sieve Shaker). Les granules de PE ont été chargés pendant 2 min dans le système vibrant.

B. Poste de neutralisation

Après le chargement, les granules de PE chargés sont transférés au poste de neutralisation. Ce poste est constitué d'une électrode de neutralisation à base de décharge couronne alimenté par un amplificateur haute tension (modèle 20 / 20C, Trek Inc). Deux configurations d'électrodes de décharge couronne ont été utilisées pour les expériences de neutralisation: une décharge couronne de type dual (fil-plan) (**Figure II.8 (a)**) et une décharge couronne de type triode (fil-grille-plan) (**Figure II.8 (b)**). La neutralisation par décharge couronne a été caractérisée par mesure des profils de potentiel de surface où plusieurs amplitudes et fréquences ont été appliquées.

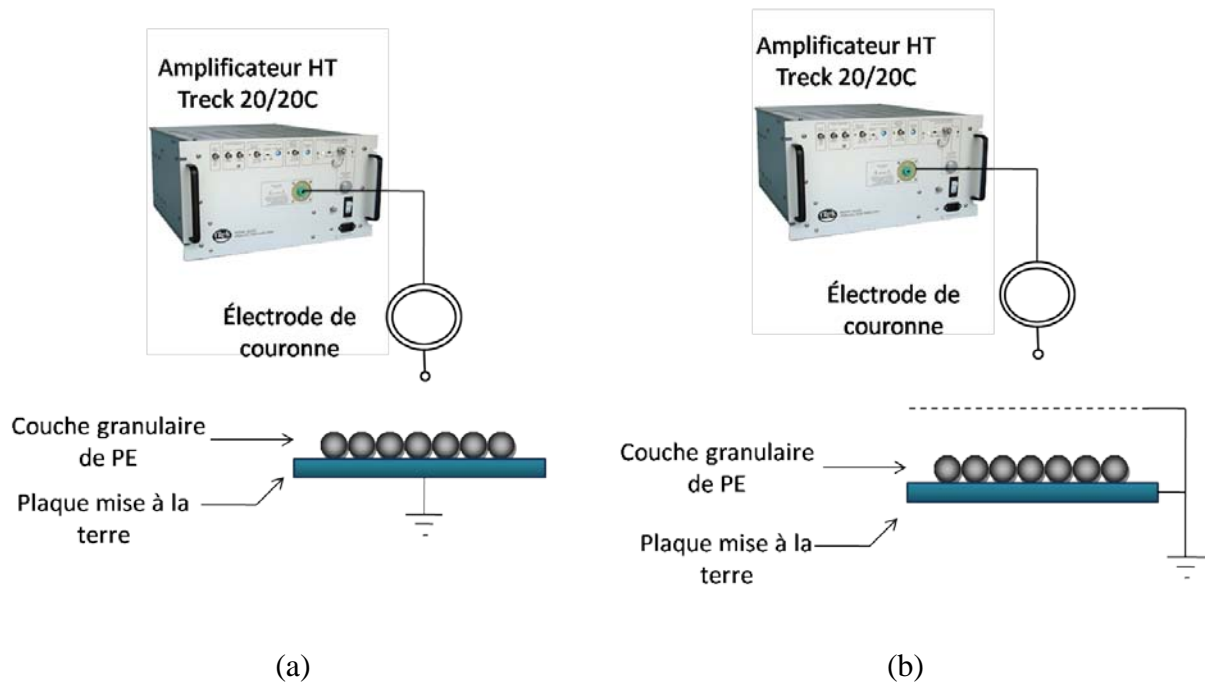


Figure II.8 : Dispositifs de neutralisation par décharge couronne (a) type dual (fil-plan), (b) type triode (fil-grille-plan).

C. Matériau utilisé

Les expériences ont été réalisées sur du polyéthylène granulaire, ses caractéristiques seront décrites dans les prochains paragraphes. Les particules ont été réparties en monocouche sur une surface de 50×50 mm². La masse de chaque échantillon était de 3,65 g.

II.2 Caractérisation électrique de la décharge à barrière diélectrique fil-cylindre- plan.

Dans cette section nous présentons le banc expérimental conçu pour l'étude du comportement électrique de la décharge à barrière diélectrique fil-cylindre-plan. A cette fin, des mesures de courant de décharge, de la charge transférée et la puissance consommée ont été réalisées. Nous donnerons aussi une description détaillée de l'installation expérimentale dans sa globalité.

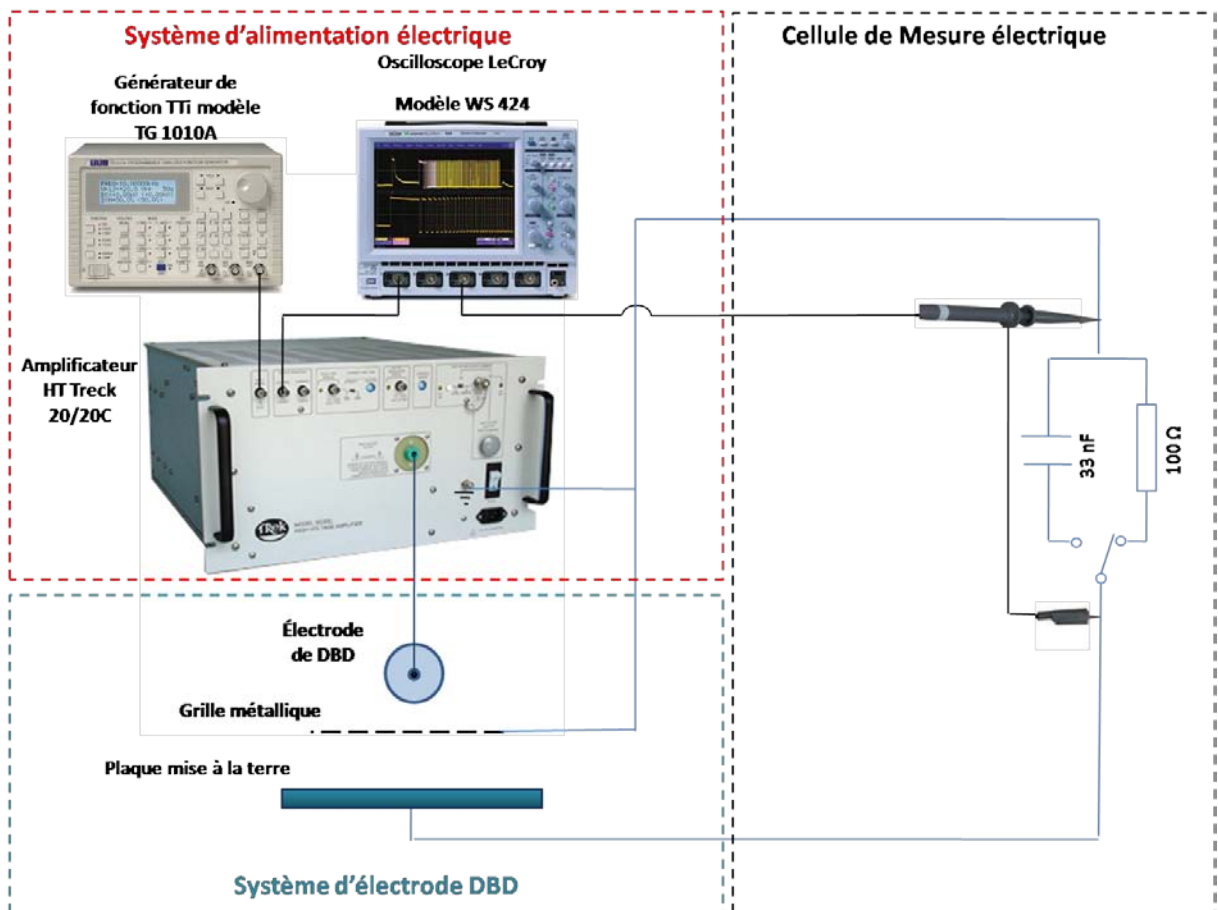


Figure II.9 : Installation expérimentale pour la caractérisation électrique de la DBD.

II.2.1 Description de l'ensemble du banc d'étude électrique de la DBD

Dans cette étude, l'installation expérimentale comporte trois blocs (**Figure II.9**), à savoir :

- (a) Le système d'alimentation électrique ;
- (b) Le système d'électrodes DBD ;
- (c) Et la cellule de mesures électriques.

II.2.1.1 Système d'alimentation électrique

Le système d'alimentation utilisée se compose d'un amplificateur de puissance Haute Tension (Model 20/20C, Trek Inc), d'un générateur de fonctions (TTi, modèle TG1010A) qui génère des formes d'ondes sinusoïdale, carrée et triangulaire de haute qualité dans la gamme de fréquence allant de 0.1 mHz à 10 Mhz.

II.2.1.2 Le système d'électrodes DBD

Le système d'électrodes utilisé pendant l'étude de la caractérisation électrique de la décharge à barrière diélectrique est décrit en détail dans le deuxième banc expérimental.

II.2.1.3 La cellule de mesures électriques

Elle s'agit d'une enceinte Faradisée comportant une résistance shunt non-inductive de 100 Ω pour la visualisation de courant, ou un condensateur de 33 nF pour la mesure de la charge transférée. Pour protéger l'oscilloscope en cas de surtension, un éclateur à gaz de marque EPCOS (B88069X140C103 - Tube à éclateur à gaz (GDT), A80-C90X Series, 90 V, CMS, 20 kA, 600 V) est mis en parallèle à chacun de ses composants.

II.2.1.4 Les organes de visualisation et d'acquisition

Pour visualiser et enregistrer les signaux de tension, de courant et de la charge, nous avons utilisé un oscilloscope numérique de marque LECROY model WaveSurfer 424 à 4 chaînes, avec une bande passante maximale de 200 MHz et un taux d'échantillonnage de 2 GS/s.

II.2.1.5 Matériaux étudiés

Pendant la caractérisation électrique de la DBD nous avons utilisé des échantillons de granules de polyéthylène (PE) dont les caractéristiques principales sont données dans la partie consacrée au deuxième banc expérimental. La masse des échantillons de PE est de 5.8 g. Pour les expériences, les granules ont été réparties en monocouche sur une surface de 60×60 mm².

II.3 Contrôle de l'état de Charge des matériaux diélectriques par la décharge à barrière diélectrique

Dans la présente section, nous décrirons les caractéristiques du deuxième banc expérimental utilisé pour la neutralisation des charges à la surface des matériaux diélectriques.

II.3.1 Description du deuxième banc expérimental

L'installation expérimentale utilisée dans cette étude est composée de trois sous-ensembles distincts : poste de charge électrique, poste de mesure de potentiel de surface et un poste pour la neutralisation des charges.

Le poste de chargement contient les différents systèmes de charge électrique des granules:

- le système de charge par effet triboélectrique ;
- le système de charge par décharge couronne ;
- le système de charge par décharge à barrière diélectrique.

Le poste de neutralisation des charges électriques est composé des éléments suivants :

- les systèmes d'électrodes « DBD » ou « DBD +grille » ;
- un générateur de fonctions (TTi, modèle TG1010A) ;
- un oscilloscope numérique (Tektronix, modèle TDS 3014) ;
- un amplificateur haute tension (Trek Inc, modèle 20 / 20C).

Le poste de mesure de potentiel de surface est composé des éléments suivants :

- Une sonde électrostatique (Trek Inc, modèle 6000B-7C) ;
- Un voltmètre électrostatique (Trek Inc, modèle 347) ;
- Une carte électronique pour l'adaptation des impédances ;
- Un ordinateur avec un logiciel Labview pour l'acquisition et l'enregistrement des données.

La **Figure II.10** et **II.11** illustrent bien le montage expérimental utilisé dans cette étude.

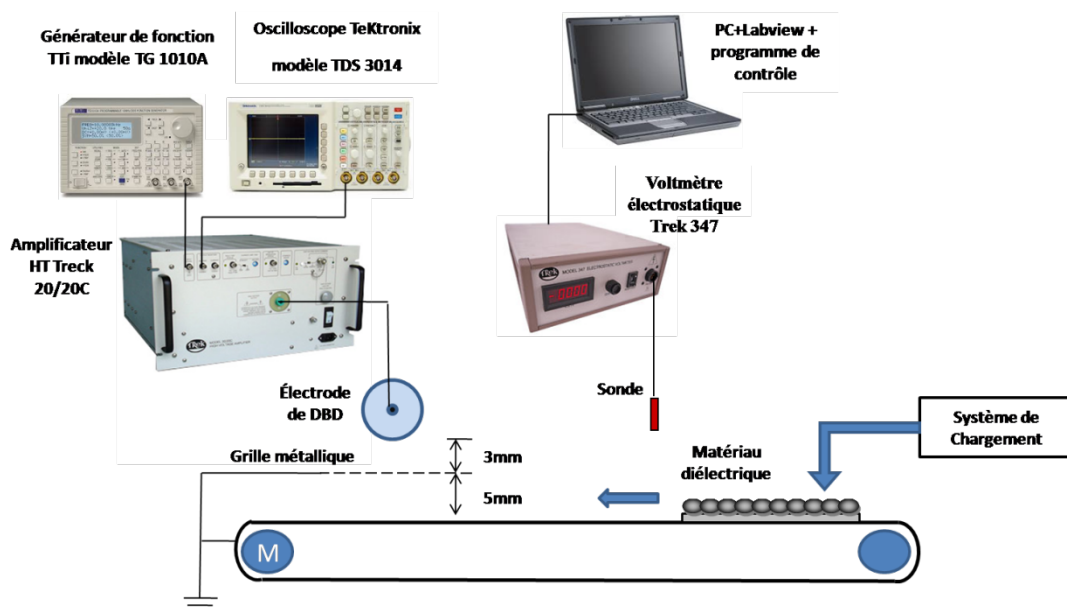


Figure II.10 : Représentation schématique de la configuration expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules par décharge à barrière diélectrique.



Figure II.11 : Installation expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation des granules par décharge à barrière diélectrique.

II.3.1.1 Poste de chargement

Dans cette étude, nous avons utilisés trois systèmes de chargement électrique des granules de polyéthylène (PE):

A. Système de charge par effet triboélectrique

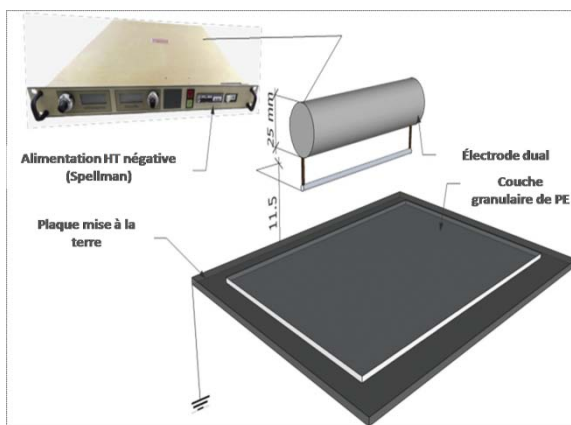
L'effet triboélectrique est obtenu à l'aide d'un système vibrant (modèle: Endecotts Octagon D200 Digital Sieve Shaker) (**Figure II.12**) dans lequel les granulaires de polyéthylène étaient en contact avec une coupelle isolante dont la face interne était recouverte d'aluminium. Après une charge de 2 min dans le système vibrant, les particules de PE acquièrent une charge nette négative du contact avec la surface d'aluminium.



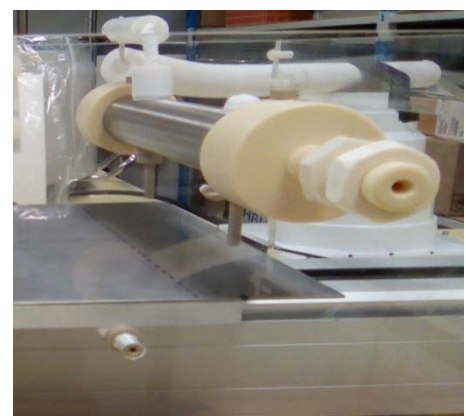
Figure II.12 : Photographie du système de charge par effet triboélectrique.

B. Système de charge par décharge couronne

B.1 Système des électrodes: Ce système contient l'électrode active de type dual qui se compose d'un fil de tungstène (0,2 mm de diamètre) fixé à un cylindre métallique (25 mm de diamètre) et situé à 11,5 mm au-dessus de l'électrode de plaque mise à la terre. Cette dernière est supportée par un système de convoyeur assurant le mouvement va et vient, ce qui permet d'effectuer une mesure du profil de potentiel de surface (**Figure II.14 (b)**).



(a)



(b)

Figure II.14 : Système de charge par décharge couronne de type dual (fil-plan) : (a) Représentation schématique, (b) Photographie du dispositif expérimental.

B.2 Alimentations électriques : Deux alimentations hautes tensions continues ont été utilisées, l'une positive (Spellman model SL1200, +100 KV, 1200 w, 12 mA) et l'autre négative (Spellman model SL 150, -40kV, 150 W, 3.75 mA).

C. Système de charge par décharge à barrière diélectrique

La décharge à barrière diélectrique a été générée en utilisant le même système de neutralisation DBD, décrit en détail dans la section suivante (**Figure II.15 (a)**).

II.3.1.2 Poste de neutralisation

Après le chargement, les matériaux chargés sont transférés au poste de neutralisation. Ce poste est constitué d'électrode de neutralisation à base de DBD reliée à un amplificateur HT de type Trek 20/20C (**Figure II.15**). Deux configurations d'électrodes DBD ont été utilisées pour les expériences de neutralisation: une DBD avec la grille métallique et une DBD sans la grille métallique, comme le montre la **Figure II.15**.

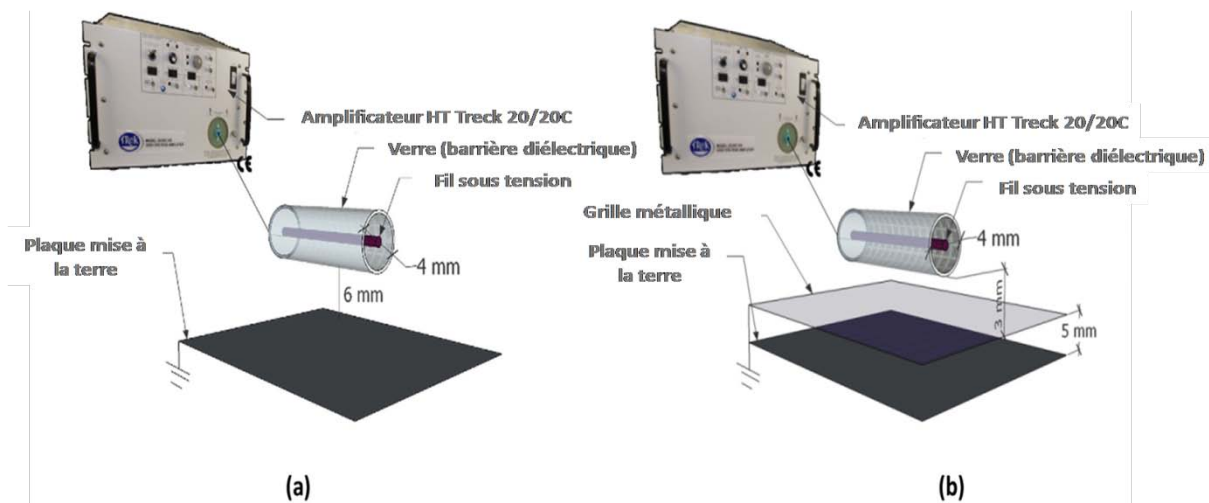


Figure II.15 : Systèmes de neutralisation DBD (a) Électrode DBD sans grille métallique, (b) Électrode DBD avec grille métallique.

L'électrode de neutralisation DBD est composée d'un mince fil d'acier inoxydable, de 0,2 mm de diamètre, inséré à l'intérieur d'un cylindre en verre de 4 mm de diamètre suspendu au-dessus d'une plaque métallique mise à la terre (**Figure II.15**). Dans cette configuration d'électrode, le fil et la plaque mise à la terre jouent le rôle des deux électrodes, tandis que le verre cylindrique constitue la barrière diélectrique. La décharge a lieu entre le verre cylindrique et la plaque mise à la terre, sans transition d'arc. Cela offre plus de sécurité à

l'équipement en évitant le risque de décharges dangereuses. Le fil-électrode a été alimenté par un amplificateur haute tension (modèle 20 / 20C, Trek Inc), commandé par un générateur de fonctions (modèle 1010A, TG TTI).

Dans la première configuration, sans la grille métallique (**Figure II.15 (a)**), la barrière diélectrique était située à 6 mm au-dessus de la plaque mise à la terre. Dans la seconde configuration, une grille métallique est insérée entre le verre cylindrique et l'électrode mise à la terre (**Figure II.15 (b)** et **Figure II.16**). La grille métallique reliée à la terre se situe à 5 mm au-dessus de la plaque mise à la terre et distante de 3 mm de la barrière diélectrique.

La présence de la grille métallique a permis le contrôle du flux de charges électriques vers la surface du diélectrique chargé. En effet, le matériau diélectrique chargé crée un champ électrique qui permet aux charges de signe opposé de traverser la grille. Cependant, à mesure que les charges sur la surface du matériau diminuent, le champ électrique diminue également. Lorsque les charges de surface sont complètement neutralisées, le champ électrique entre la grille et le matériau diélectrique devient nul et plus aucun flux de charges opposées n'est possible. Cela conduira à une bonne neutralisation du matériau chargé.

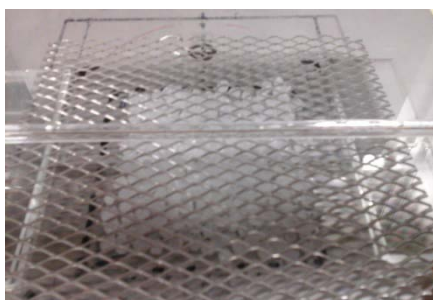


Figure II.16 : Photographie de l'électrode DBD avec grille métallique.

II.3.1.3 Poste de mesure

Le poste de mesure correspond à l'ensemble de la chaîne d'acquisition des signaux utilisés pour évaluer l'état de charge d'un échantillon (**Figure II.17**). La technique de mesure du potentiel de surface est utilisée pendant cette étude pour évaluer la charge électrique présente sur la surface d'un échantillon. Pour pouvoir réaliser des mesures de profil du potentiel de surface, l'échantillon est passé en dessous de la sonde électrostatique grâce au système de déplacement sur un seul axe de mouvement.

La sonde électrostatique, model 6000B-7C de marque Trek, est reliée à un voltmètre électrostatique, modèle 347 de marque Trek, qui a la capacité de mesurer des potentiels variant de ± 3 kV.

L'acquisition des données est effectuée depuis le poste présenté sur la **Figure II.17**. Ce montage est constitué d'une carte électronique pour l'adaptation des impédances, une carte d'acquisition (NI, model 6009) et d'un ordinateur personnel équipée d'un logiciel LabVIEW commercialisé par National Instrument.

La fréquence d'échantillonnage F_e est adaptée en fonction du type de mesure à effectuer. Pour les mesures de profil de distribution de potentiel de surface une fréquence d'échantillonnage de 200 Hz est adoptée.

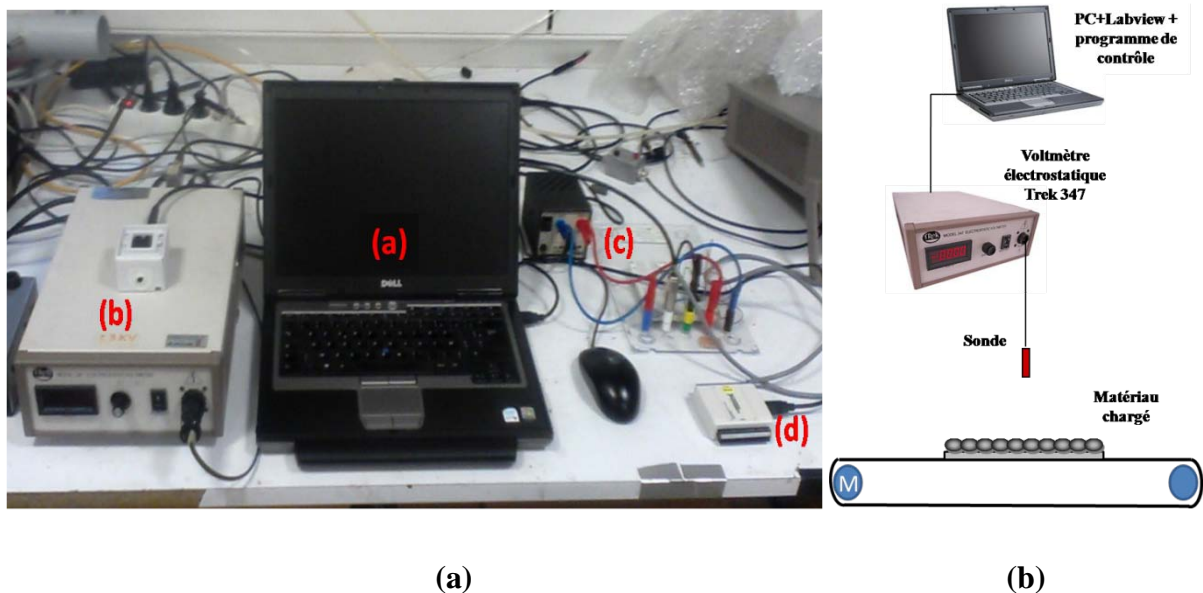


Figure II.17 : Poste de mesure du potentiel de surface : (a) photographie : (a) ordinateur équipée par logiciel LabVIEW ; (b) voltmètre électrostatique ; (c) carte électronique pour l'adaptation des impédances ; (d) carte d'acquisition, (b) représentation schématique.

II.3.1.4 Système de déplacement

Le support sur lequel est placée l'électrode de masse est un système de déplacement linéique de marque ISEL pouvant se déplacer suivant l'axe x, ce qui permet d'effectuer une mesure du profil de distribution de potentiel de surface. Le déplacement du système est assuré par un moteur pas à pas commandé par servo-contrôleur mono piloté par un ordinateur.

La course maximale de déplacement de ce système est de 330 mm, avec une vitesse minimale de 5 mm.s^{-1} et une vitesse maximale de 25 mm.s^{-1} .

L'intérêt de ce système de déplacement est multiple. D'une part, il offre deux options pour la charge et pour la neutralisation des échantillons : statique ou dynamique, c'est-à-dire sans ou avec mouvement relatif entre l'électrode active et l'échantillon.

D'autre part, ce système permet de positionner les échantillons chargés sous une sonde électrostatique afin d'évaluer l'état de charge de l'échantillon sans intervention de l'opérateur, ce qui permet de conserver l'état électrostatique des échantillons.

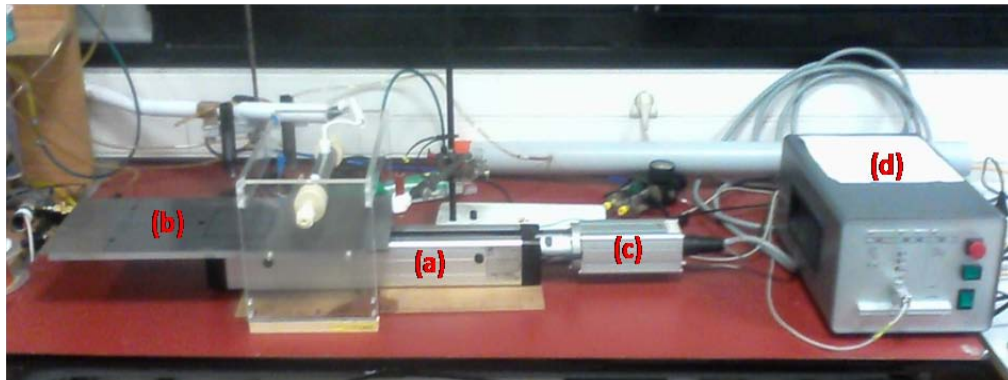


Figure II.18 : Photographie du système de déplacement : (a) Système mécanique, (b) masse, (c) moteur, (d) unité de commande.

II.3.1.5 Matériaux étudiés

Pour l'étude de la neutralisation, nous avons utilisé deux types de matériaux, caractérisés soit par des surfaces irrégulières telles que des granules de PE (polyéthylène), soit par des surfaces lisses telles qu'un film de PP (polypropylène) de 50 ×50 mm² (**Figure II.19**).



(a)



(b)

Figure II.19 : Matériaux de l'étude : (a) granules de polyéthylène (PE), (b) film de polypropylène(PP).

- **Polyéthylène (PE)**

Le polyéthylène est un polymère thermoplastique, translucide, chimiquement inerte (il est plus résistant aux oxydants forts que le polypropylène), facile à manier et résistant au froid. Les trois principales familles de PE sont le HDPE (PE haute densité), le LDPE (PE basse densité) et le LLDPE (PE à basse densité linéaire). Le polyéthylène est un matériau largement utilisé dans l'isolation des câbles et dans les médias filtrants fibreux.

La taille et la forme des grains jouent un rôle très important dans le processus de charge et décharge des couches de granules. En effet, la forme des grains détermine la régularité de la surface de la couche et, par conséquent, l'amplification du champ à la surface. L'arrangement des grains dans la même couche influe sur la conduction de surface soit vers la masse soit latéralement [53].

Pour notre étude nous avons utilisé le polyéthylène haute densité (HDPE) en forme de granules, avec une taille typique d'environ 3mm. La masse des échantillons de PE est de 3.65 g ; ils ont été répartis en monocouche sur une surface de 50×50 mm² entourée par un cadre mis à la masse afin d'assurer la fixation des granules pendant le déplacement. Les échantillons ont été déposés sur une plaque mise à la terre supportée par un système de convoyeur assurant le mouvement aller et retour.

Le **Tableau II.1** représente les principales caractéristiques des granulaires PE utilisés dans tous les expériences.

Tableau II.1 : Caractéristique principales des granulaires de PE utilisés [168].

<i>Densité [g/cm³]</i>	0.93 – 0.97
<i>Couleur</i>	Blanche
<i>Forme</i>	quasi sphérique
<i>Diamètre</i>	2.5 à 3 mm
<i>Permittivité relative ϵ_r à 50 Hz</i>	2.3
<i>Rigidité diélectrique</i>	18
<i>Résistivité transversale ρ ($\Omega.cm$)</i>	10^{14} - 10^{18}
<i>masse volumique moyenne kgm-3</i>	946- 960
<i>Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)</i>	200
<i>Température de fusion (°C)</i>	130
<i>Température maximum d'utilisation Tmax (°C)</i>	60

- **Polypropylène (PP)**

Le polypropylène (PP) est un polymère thermoplastique de grande diffusion, il offre de bonnes qualités de résistance chimique, thermique et électrique et une rigidité diélectrique élevée. Utilisé dans de nombreux secteurs, et en particulier dans l’emballage, l’industrie automobile, l’électroménager, le sanitaire et le textile. Sa production représente plus du cinquième des plastiques produits dans le monde.

Pour l’étude de neutralisation, nous avons utilisé le film de polypropylène de couleur bleu. L’échantillon de PP a une surface de 50×50 mm². Les échantillons ont été déposés sur une plaque mise à la terre supportée par un système de convoyeur assurant le mouvement aller et retour.

Le **Tableau II.2** représente les principales caractéristiques du polypropylène (PP).

Tableau II.2 : Principales caractéristiques du polypropylène (PP) [168, 169, 170].

<i>Permittivité relative ϵ_r à 50 Hz</i>	2.2
<i>Rigidité diélectrique e_v (kV/mm)</i>	300
<i>Résistivité transversale ρ ($\Omega.cm$)</i>	10^{15} à 10^{17}
<i>Masse volumique moyenne (kg.m-3)</i>	0,905
<i>Résistance de rupture diélectrique (kV/mm)</i>	200
<i>Température de fusion (°C)</i>	160-176
<i>Température maximum d’utilisation T_{max} (°C)</i>	110

II.3.1.6 Techniques de mesure et procédures expérimentales

La reproductibilité des résultats expérimentaux impose la reproductibilité des paramètres qui influent sur le processus de neutralisation des matériaux granulaires. Parmi ces paramètres on peut noter : la masse granulaires, l’humidité relative et la température ambiante.

A. Mesure de la masse granulaire

La balance utilisée au cours de cette étude pour la mesure de la masse des granules dans chaque essai est une balance électronique de Marque KERN, Modèle PCB 1000-2 (1000 g / 0.01 g) (**Figure II. 20**).



Figure II.20 : Photographie de la balance.

B. Mesure de la température et de l'humidité relative

L'instrument utilisé avant chaque série d'expériences pour la mesure de la température et de l'humidité relative est un Hygromètre de Marque OTIO, Modèle W010-1 (Figure II.21).



Figure II.21 : photographie du hygromètre numérique.

II.3.2 Protocole expérimental

Les échantillons ont été chargés en utilisant une de ces trois techniques de chargement: triboélectricité, décharge couronne et décharge à barrière diélectrique. Pour assurer une

distribution de charge uniforme, les échantillons ont été déplacés à travers la zone de décharge, à une vitesse de 5 mm / s. Après le chargement, les échantillons ont été transférés sous une sonde électrostatique pour mesurer la distribution du potentiel électrique à la surface de l'échantillon. Après la mesure du potentiel de surface, les échantillons ont été neutralisés à l'aide d'un système DBD. Le matériau chargé a été neutralisé en se déplaçant, avec une vitesse de 5 mm / s, sous l'électrode de neutralisation DBD. Lorsque le processus de neutralisation est achevé, les échantillons sont déplacés à nouveau sous la sonde électrostatique pour la mesure du potentiel de surface après neutralisation.

Plusieurs niveaux de la tension de neutralisation ont été étudiés: $U_n = 10, 12, 14, 16, 18$ et 20 kV. La fréquence de tension a été ajustée à neuf valeurs $f = 1, 20, 50, 100, 200, 400, 600, 800$ et 1000 Hz.

II.4 Influence de la forme d'onde sur l'élimination des charges des granules de polyéthylène par la décharge de barrière diélectrique.

Dans cette partie d'étude, nous utiliserons les mêmes blocs que précédemment pour la neutralisation des charges des granules de polyéthylène (PE), à savoir :

- Le poste de charge électrique ;
- Le poste de mesure de potentiel de surface;
- Le poste de neutralisation des charges électriques.

II.4.1 Installation expérimentale

L'installation expérimentale utilisée dans cette étude ressemble rigoureusement à celle utilisée précédemment, à l'exception de quelques modifications sur le poste de chargement électrique et le poste de neutralisation des charges électriques. La **Figure II.22** illustre le dispositif expérimental.

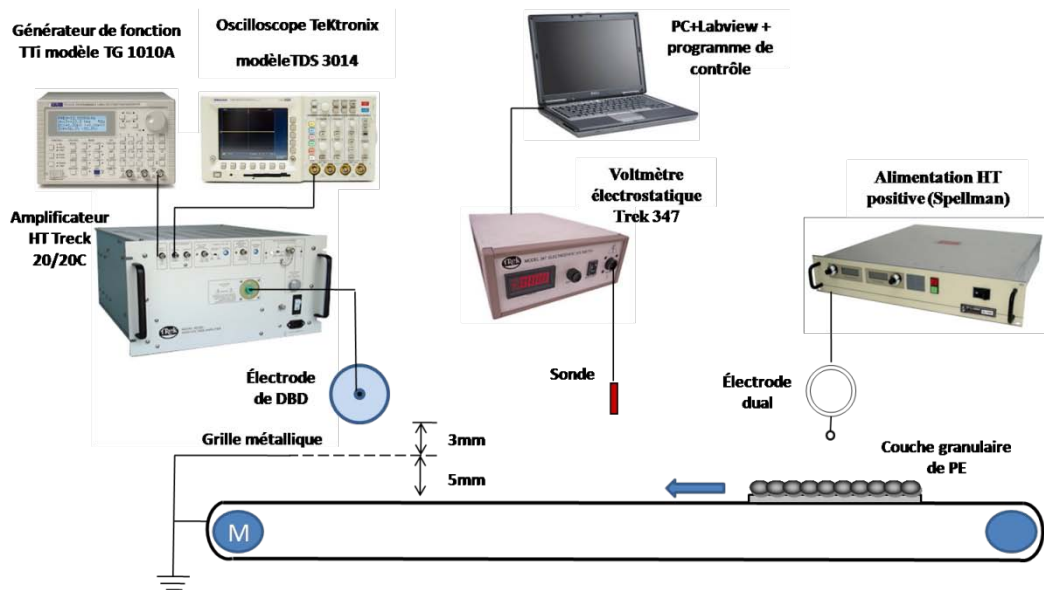


Figure II.22 : Représentation schématique de la configuration expérimentale pour l'étude de l'effet de la forme d'onde de la tension sur l'efficacité de neutralisation des charges des granules de polyéthylène.

II.4.1.1 Poste de charge électrique

Dans cette étude, nous avons utilisés un seul système de charge électrique pour le chargement des granules de polyéthylène (PE) (**Figure II.23**). L'installation à décharge couronne positive utilisée contient les mêmes éléments que précédemment utilisés à savoir :

- Le système des électrodes ;
- L'alimentation électrique (Spellman model SL1200, +100 KV, 1200 w, 12 mA).

La tension de charge utilisée dans toutes les expériences a été ajustée à $V_{ch} = 9$ kV.

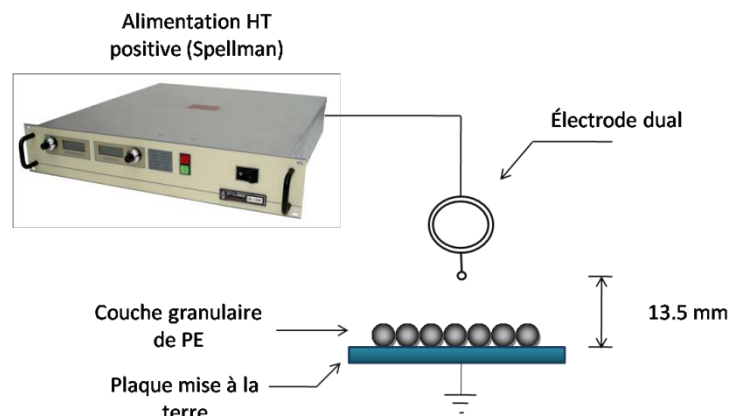


Figure II.23 : Représentation schématique de la décharge couronne de type dual (fil-plan) utilisée pour charger les particules en polyéthylène.

II.4.1.2 Poste de neutralisation

Un seul système d'électrode, la DBD + grille métallique, décrit en détail précédemment (**Figure II. 24**), a été utilisé durant cette partie.

La neutralisation par DBD a été caractérisée par mesure des profils de potentiel pour trois formes d'onde du signal de la tension de neutralisation : forme d'onde sinusoïdale, triangulaire et carrée. Pour chaque cas, plusieurs amplitudes et fréquences ont été appliquées.

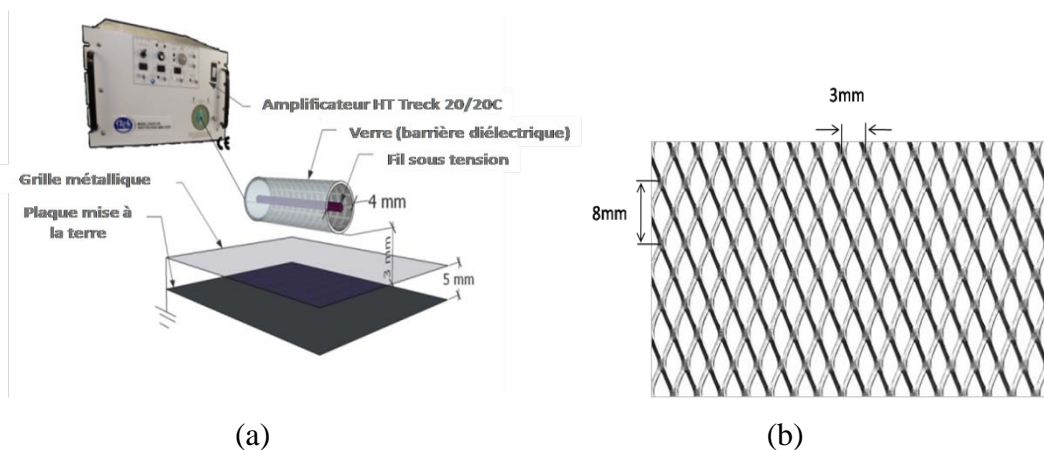


Figure II.24 : Système de neutralisation DBD: (a) représentation schématique, (b) la grille métallique.

II.4.1.3 Echantillon

Les expériences ont été réalisées sur le matériau de polyéthylène granulaire utilisé précédemment. Les particules ont été réparties en monocouche sur une surface de 60 mm × 60 mm. La masse de chaque échantillon était de 5,8 g.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description des installations et de l'instrumentation nécessaire utilisé au cours de ces études. On peut retenir en particulier que :

- L'installation expérimentale qui nous permet d'établir la carte d'identité électrique de la DBD fil-plan conduit à étudier les formes d'ondes typiques de la tension, du courant et de la charge, ainsi de la puissance consommées.
- Un dispositif de génération du plasma froid par DBD a été mis au point afin de contrôler la charge électrique à la surface des matériaux diélectriques granulaires.

- Le banc de mesure réalisé, permet la mesure et l'enregistrement du potentiel de surface afin de pouvoir évaluer le taux de neutralisation.
- Des essais seront réalisés avec plusieurs formes d'ondes de la tension appliquées permettant la validation du signal le plus efficace pour la neutralisation des charges électrostatiques.

Chapitre **III**

CONTROLE DE L'ETAT DE CHARGE DES MATERIAUX DIELECTRIQUES PAR CONTACT ET PAR DECHARGE COURONNE

Dans le présent chapitre, nous allons présenter les résultats réalisées sur deux installations expérimentales de la **Figure II.1**, **Figure II.6** décrites en détail dans le **paragraphe II.1** (voir **Chap. II**). Ces deux installations permettent d'étudier l'élimination des charges sur la surface de matériaux diélectriques par deux méthodes différentes, l'une par contact et l'autre par décharge couronne.

La première technique consiste à neutraliser les films polymères chargés en les mettant en contact avec une plaque métallique sous tension ou une plaque métallique isolée. Cette procédure évite d'utiliser une décharge et les problèmes qui en découlent. Au cours de l'étude, deux types d'électrodes à plaque ont été examinés: une plaque de cuivre simple et une plaque capacitive, fabriquées à partir d'un substrat de circuits imprimés. La neutralisation par contacts a été étudiée en continu et en alternatif, où plusieurs valeurs de tension et de fréquence ont été appliquées.

La deuxième technique consiste à utiliser la décharges couronne pour la neutralisation des charges indésirables créées par effet triboélectrique à la surface des granules de PE. Deux types de configurations d'électrodes sont utilisés : la configuration de type dual et la configuration de type triode (fil-grille-plan). Plusieurs paramètres ont été considérés pendant cette étude tels que : l'amplitude de la tension, la fréquence, et la vitesse de balayage.

III.1 Neutralisation par contact

III.1.1 Plaques mises à la terre

Le déchargement du matériau diélectrique par mise à la terre a d'abord été considéré comme une solution standard et simple. La mise à la terre a été réalisée par le contact entre la surface chargée et les plaques métalliques (forme simple et capacitive). Les résultats obtenus sont montrés sur la **Figure III.1**.

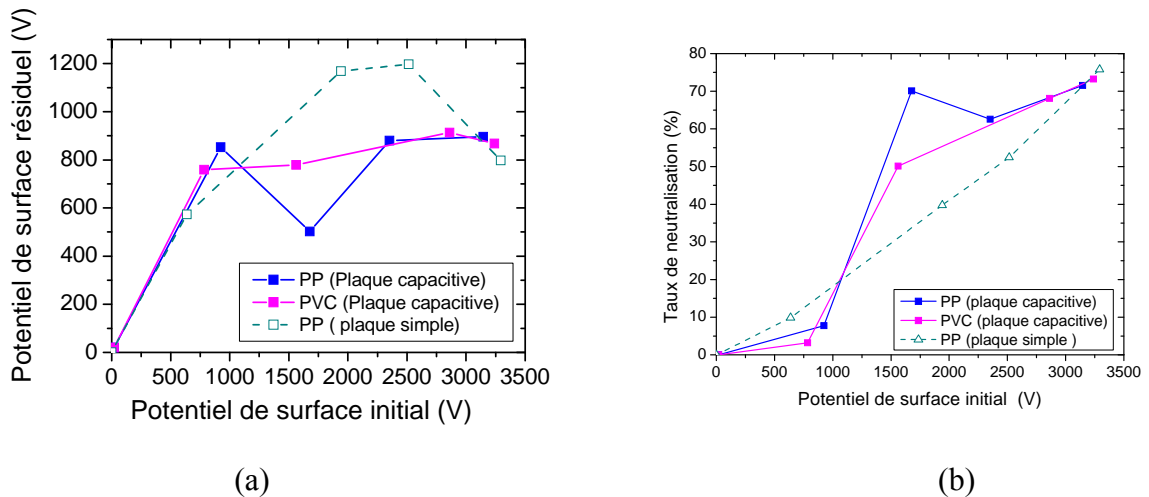


Figure III.1 : Potentiel de surface résiduel et le taux de neutralisation de films mis à la terre à l'aide d'une plaque simple et d'une plaque capacitive.

Les résultats de la mise à la terre, soit par une plaque simple ou plaque capacitive, montrent que l'efficacité de cette méthode dépend de l'état initial de charge du matériau diélectrique. En effet, le taux de neutralisation est de plus en plus important que la charge initiale du matériau diélectrique est élevée. Cependant, aucune neutralisation complète n'a pu être atteinte puisque le taux de neutralisation maximal réalisé était inférieur à 80 %. Selon les valeurs du potentiel résiduel, la mise à la terre du matériau diélectrique réduit le potentiel de surface à une limite où le transfert de la charge vers la terre devient très faible (**Figure III.1 (a)**). Une surface fortement chargée pousserait les charges de surface vers la terre à cause de leur propre champ électrique et les forces de répulsion qui en résultent. Au fur et à mesure de leur réduction, le champ électrique devient moins important et, par conséquent, le transfert de charge est arrêté, ce qui limite le potentiel résiduel à la valeur de champ la plus faible requise pour provoquer un transfert de charges.

III.1.2 Plaques alimentées en courant continu

III.1.2.1 Effet du matériau

La **Figure III.2** montre la variation du taux de neutralisation en fonction de la tension de neutralisation appliquée à une électrode de type plaque capacitive, pour deux matériaux PP et PVC avec deux valeurs du potentiel de surface initial + 3300 V et + 1600 V.

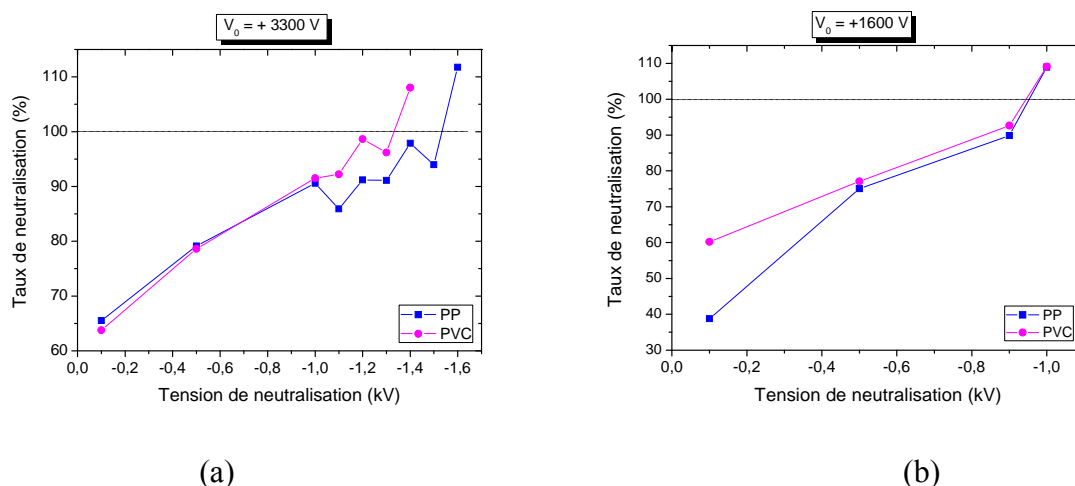


Figure III.2 : Taux de neutralisation obtenus par l'électrode capacitive à deux niveaux de charge initiale (a) + 3300 V, (b) + 1600 V.

Les résultats montrent que le type de matériau n'a pas d'influence significative sur l'efficacité de neutralisation, en particulier à faible niveau de charge (+ 1600 V) (**Figure III.2 (b)**). De l'autre côté, la neutralisation par contact à l'aide d'une électrode capacitive sous tension semble être très efficace puisque les taux de neutralisation réalisés peuvent facilement dépasser 90 % à des valeurs de tension de neutralisation relativement faibles. En effet, les courbes de taux de neutralisation atteignent 100 % à exactement -1,33 kV pour le PVC et -1,53 pour le PP, lorsque leur potentiel initial est de + 3300 V (**Figure III.2 (a)**). À $V_0 = +1600$ V, le taux de neutralisation de 100 % est atteint à -0,943 kV pour le PVC et à -0,946 kV pour le PP, ce qui correspond à peu près à des valeurs proches (**Figure III.2 (b)**). Lors du passage de ces valeurs de tension, les taux de neutralisation dépassent 100 % à 110 %, ce qui signifie que le matériau est entièrement neutralisé et commence à acquérir une charge de signe opposé. Par conséquent, il existe une tension de neutralisation optimale pour chaque niveau de charge. Les matériaux plus chargés nécessitent des tensions légèrement plus élevées pour être parfaitement neutralisés.

III.1.2.2 Influence de l'électrode

La **Figure III.3** présente une comparaison du taux de neutralisation entre une plaque simple et une plaque capacitive en fonction de la tension de neutralisation pour un potentiel de charge initial de + 3300 V.

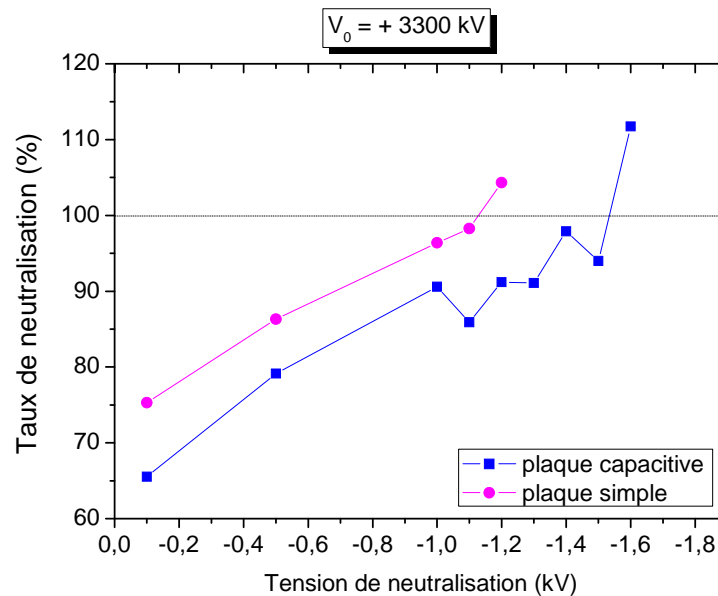


Figure III.3 : Comparaison du taux de neutralisation obtenu par une plaque simple et une plaque capacitive.

Évidemment, pour une même tension de neutralisation, la plaque de cuivre simple peut mieux neutraliser le film diélectrique d'environ 6 % de plus que la plaque capacitive. Ainsi, pour atteindre le même taux de neutralisation l'augmentation de la tension de neutralisation dans le cas de l'électrode capacitive est nécessaire. Par exemple, un taux de neutralisation de 98 % est atteint pour une tension de neutralisation de 1,1 kV avec une plaque simple alors qu'il nécessite une tension de 1,4 kV avec la plaque capacitive, qui est de 300 V en différence. En fait, cette différence peut être négligée dans les applications hautes tensions, ce qui signifie que les deux plaques ont le même niveau d'efficacité et que les deux ont les mêmes performances. Cependant, du point de vue du risque électrostatique, l'électrode capacitive est le meilleur choix, puisque le diélectrique à l'intérieur empêche la connexion directe entre l'alimentation en H.V et la masse.

III.1.2.3 Retour de potentiel

La variation du potentiel de surface enregistrée immédiatement après la neutralisation est illustrée sur la **Figure III.4**

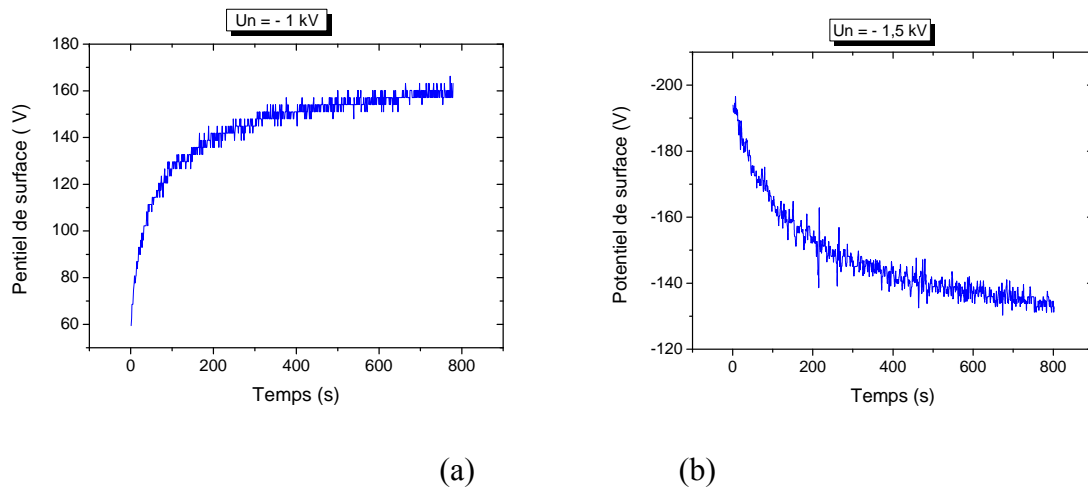


Figure III.4 : Variation du potentiel de surface en fonction du temps juste après neutralisation pour les films PP chargés avec une tension $U_{ch} = + 12.5$ kV pour : (a) $U_n = -1$ kV, (b) $U_n = -1,5$ kV.

Comme le montre la **Figure IV.4 (a)**, lorsque l'échantillon est complètement neutralisé, un phénomène de «retour de potentiel» est observé juste après déconnection de la plaque de neutralisation. Cependant, il faut noter que les valeurs du potentiel enregistrées ne sont pas si importantes. Ce retour de potentiel peut être attribué au retour à la surface des charges pénétrées dans le diélectrique pendant la période de chargement. Lorsque le diélectrique est neutralisé, la surface est alors vide, ce qui attire les charges à l'intérieur du diélectrique pour dériver vers la surface et, par conséquent, provoquer le potentiel de retour [171, 172]. En cas de mauvaise neutralisation (**Figure III.4 (b)**), le potentiel de retour n'a pas été observé mais plutôt un déclin de potentiel.

III.1.3 Plaques alimentées en courant alternatif

Le niveau de charge a été fixé à 2650 V pour ces expériences, tout en faisant varier la fréquence et l'amplitude de la tension de neutralisation.

III.1.3.1 Effet de la tension

La **Figure III.5** montre l'effet de la tension appliquée sur la variation du potentiel de surface résiduelle d'un film PP après neutralisation en utilisant une électrode capacitive alimentée par une tension alternative.

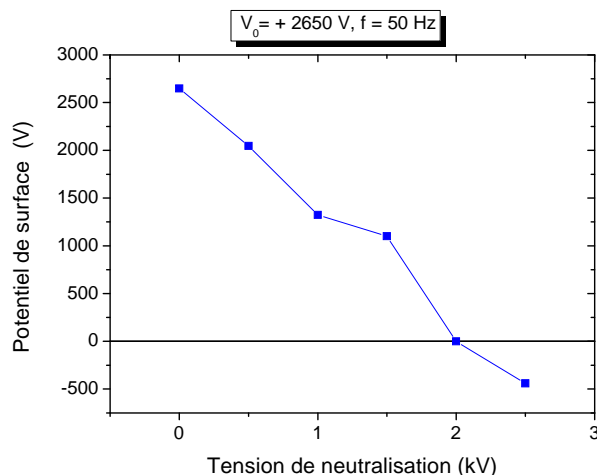


Figure III.5 : Effet de la tension sur la variation du potentiel de surface après neutralisation des films en PP à $f = 50$ Hz avec $U_{ch} = + 8.8$ kV.

Comme le montre la **figure III.5**, à 50 Hz de fréquence, le potentiel de surface résiduel est de plus en plus réduit à mesure que la tension de neutralisation augmente jusqu'à l'élimination complète de la charge à $U_n = 2$ kV, mais au-delà, l'échantillon est rechargé.

III.1.3.2 Effet de la fréquence

La **Figure III.6** montre l'effet de la fréquence sur la variation du potentiel de surface résiduel d'un film PP après neutralisation en utilisant une électrode capacitive alimentée par une tension alternative.

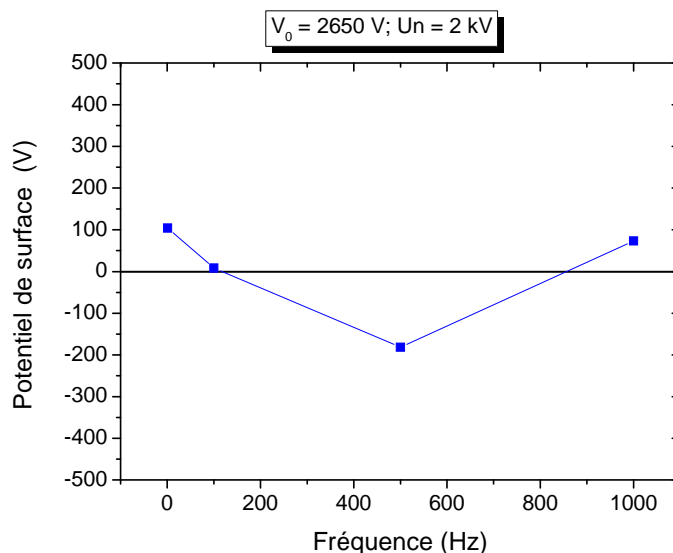


Figure III.6 : Effet de la fréquence sur la variation du potentiel de surface après neutralisation des films en PP à $U_n = 2$ kV avec $U_{ch} = + 8.8$ kV.

En fixant la tension de neutralisation à une valeur optimale ($U_n = 2 \text{ kV}$) et à une fréquence variable, il semble que la fréquence n'a pas d'influence significative sur le processus de neutralisation de contact (**Figure III.6**). En effet, dans la gamme de 0 à 1000 Hz, le potentiel résiduel est limité entre +100 V et -180 V, ce qui correspond à un taux de neutralisation de 96 % et 93 %, respectivement.

III.1.4 Base théorique

La **Figure III.7** représente le circuit électrique équivalent correspondant au moment de contact entre le matériau diélectrique et les plaques considérées (simple et capacitive).

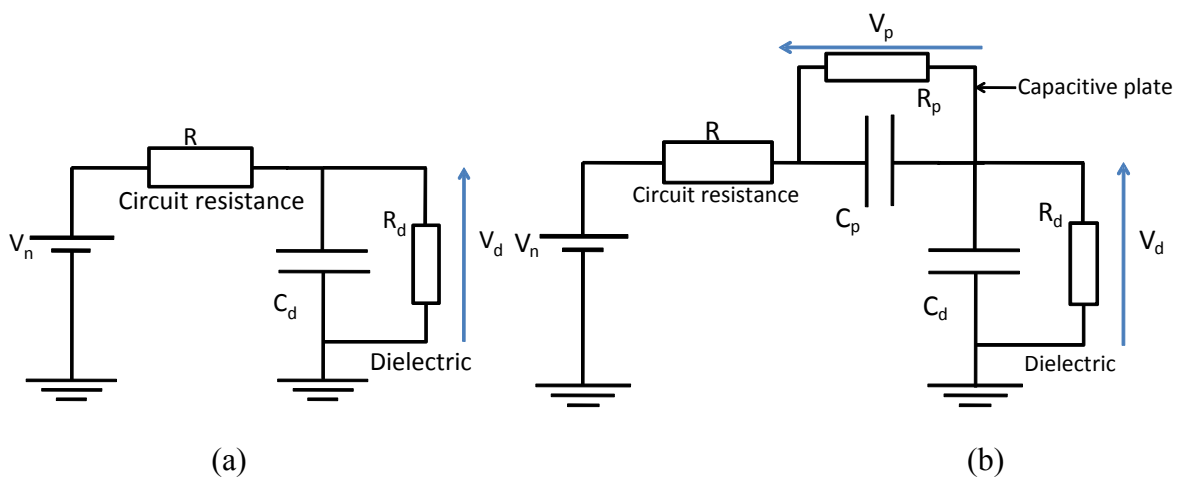


Figure III.7 : Circuit équivalent au moment de la neutralisation: (a) plaque simple, (b) plaque capacitive.

Du fait que les résistances des matériaux diélectriques, que ce soit pour la plaque capacitive « R_p » ou le film « R_d », sont toutes les deux très élevées, elles peuvent être considérées comme infinies, ce qui permet leur élimination du circuit. Dans le cas de la plaque capacitive, le diélectrique chargé et l'électrode capacitive sont en série et traversés par le même courant:

$$I = C_p dV_p / dt = C_d dV_d / dt \quad (\text{III.1})$$

Ce qui donne la relation entre la tension de la plaque et celle du diélectrique V_p et V_d :

$$V_p = V_d \cdot C_d / C_p \quad (\text{III.2})$$

Après une courte période transitoire, le courant dans le circuit devient nul et les tensions sont liées par:

$$V_n = V_p + V_d \quad (\text{III.3})$$

Par conséquent, la tension aux bornes du diélectrique est:

$$V_d = V_n / (1 + C_d/C_p) \quad (\text{III.4})$$

Pour le cas d'une plaque simple (**Figure III.7 (a)**), les tensions sont égales : $V_d = V_n$.

Les équations reliant la tension de la plaque et l'échantillon, montre que la tension aux bornes du diélectrique « V_d » peut être réduite en égalant la tension source à zéro ($V_n = 0$). Selon les résultats présentés ci-dessus, la mise à la terre d'un matériau diélectrique pendant une courte période ne peut pas le décharger parfaitement. Cette non-cohérence entre le modèle capacitif établi et les résultats expérimentaux est due au manque de la prise ne compte des charges piégées du modèle capacitif considéré. En fait, la plupart des charges de surface ne sont pas libres de se déplacer vers la terre, car une partie d'entre elles est piégée et une autre partie peut être injectée à l'intérieur du diélectrique [173]. Lors de la mise à la terre du diélectrique, les charges libres de se déplacer et les charges piégées dans les pièges peu profonds, nécessitant moins de forces, peuvent s'écouler vers la terre, tandis que des charges profondément piégées et injectées à l'intérieur du matériau demeurent dans le matériau. Pour les forcer, une force supplémentaire provenant d'une source externe de signe opposé est nécessaire pour les attirer et les pousser à la surface afin qu'ils puissent être éliminés par recombinaison. C'est la raison pour laquelle la mise à la terre des matériaux isolants est inefficace et, par conséquent, l'utilisation d'une tension opposée pour éliminer les films chargés par décharge couronne est nécessaire.

III.2 Neutralisation par décharge couronne

III.2.1 Effet de temps de chargement :

La **Figure III.8** montre l'effet de temps de chargement par effet triboélectrique sur l'état de charge de surface.

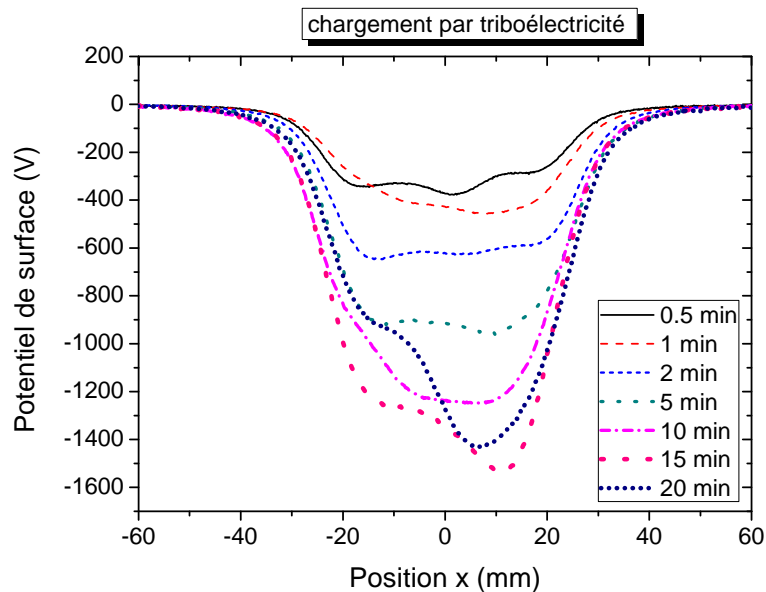


Figure III.8 : Effet du temps de chargement par effet triboélectrique sur le potentiel de surface initial d'une couche granulaire de polyéthylène (PE).

La charge à la surface des granules de polyéthylène devient importante avec l'augmentation du temps de chargement. Au-delà de 15 min la charge, elle devient presque la même, en raison de la saturation du matériau [174].

Le temps de chargement a un effet significatif sur le chargement des matériaux diélectriques par effet triboélectrique. La durée du contact, ou le temps de chargement, est un paramètre qui permet de déterminer la charge accumulée sur la surface des isolants. Cependant, lorsque le temps de chargement est assez long la charge devient la même et le matériau est saturé [174].

III.2.2 Reproductibilité de la charge

La **Figure III.9** montre les résultats de la reproductibilité des essais de la charge par effet triboélectrique pendant 2 min.

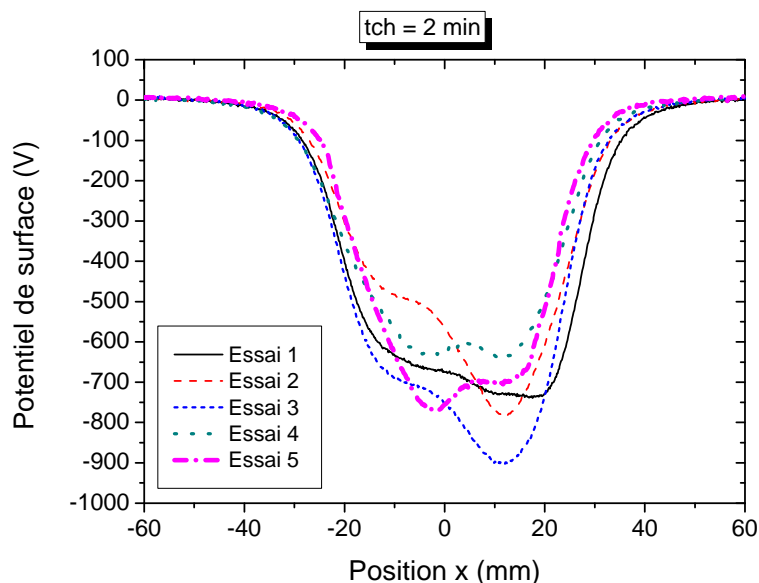


Figure III.9 : Distribution du potentiel de surface des granules de polyéthylène après chargement par effet triboélectrique pendant 2 min.

Le chargement des granules de polyéthylène par effet triboélectrique pendant 2 min a permis d'atteindre un potentiel entre - 650 à - 900 V. La distribution du potentiel de surface des granulaires après chargement par effet triboélectrique n'est pas uniforme. Cette non-uniformité peut être due à l'irrégularité de la couche granulaire. Ainsi la taille et la forme des granules déterminent la surface de contact de sorte que les particules peuvent se charger différemment. Il est constaté que les petites particules se chargent plus vite que les grosses particules [175] et, ainsi, la charge de saturation des petites particules est supérieure à celle des grosses particules [176].

III.2.3 Influence de configuration d'électrode

III.2. 3.1 Effet de la tension

La **Figure III.10** montre les courbes typiques de la distribution du potentiel à la surface des couches de PE avant et après la neutralisation en fonction de la tension de neutralisation.

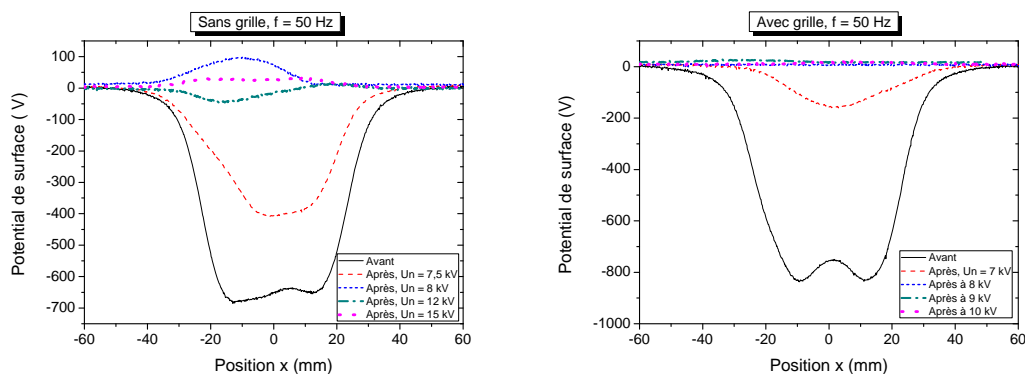


Figure III.10 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation de couches granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectrique : effet de la tension de neutralisation par décharge couronne "fil -plan" à 50 Hz : (a) sans grille, (b) avec grille.

Évidemment, dans le cas de la décharge couronne de type dual, la neutralisation était faible pour des tensions basses. En outre, à une tension plus élevée, le processus a été inversé, le matériau acquiert une certaine charge de polarité opposée au niveau de la surface. Dans le cas de la décharge couronne de type triode, la neutralisation s'améliore progressivement avec l'augmentation de la tension.

La **Figure III.11** montre l'évolution du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée pour les deux situations d'électrodes considérées, c'est-à-dire sans et avec grille.

Avec l'électrode couronne de type dual et pour des tensions faibles, l'électrode n'avait pas la capacité de neutraliser parfaitement le matériau.

Dans le cas de la décharge couronne et pour les deux configurations (décharge couronne de type dual et de type triode), le processus de neutralisation est de plus en plus amélioré en augmentant l'amplitude de la tension appliquée, il est même possible d'atteindre des taux de neutralisation dépassant (100 %), ce qui traduit par un dépôt de charge de signe opposée à la surface de matériau.

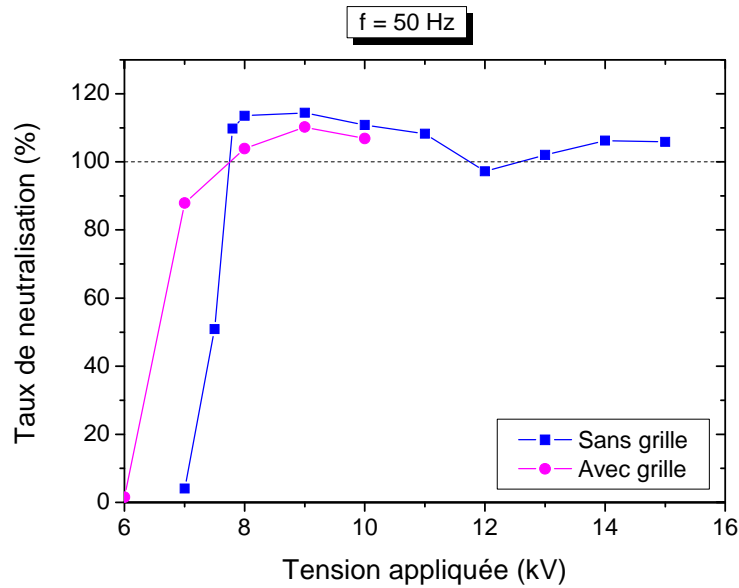


Figure III.11 : Taux de neutralisation en fonction de la tension de neutralisation correspondant à la décharge couronne avec et sans grille, $f = 50$ Hz.

III.2. 3.2 Effet de la fréquence

La **Figure III.12** montre la distribution du potentiel à la surface des granules de PE pour plusieurs valeurs de fréquence à 9 kV pour l'électrode couronne de type dual (**Figure III.12 (a)**) et pour l'électrode couronne de type triode (**Figure III.12 (b)**). Les courbes correspondantes du taux de neutralisation en fonction de la fréquence sont présentées sur la **Figure III.13**.

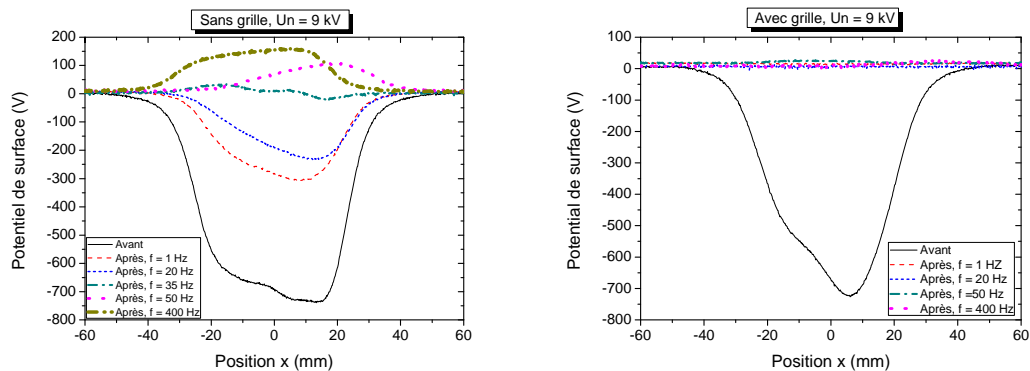


Figure III.12 : Distribution du potentiel de surface avant et après la neutralisation des couches granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectrique; Effet de la fréquence pour la neutralisation par décharge couronne "fil- plan" à 9 kV: (a) sans grille, (b) avec grille.

Comme indiqué dans la section précédente, la grille a une influence significative sur le processus de neutralisation. Sans l'installation de la grille (électrode couronne de type dual), l'effet de neutralisation de charge apparaît à des valeurs de fréquence plus basses (<50 Hz). Le processus de neutralisation est de plus en plus amélioré avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à atteindre une meilleure neutralisation des charges de surface à 35 Hz. Au-delà de cette fréquence, le matériau se charge avec une polarité opposée. En installant la grille (électrode triode), la fréquence n'a pas un effet significatif sur le processus de neutralisation si la tension de neutralisation est fixée à une valeur optimale. Dans ce cas, il est même possible d'atteindre des taux de neutralisation plus élevés compris entre 103 % et 112 % à une tension de neutralisation de 9 kV (**Figure III.13**).

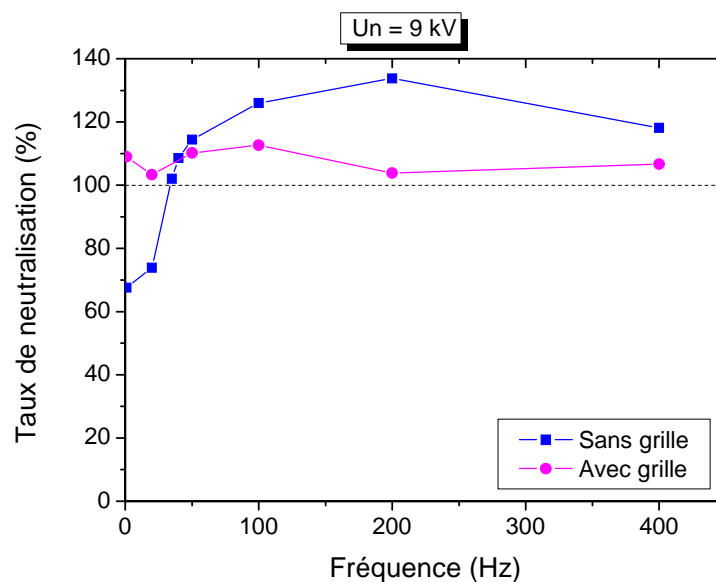


Figure III.13 : Taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à la décharge couronne avec et sans grille, $U_n = 9$ kV.

III.2.4 Influence de la vitesse de balayage

La **Figure III.14** montre la distribution de potentiel de surface après neutralisation des couches de granules de PE chargées par effet triboélectrique. Les couches de granules ont été balayées à différentes vitesses de déplacement sous une décharge couronne générée par une électrode de type dual (sans grille), avec une tension de neutralisation $U_n = 9$ kV et une fréquence $f = 50$ Hz.

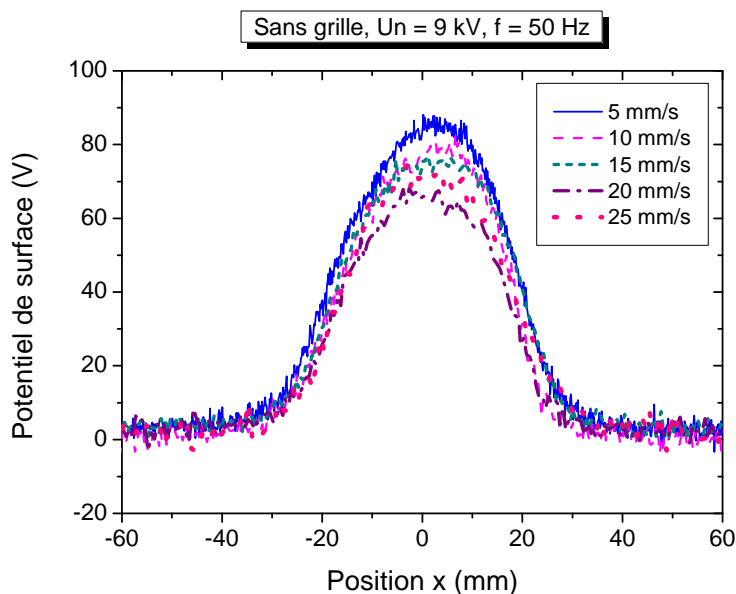


Figure III.14 : Distribution de potentiel de surface après neutralisation de couches granulaires de polyéthylène (PE) chargées par effet triboélectrique à différentes vitesses de déplacement par décharge couronne de type duelle (sans grille) $U_n = 9 \text{ kV}$, $f = 50 \text{ Hz}$.

De même que la fréquence et la tension appliquée à l'électrode corona ont un rôle dans l'amélioration de neutralisation, la vitesse de déplacement sous la décharge contribue sensiblement à l'amélioration l'efficacité du processus de neutralisation. Les résultats présentés sur la **Figure III.14** montrent que le potentiel obtenu après neutralisation diminue légèrement l'efficacité de la neutralisation diminue avec l'augmentation de vitesse de déplacement sous la décharge couronne. Ceci est dû à la durée d'exposition à la décharge et par conséquent la quantité de charges neutralisantes. Par ailleurs, des travaux antérieurs [86] montrent que la neutralisation multiple permet l'obtention d'une meilleure élimination possible de la charge statique. Ce passage multiple permet au matériau d'être exposé à une quantité plus grande de charges générées par la décharge, se traduisant ainsi par une meilleure neutralisation. Ainsi, il est possible de rattraper l'effet de l'augmentation de a vitesse en multipliant les postes de neutralisation.

Conclusion

Les principaux résultats de la neutralisation des films polymères par contact sont résumés comme suit:

- La mise en contact d'un film diélectrique avec une plaque sous tension est une solution très simple, efficace et sûre pour neutraliser les charges de surface.

- La simple plaque de cuivre et la plaque capacitive PCB ont pratiquement les mêmes performances de neutralisation. Cependant, la plaque capacitive est plus sûre que la simple plaque.
- La mise à la terre du film diélectrique ne peut pas neutraliser parfaitement le matériau dans un temps court en raison des charges piégées et injectées. La neutralisation dans ce cas dépend du niveau de charge initial. Les matériaux plus chargés sont mieux déchargés par la mise à la terre des surfaces.
- Des taux de neutralisation élevés atteignant 96 % sont obtenus avec une tension relativement basse (≤ 2 kV).
- L'amplitude de la tension est le seul paramètre qui contrôle le processus de neutralisation par contact. La fréquence n'a pas d'influence significative.

Concernant l'étude de la neutralisation des granules de polyéthylène par décharge couronne on peut tirer les conclusions suivante :

- La charge augmente avec l'augmentation du temps de chargement par effet triboélectrique et devient saturée à des durées plus longues.
- La décharge couronne de type dual n'a pas la capacité de neutraliser parfaitement les charges de surface des matériaux diélectriques à des faibles valeurs de tension appliquée.
- Avec la décharge couronne (pour les deux configurations : électrode de type dual et de type triode), le processus de neutralisation est amélioré avec l'augmentation de l'amplitude de la tension appliquée. Dans ce cas, il est même possible d'atteindre des taux de neutralisation dépassant (100 %) à la fréquence de 50 Hz.
- De même que la fréquence et la tension appliquée à l'électrode couronne qui ont un rôle dans l'amélioration de neutralisation, la vitesse de déplacement sous la décharge contribue sensiblement à l'amélioration de l'efficacité du processus de neutralisation. L'efficacité de la neutralisation diminue avec l'augmentation de vitesse de déplacement sous la décharge couronne.

Chapitre **IV**

CARACTERISATION ELECTRIQUE DE LA DECHARGE A BARRIERE DIELECTRIQUE

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux de la caractérisation électrique du système d'électrode fil-cylindre –plan décrit dans le chapitre II. Les expériences sont réalisées en utilisant l'installation expérimentale de la **Figure II.9**, dont la description détaillée est donnée dans le **paragraphe II.2** (voir **Chap.II**). L'installation permet d'étudier le comportement électrique de la décharge à barrière diélectrique DBD avec grille. A cette fin, des mesures de courant de décharge, de la charge transférée et la puissance consommée ont été réalisées. Trois formes d'onde des signaux de tension ont été considérées: sinusoïdale, triangulaire et carré. L'influence de la grille sur le comportement électrique du système DBD est également mis en évidence pour un régime sinus.

IV.1 Forme d'onde du courant

La **Figure IV.1** montre un exemple typique de l'évolution temporelle de la tension appliquée et du courant de décharge en configuration Fil-Plan pour trois formes d'onde : triangulaire, sinusoïdale et carrée, tracées à 18 kV pour des fréquences de 30 Hz et 300 Hz.

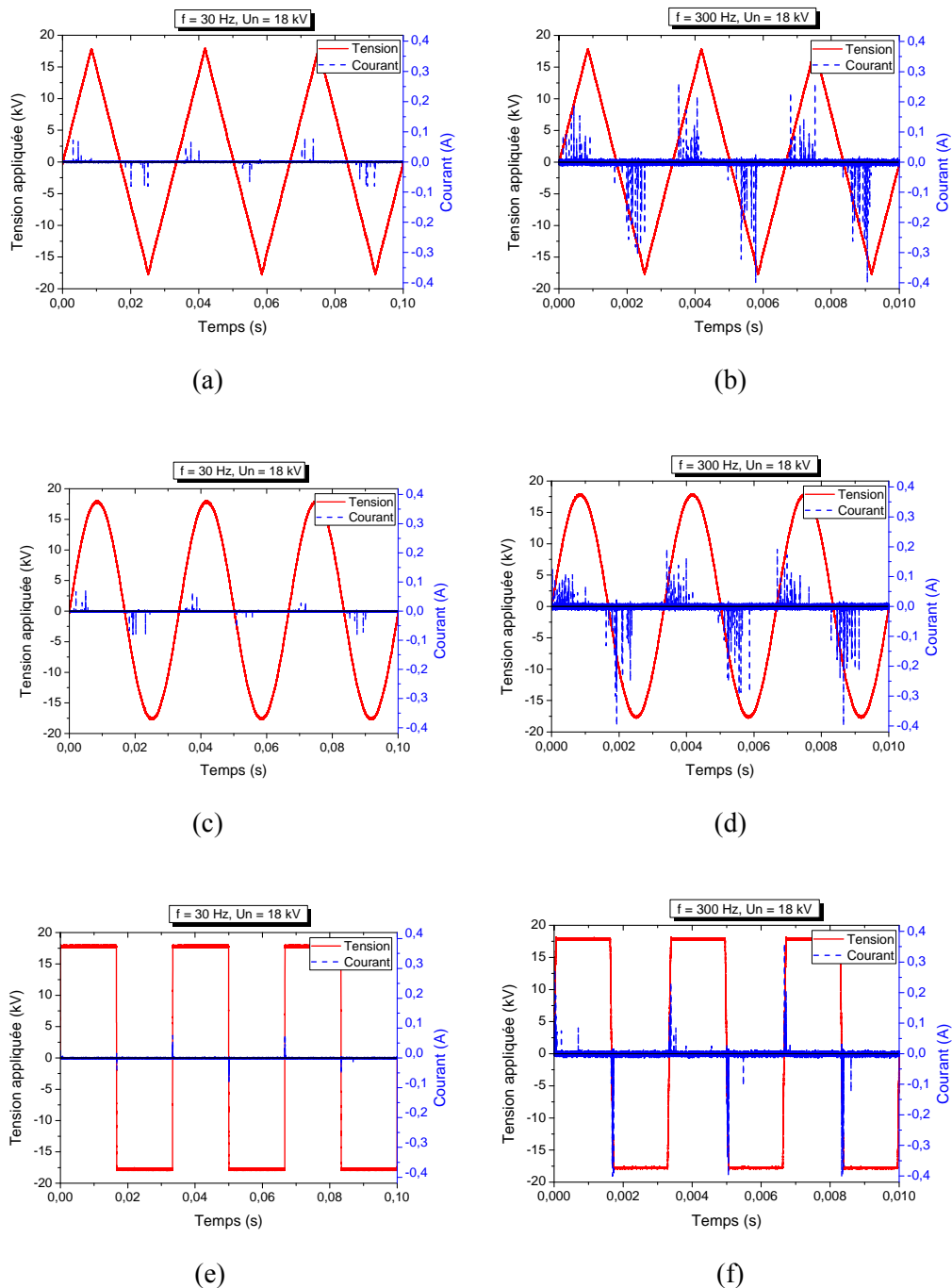


Figure IV.1 : Formes d'onde de la tension appliquée et du courant de décharge en fonction du temps : (a) onde triangulaire à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (b) onde triangulaire à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV, (c) onde sinusoïdale à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (d) onde sinusoïdale à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV, (e) onde carrée à $f = 30$ Hz et $U_n = 18$ kV, (f) onde carrée à $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV.

Évidemment, les formes d'onde du courant sont caractérisées par la présence de nombreuses impulsions de courant plus intenses à 300 Hz que 30 Hz, ce qui signifie que le courant de décharge augmente à mesure que la fréquence augmente. Dans le cas de 300 Hz, les impulsions de courant ont des amplitudes plus importantes en demi-cycle négatif que dans le demi-cycle positif. Par exemple, en tensions triangulaires et sinusoïdales, la valeur des impulsions est d'environ 0,25 A dans le demi-cycle positif et de -0,4 A dans le demi-cycle négatif lorsque $f = 300$ Hz, $U_n = 18$ kV. Ces impulsions de courant représentent l'apparition d'une multitude de streamers qui se développent dans l'intervalle à différents endroits de la surface de la barrière diélectrique [177] et conduisent à la formation d'une multitude de micro-décharges. Les formes d'onde du courant de décharge prouvent que la DBD dans la configuration Fil-Plan à la pression atmosphérique fonctionne en mode « filamentaire ».

Ce comportement est équivalent à celui observé pour une DBD en configuration Plan - Plan [178].

L'évolution de la tension appliquée et du courant de décharge en fonction du temps durant le demi-cycle positif pour trois formes d'onde triangulaire, sinusoïdale et carrée à $f = 300$ Hz $U_n = 18$ kV est présentée sur la **Figure IV.2**.

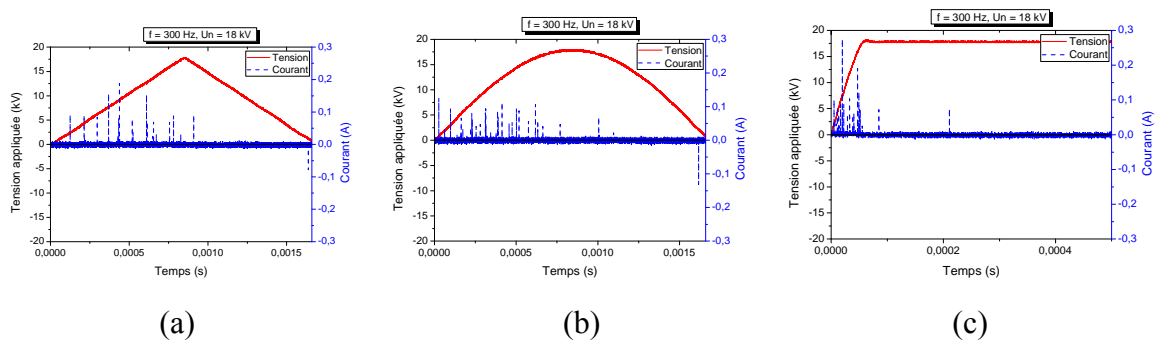


Figure IV.2 : Evolution de la tension appliquée et du courant de décharge en fonction du temps durant le demi-cycle positif pour : (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée. $f = 300$ Hz et $U_n = 18$ kV.

Pendant le temps de montée de la tension entre zéro et la valeur maximale, le champ électrique augmente également et lorsqu'il devient suffisamment intense, le courant augmente rapidement et le premier pic apparaît. En conséquence, les charges électriques injectées dans l'espace inter-électrodes suivent les lignes de champ électrique et commencent à s'accumuler sur la surface de la barrière diélectrique. L'accumulation de charges crée un champ électrique opposée qui diminue l'intensité totale du champ électrique dans l'espace d'air provoquant de cette façon l'extinction de la décharge, par conséquent, le courant diminue.

Durant l'élévation de la tension appliquée, les décharges filamenteuses sont déclenchées après que la tension appliquée atteint la tension d'amorçage de la décharge (**Figure IV.2**). Lorsque la tension appliquée atteint sa valeur maximale, c'est-à-dire qu'il n'y a plus de variation de tension, le courant s'annule (micro-décharges bloquées) en raison des charges accumulées sur la surface de la barrière. De ce fait, les impulsions de courant sont assez limitées à la période de montée de la tension appliquée, un résultat facile à observer dans le cas d'une tension carrée (**Figure IV.2 (c)**).

IV.2 Figures de Lissajous

Nous avons relevé les formes d'ondes de la charge puis tracé les courbes charge-tension (ou courbes de Lissajous) pour chaque cas. Un exemple typique de l'évolution temporelle de la charge et les courbes charge-tension correspondantes pour les trois formes d'onde : triangulaire, sinusoïdale et carrée à $U_n = 16 \text{ kV}$ $f = 1 \text{ kHz}$ sont montrées sur la **Figure IV.3**.

Les courbes de la charge peuvent être décomposées en deux étapes :

- **au cours de l'alternance positive**, la charge transférée augmente avec la tension puis se stabilise après que la tension soit passée par son maximum. Elle reste relativement stable jusqu'à peu après le changement de polarité de la tension ;
- **durant l'alternance négative**, elle évolue jusqu'à ce que la tension atteigne son minimum puis elle redevient stable et le reste jusqu'à peu après le changement de polarité de la tension et le cycle recommence.

Cette décomposition de l'évolution de la charge plutôt simplifiée, traduit des phénomènes plus complexes. En effet la décharge est intermittente : elle respecte des périodes de fonctionnement et de pause successives, identifiables grâce aux tensions d'amorçage et d'extinction de la décharge (**Figure IV.3 (a) (c) (e)**).

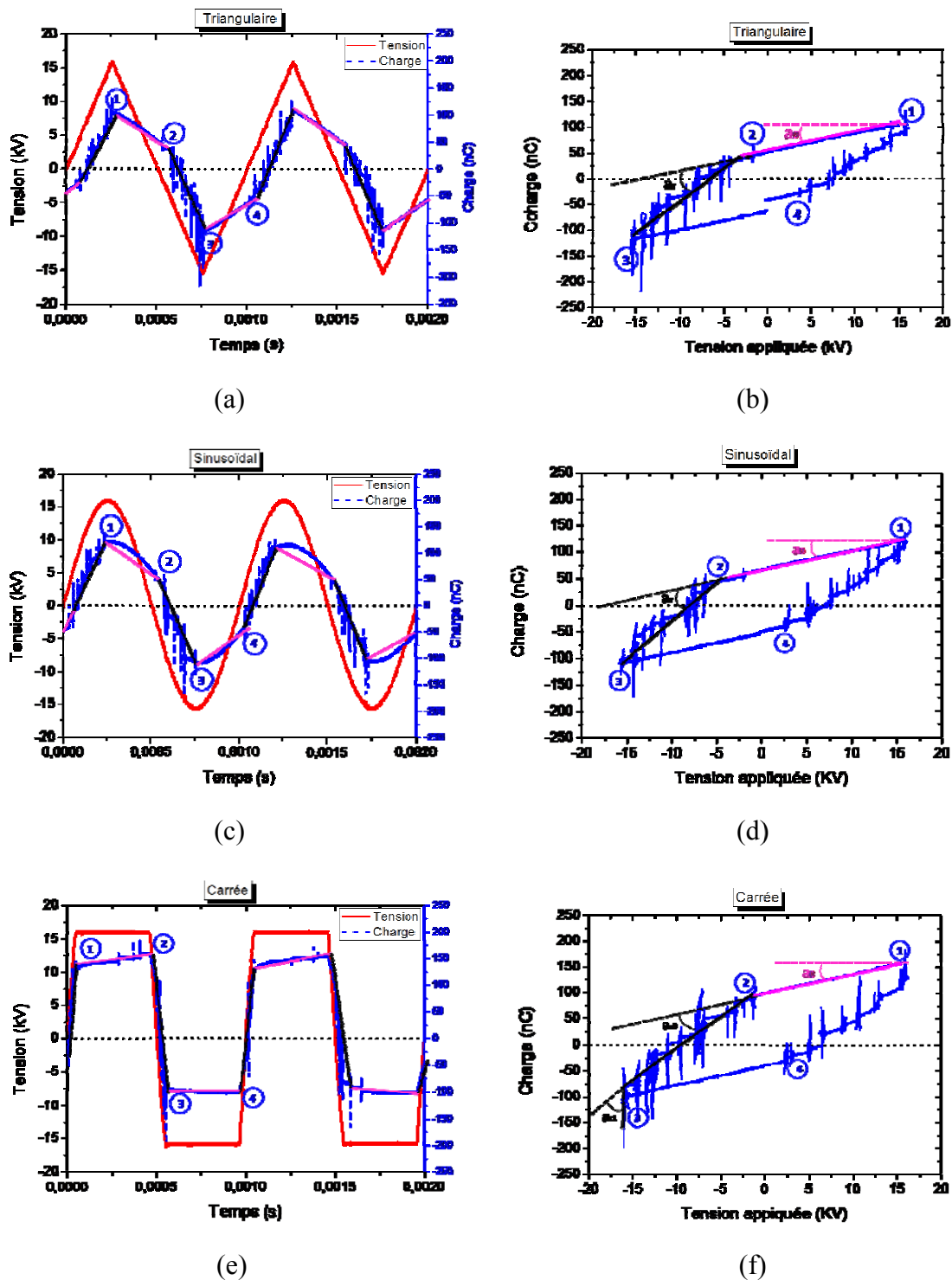


Figure IV.3 : Evolution temporelle de la charge et courbes charge-tension correspondantes pour : (a, b) onde triangulaire, (c, d) onde sinusoïdale, (e, f) onde carrée. $f = 1 \text{ kHz}$ $U_n = 16 \text{ kV}$.

Lorsque la décharge est active, la charge transférée augmente puis atteint une valeur maximale, la décharge s'éteint alors selon le mécanisme d'écrantage du champ électrique extérieur par le champ électrique induit décrit plus tôt. Pendant l'arrêt de la décharge, il n'y a plus de production de charges, la courbe de charge retrouve alors le niveau des charges Q

susceptibles d’être générées par la capacité équivalente C du système en absence de décharge, lorsque cette capacité est soumise à un potentiel V . On retrouve également cette décomposition sur la caractéristique charge-tension dans la **Figure IV.3 (b) (d) (f)**.

Les périodes d’activité et de pause qui y sont représentées permettent de remonter à la capacité du système grâce à la pente du segment les délimitant. Ainsi, la pente représentée par les étapes 1 → 2 et 3 → 4 correspond à la capacité totale du système avec :

$$\frac{1}{C_{total}} = \frac{1}{C_d} + \frac{1}{C_g} \quad (IV.2)$$

C_d : la capacité du diélectrique ;

C_g : la capacité du gaz dans l’espace inter électrodes.

Pendant les étapes 2 → 3 et 4 → 1 la décharge est en activité et la pente correspond à la capacité résultante du système pendant le fonctionnement de la décharge. En configuration fil-plan, la capacité résultante est équivalente à la capacité de la barrière diélectrique (**Figure IV.4**).

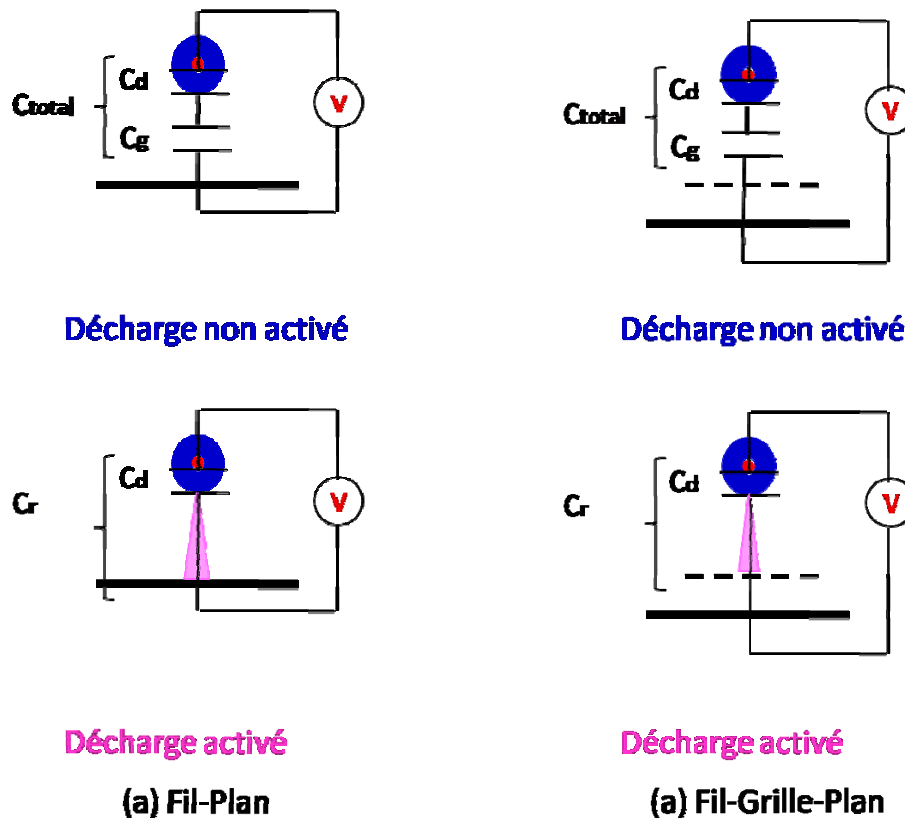


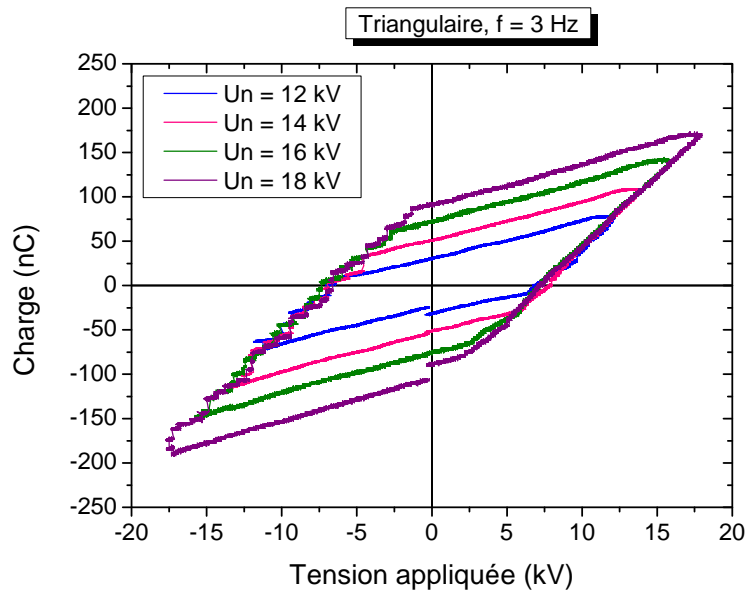
Figure IV.4 : Représentation de la capacité résultante selon l’état de la décharge.

En réalité, dans la configuration fil-plan, lorsque la décharge a lieu, les filaments qu'elle génère «court-circuitent» l'espace gazeux entre la barrière diélectrique et la plaque mise à la terre. Ainsi, la capacité totale du système est équivalente à celle du diélectrique. Elle est plus élevée et demeure inchangée pendant toute la durée du processus, d'où la forte pente constante. Comme on peut l'observer sur la caractéristique **Figure IV.3 (b) (d) (f)**, en configuration fil-plan, l'angle défini par le sommet 3 est pointu, ce qui montre que la décharge s'arrête brusquement au maximum de la tension [89].

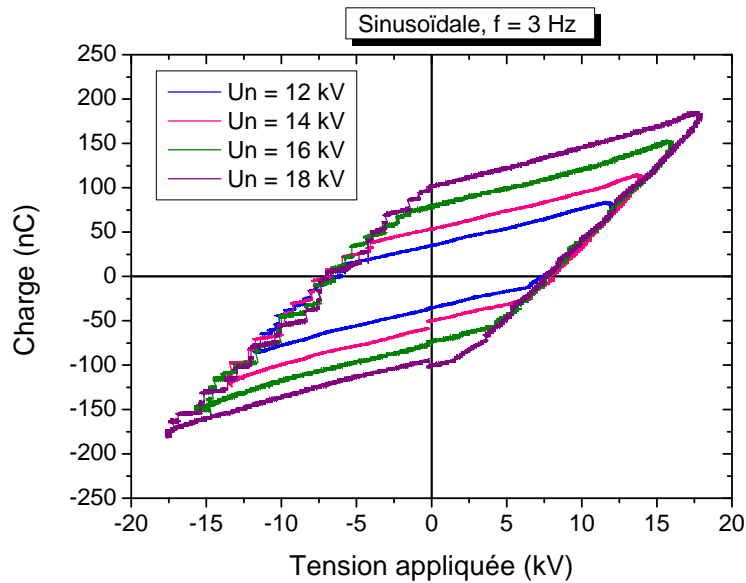
IV.2.1 Influence de la tension sur la charge transférée

IV.2.1.1 Basse fréquence - 3 Hz

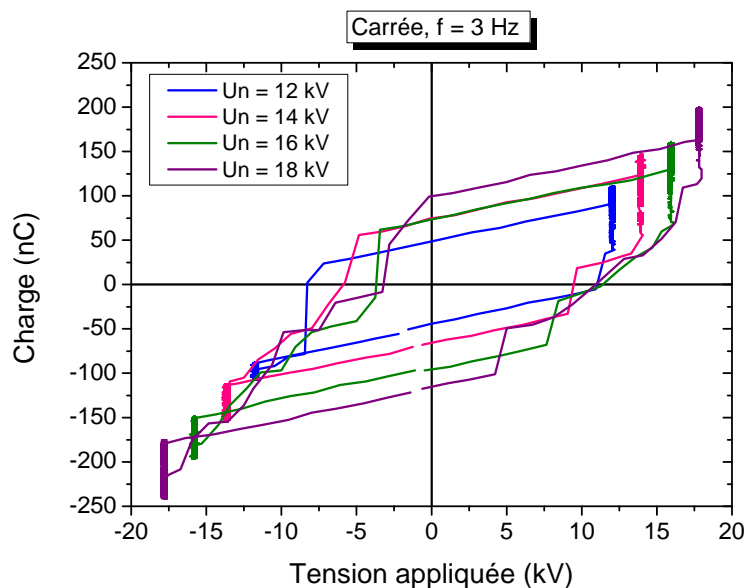
La **Figure IV.5** montre l'évolution de la charge transférée en fonction de la tension appliquée (figure de Lissajous) à différentes tensions appliquées pour les trois formes d'onde triangulaire, sinusoïdale et carrée à 3 Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5 : Courbes de charge-tension pour différentes tensions appliquées à 3 Hz : (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Dans la configuration fil-plan, les courbes de Lissajous enregistrées pour les trois formes d'onde ont une forme proche d'un parallélogramme comme le montre la **Figure IV.5**.

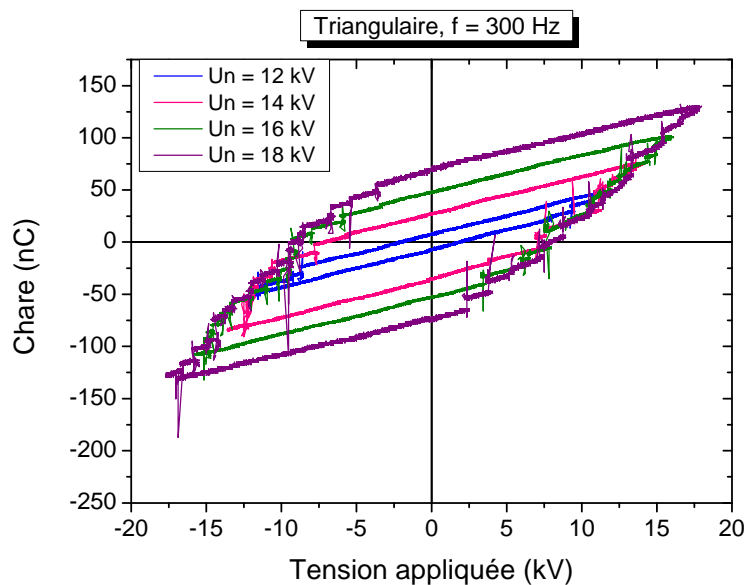
Au cours de la première partie, lors de l'augmentation de la tension, les charges commencent à augmenter du fait de l'accumulation de charges sur le diélectrique (les filaments font un court-circuit dans l'espace gazeux). Après la tension maximale, les charges commencent à diminuer en raison de l'extinction de la décharge. Ensuite, pendant le demi-

cycle négatif, la décharge s'allume à nouveau (des charges négatives commencent à s'accumuler sur le diélectrique).

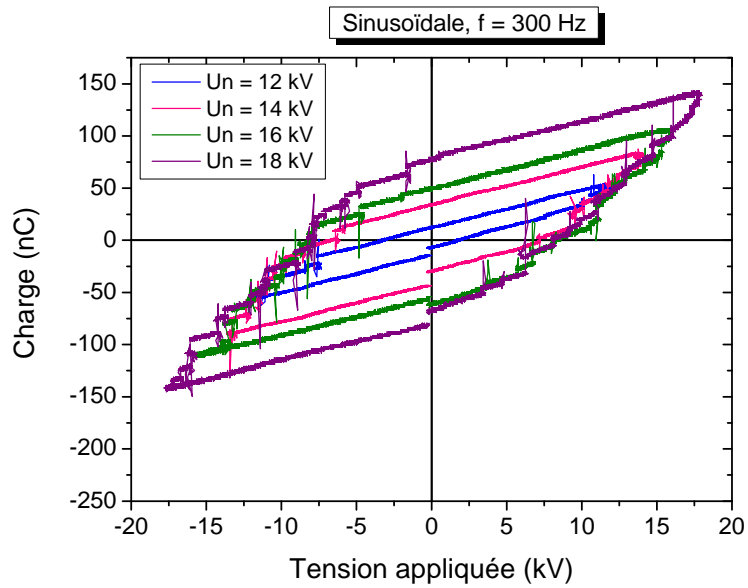
L'aire de la courbe charge-tension augmente avec la tension appliquée indépendamment de la forme d'onde de la tension appliquée, ce qui signifie que l'énergie par cycle augmente. Ce point sera discuté plus en détail dans la section IV.3 de ce chapitre.

IV.2.1.2 Fréquence moyenne - 300 Hz

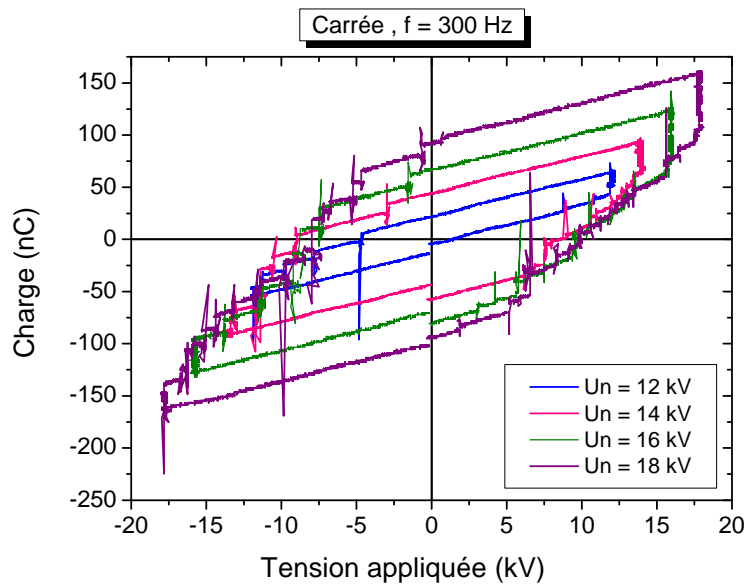
La **Figure IV.6** montre les courbes concentriques de l'évolution de la charge transférée en fonction de la tension appliquée (figure de Lissajous) à différentes tensions appliquées pour les trois formes d'onde triangulaire, sinusoïdale et carrée à 300 Hz.



(a)



(b)



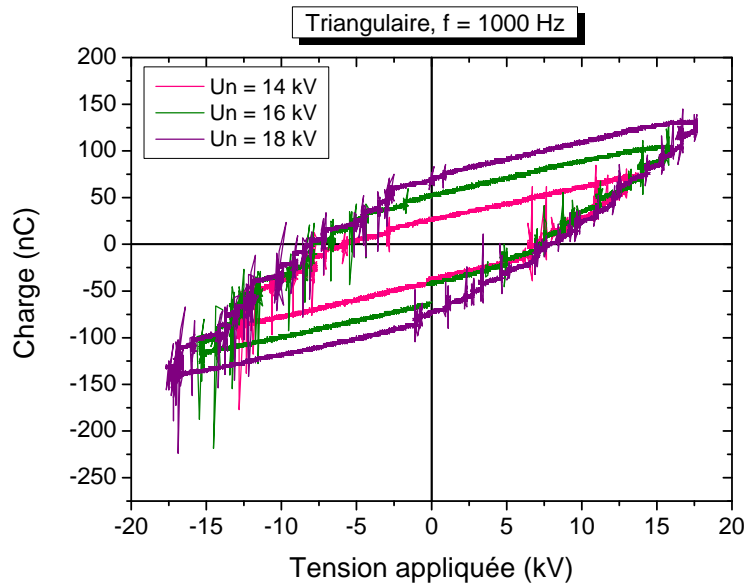
(c)

Figure IV.6 : Courbes de charge-tension concentriques pour différentes tensions appliquées à 300 Hz : (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

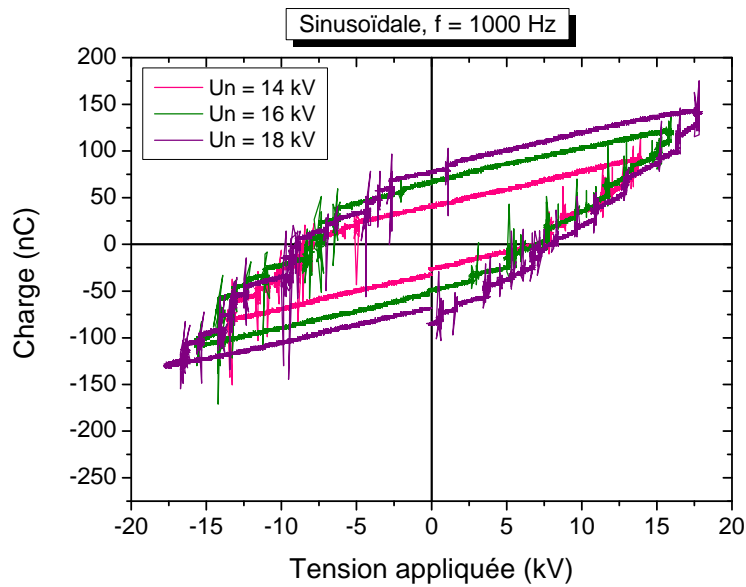
L'augmentation de la fréquence de 3 Hz à 300 Hz pour une tension fixe implique également une augmentation de l'amplitude et le nombre des impulsions de courant de décharge pour les trois formes d'onde, mais l'aire du cycle diminue.

IV.2.1.3 Fréquence relativement élevée - 1000 Hz

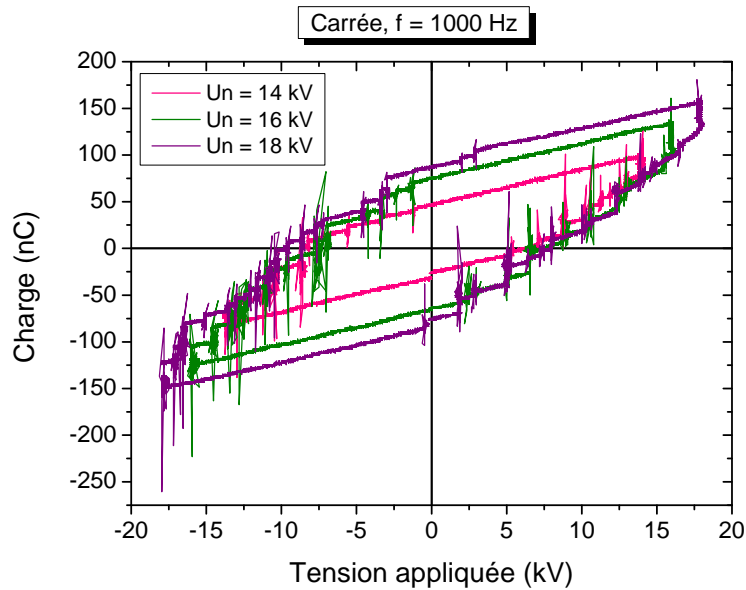
La **Figure IV.7** montre les courbes concentriques l'évolution de la charge transférée en fonction de la tension appliquée (figure de Lissajous) à différentes tensions appliquées pour les trois formes d'onde triangulaire, sinusoïdale et carrée à 1000 Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.7 : Courbes de charge-tension concentriques pour différentes tensions appliquées à 1000 Hz : (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Lorsque la fréquence est encore augmentée de 300 Hz à 1000 Hz, l'augmentation du nombre d'impulsions de courant de décharge est clairement visible. L'aire du cycle reste presque inchangée.

L'information donnée par la caractéristique charge-tension, telle que présentée ci-dessus, est dépourvue du caractère variable de la fréquence. Dans ce qui suit, nous montrons son comportement selon la fréquence appliquée.

IV.2.2 Influence de la fréquence sur le transfert de charges

L'effet de la fréquence peut être aussi bien analysé à partir de la forme d'onde du courant que de la caractéristique charge-tension. L'analyse de la forme d'onde du courant montre, dans la configuration fil-plan, que l'élévation de la fréquence a pour conséquence un courant plus important (amplitude et nombre des pics plus importants). Visuellement, cela se traduit par une intensification de l'activité de la décharge.

Les résultats ci-dessous présentent l'évolution de la charge en fonction de la tension (Courbes de Lissajous) obtenus pour différentes fréquences. Nous discuterons les résultats pour chaque forme d'onde selon la gamme de fréquence.

IV.2.2.1 Forme d'onde triangulaire

La **Figure IV.8** montre l'effet de la fréquence sur la caractéristique charge-tension pour la forme d'onde triangulaire à 14 et 18 kV. En configuration fil-plan, l'aire du cycle augmente également avec l'élévation de la fréquence dans la gamme de fréquence de 1 Hz à 10 Hz à 14 kV et 18 kV (**Figure IV.8 (a) (c)**), puis atteint une valeur critique au-delà de laquelle elle commence à diminuer (dans la gamme de 10 Hz à 1000 Hz). Sa décroissance est lente à 14 kV (**Figure IV.8 (b)**) par contre, pour des tensions plus élevées sa diminution devient un peu visible, ce qui peut être remarqué à 18 kV sur **Figure IV.8 (d)**.

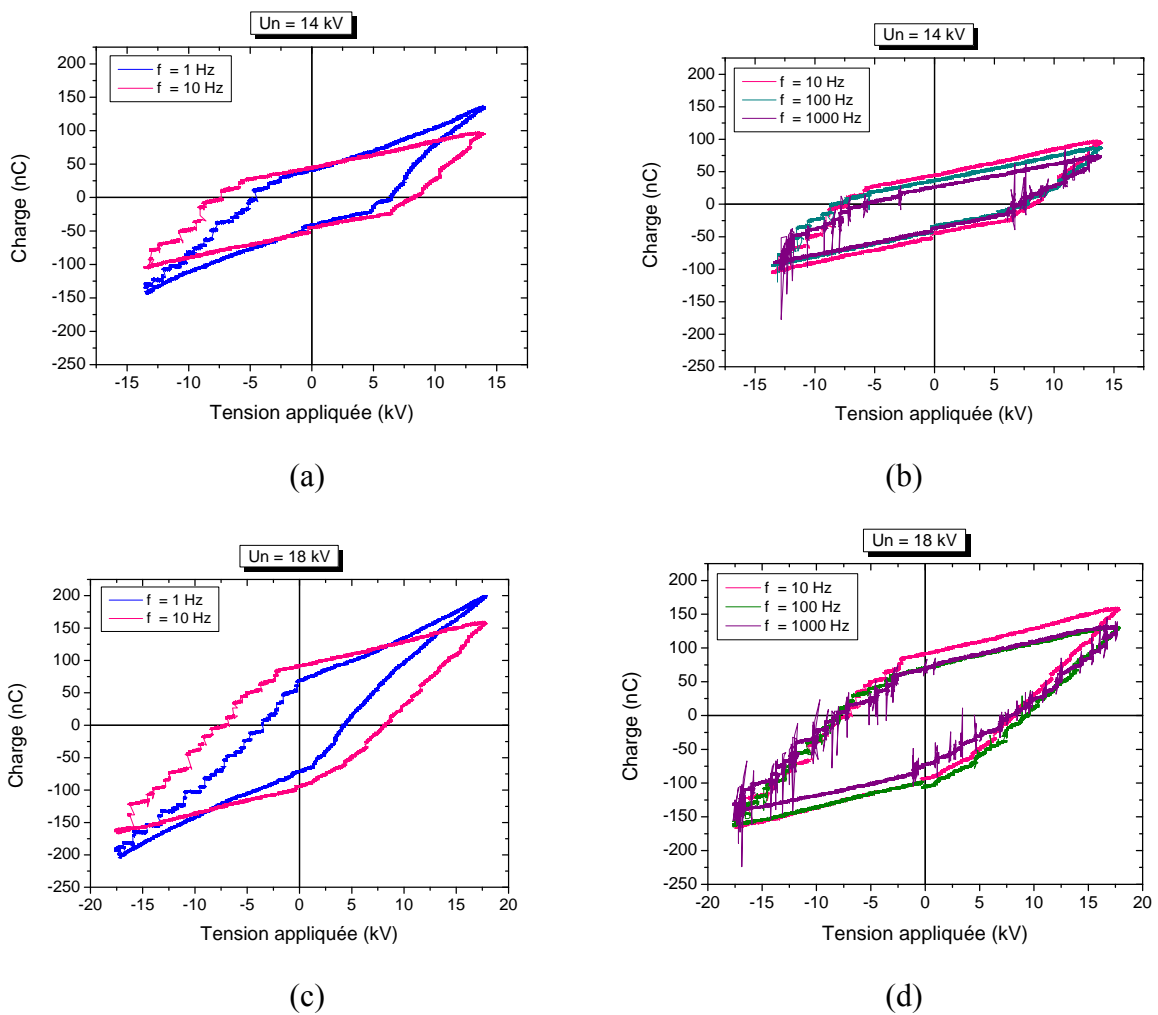


Figure IV.8 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d'onde triangulaire.

IV.2.2.2 Forme d'onde sinusoïdale

La **Figure IV.9** présente l'effet de la fréquence sur la caractéristique charge-tension pour la forme d'onde sinusoïdale à 14 et 18 kV. La variation de la charge-tension en fonction de la fréquence pour la forme d'onde sinusoïdale est similaire à la forme d'onde triangulaire.

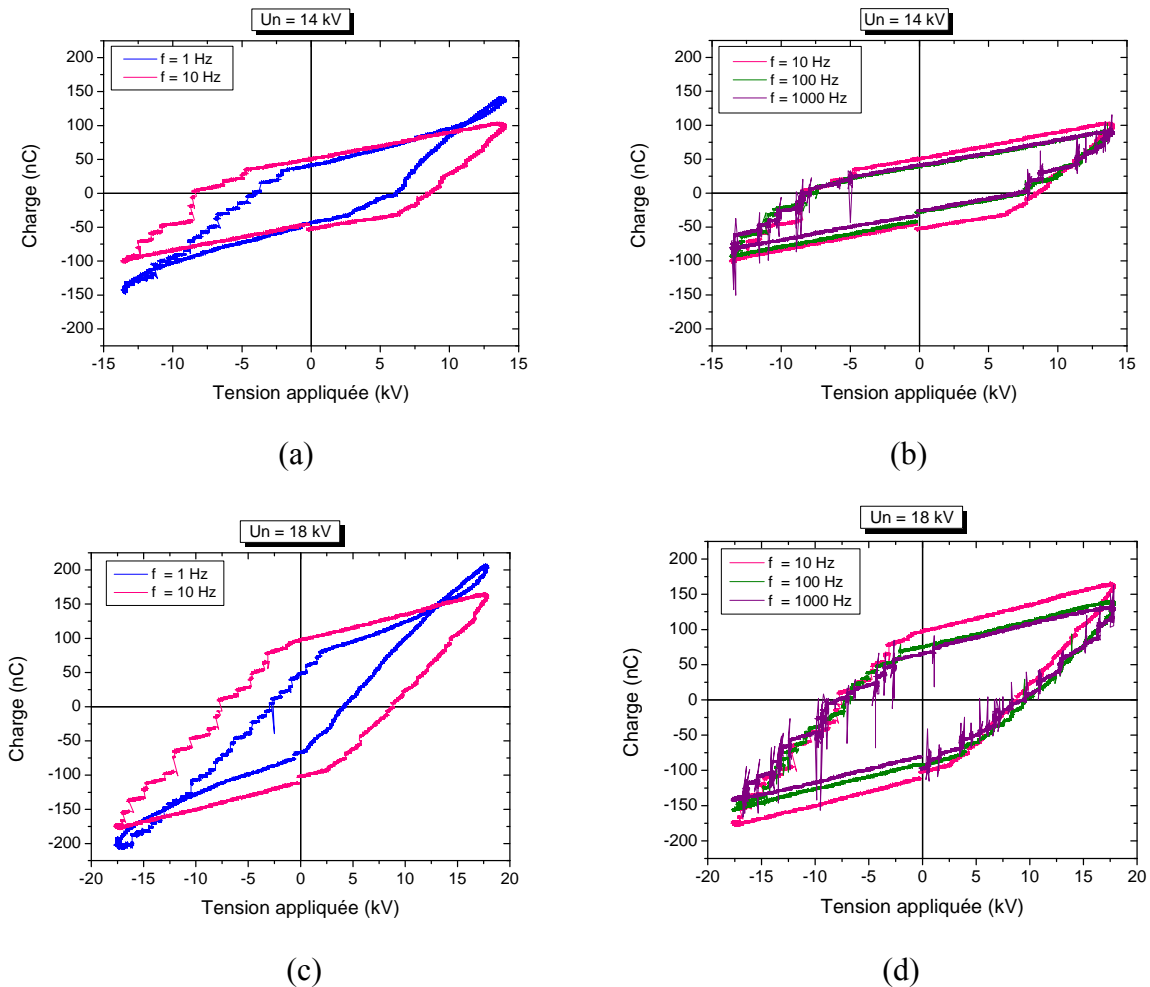


Figure IV.9 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d'onde sinusoïdale.

IV.2.2.3 Forme d'onde carrée

La **Figure IV.10** montre l'effet de la fréquence sur la caractéristique charge-tension pour la forme d'onde carrée à 14 et 18 kV. Les mêmes observations sont obtenues sur l'évolution de l'air du cycle en fonction de la fréquence pour la forme d'onde Carrée. L'augmentation de la fréquence n'impacte pas la charge générée par cycle ce qui traduit une similarité de l'énergie par cycle quelle que soit la fréquence.

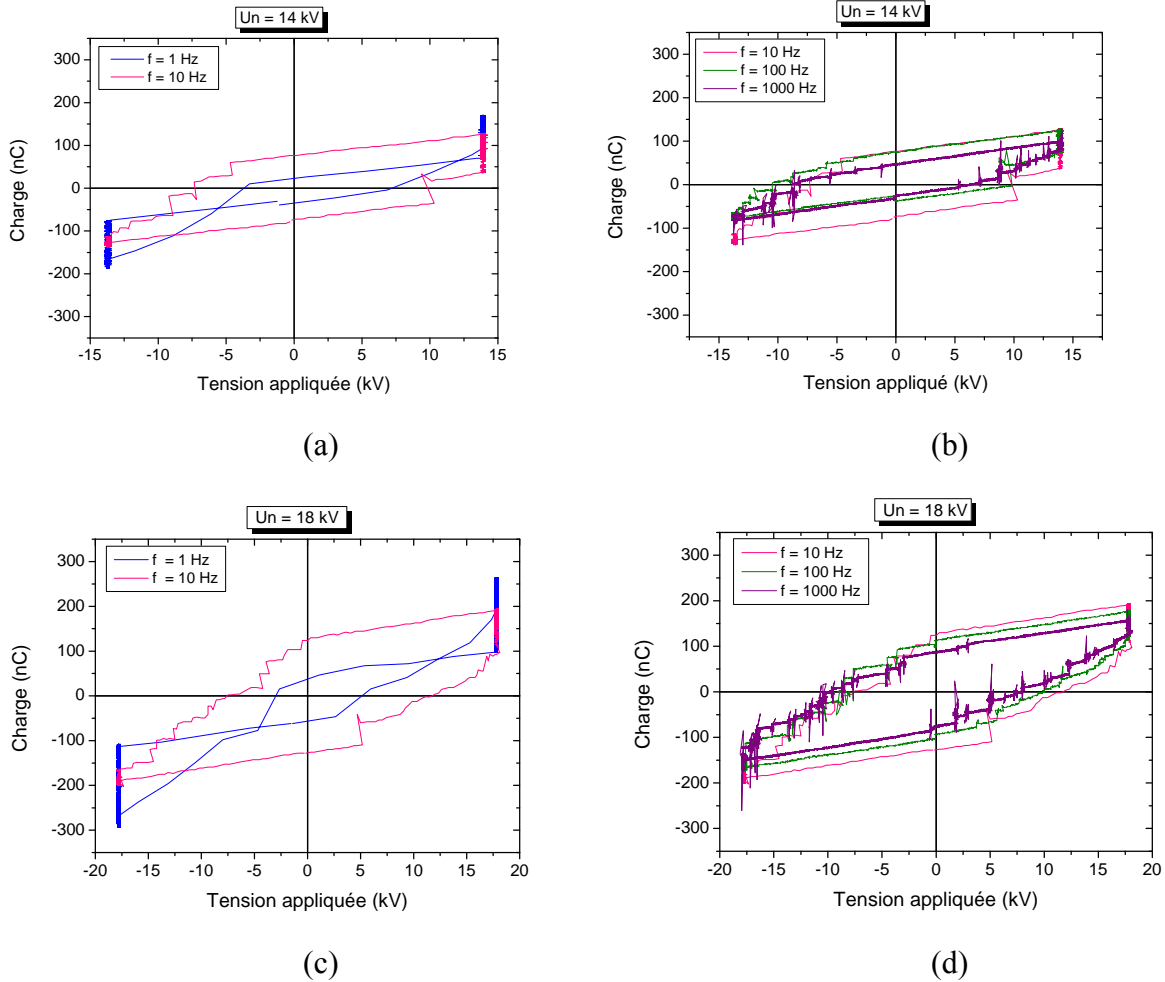


Figure IV.10 : Courbes de charge-tension (Courbes de Lissajous) pour plusieurs fréquences à 14 kV et 18 kV pour une forme d’onde carrée.

IV.3 Puissance consommée

Il existe deux façons pour calculer la puissance consommée par la décharge. La première est la méthode du produit instantané calculée en faisant le produit de la tension appliquée par le courant de décharge. Il s’agit d’une valeur moyenne donnée par la relation ci-après :

$$P = \frac{1}{nT} \int_0^{nT} u(t).i(t).dt \tag{IV.3}$$

avec,

P : puissance moyenne consommée par la décharge (W)

T : période du signal (s)

$u(t)$: tension appliquée (V)

$i(t)$: courant de décharge (A)

n : nombre de périodes entières du signal.

La deuxième est la méthode de Lissajous qui permet de déterminer la puissance consommée à partir de la caractéristique charge-tension (cycle Lissajous) du circuit, tels que la puissance consommée moyenne (P) de la décharge DBD est le produit de la charge (Q) par la tension (V) sur un cycle (T), donnée par l'équation suivante:

$$P = \frac{1}{T} \cdot \oint Q \cdot dV \quad (IV.4)$$

Des études ont montré que ces deux méthodes donnent des résultats concordants [179]. Dans le cadre de cette étude, la méthode de Lissajous est adoptée, car elle est moins sensible aux perturbations sur le signal mesuré compte tenu du régime de décharge clairement filamentaire. En fait, l'aire des courbes de Lissajous représente l'énergie consommée par le DBD au cours d'un cycle. Ainsi, la puissance moyenne est l'aire de la courbe de Lissajous multipliée par la fréquence.

IV.3.1 Influence de la tension

La **Figure IV.11** montre l'effet de l'amplitude de la tension appliquée sur la consommation moyenne de l'énergie pour les formes d'onde triangulaires, sinusoïdales et carrées pour trois niveaux de fréquence 3 Hz, 300 Hz et 1000 Hz.

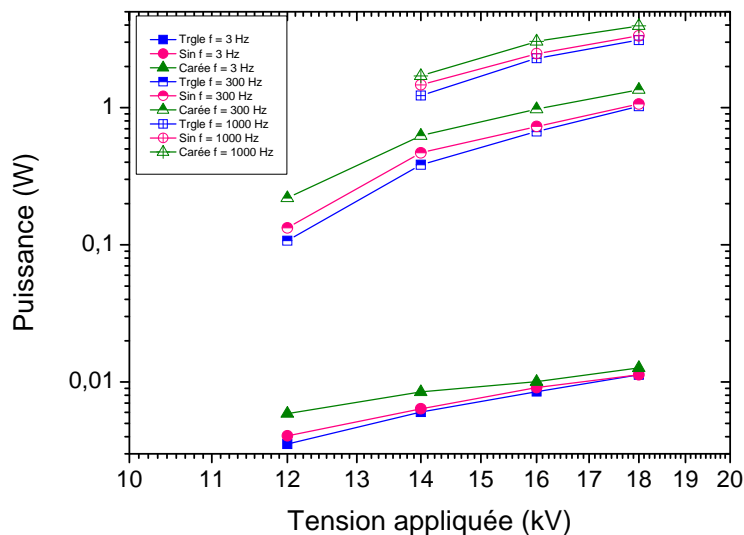


Figure IV.11 : Effet de la tension appliquée sur la puissance consommée moyenne pour $f = 3$ Hz, 300 Hz et 1000 Hz.

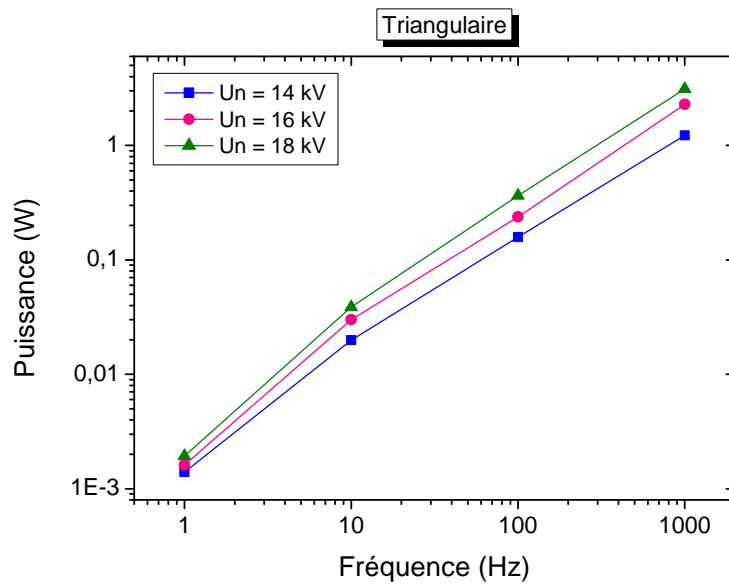
La consommation d'énergie est de plus en plus importante avec l'augmentation de la tension appliquée pour les trois formes d'onde et quelle que soit la valeur de la fréquence. En

effet, l'augmentation de la tension appliquée conduit à la création d'un grand nombre de micro-décharges permettant un transfert d'énergie plus élevée ; en conséquence, la consommation d'énergie augmente.

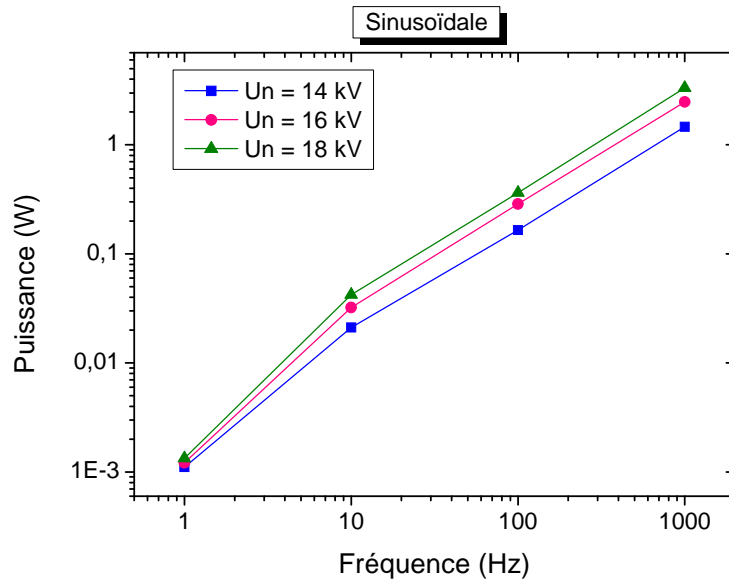
On peut voir que la consommation de puissance est plus élevée pour les hautes tensions carrées que pour les sinusoïdales et les triangulaires. L'explication de ce résultat peut être attribuée au fait que la tension appliquée reste sur un niveau importante sur quasiment toute une demi-période dans le cas d'une onde carrée.

IV.3.2 Influence de la fréquence

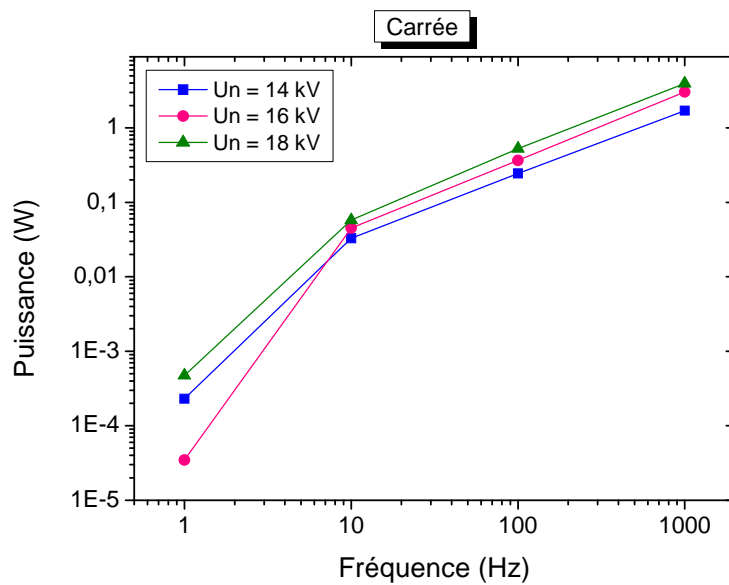
L'effet de la fréquence sur la consommation moyenne de puissance à différentes amplitudes est présenté sur la **Figure IV.12**.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.12 : Effet de la fréquence sur la puissance consommée moyenne pour trois niveaux de tension appliquée $V = 14 \text{ kV}$, 16 kV et 18 kV : (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

On peut voir que la consommation de puissance est plus importante pour les hautes fréquences. Ce résultat s'explique par l'augmentation du nombre de cycles / unité de temps avec une fréquence croissante.

Pour des raisons d'illustration, la courbe puissance est représentée sur une échelle bi-logarithmique (log-log sur les deux axes de coordonnées). La représentation en échelle linéaire a toutefois révélé qu'elle a une variation quasi-linéaire. Ceci fournit une indication sur l'importance de la fréquence sur le comportement électrique. On retrouve également l'effet de la tension sur ces courbes.

Ces résultats concordent avec les résultats obtenus dans la **Figure IV.8, 10, 11**. En effet, dans la configuration Fil-Plan, l'énergie par cycle est la même quelle que soit la fréquence. De cette façon, la puissance moyenne est parfaitement linéaire avec la fréquence à partir de la fréquence 10 Hz.

IV.3.3 Influence de la grille

La **Figure IV.13** montre l'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée à 1 kHz pour la forme d'onde sinusoïdale.

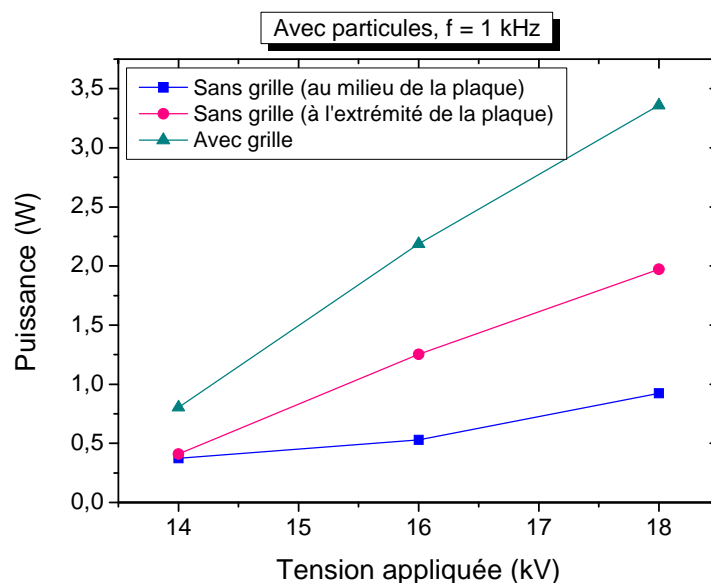


Figure IV.13 : L'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée pour la forme d'onde sinusoïdale à $f = 1$ kHz.

Les courbes de puissance électrique consommée en fonction de la tension évoluent d'une manière quasilinéaire.

La puissance électrique consommée dans le cas de la DBD avec grille est supérieure à celle consommée dans le cas d'une simple DBD (sans grille). D'autre part, la puissance

électrique dans le cas de la barrière installée au milieu de la plaque est plus faible par rapport à la barrière installée à l'extrémité de la plaque.

Ceci s'explique par la charge transférée plus importante dans le cas de la DBD avec grille, par contre dans le cas d'une simple DBD la charge transférée est faible ce qu'on voit sur la **Figure IV.14**.

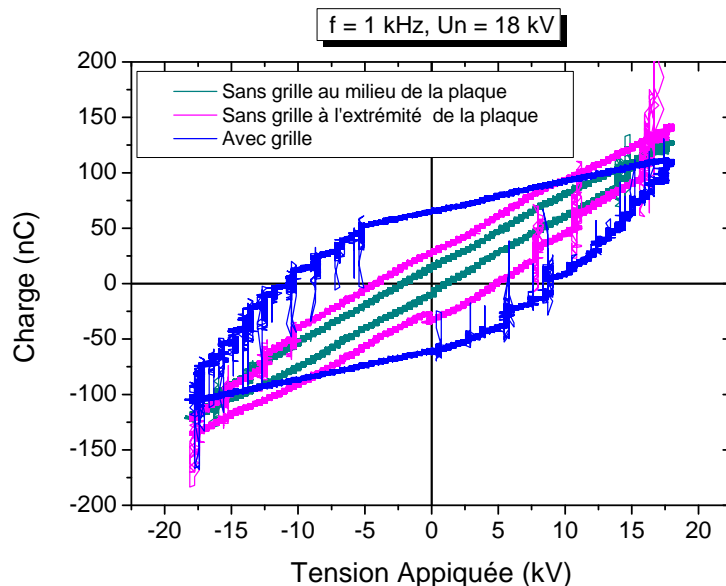
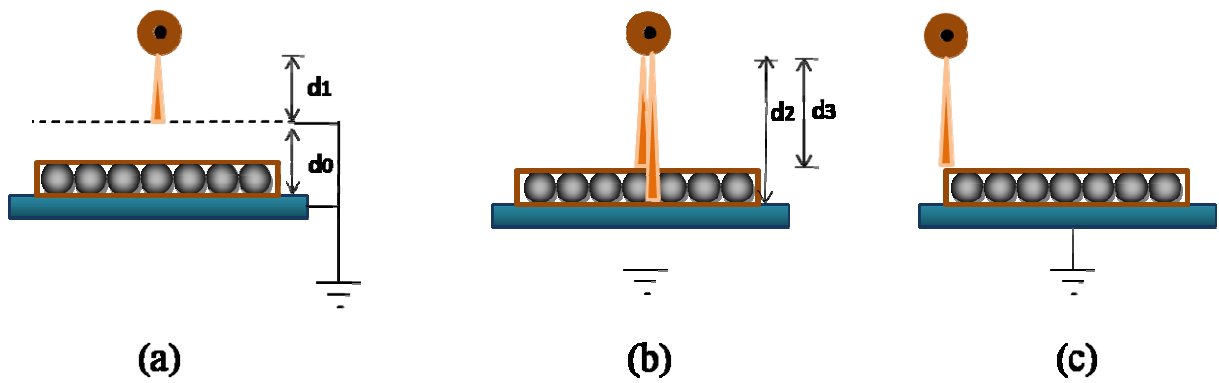


Figure IV.14 : Courbes de charge-tension pour une DBD avec grille et une simple DBD (sans grille) au milieu et à l'extrémité de la plaque pour la forme d'onde sinusoïdale à $f = 1$ kHz, $U_n = 18$ kV.

En effet, l'insertion de la grille métallique entre la barrière diélectrique et le plan de masse entraîne une modification de l'espace gazeux (la distance entre la barrière et le plan de masse est réduite), ce qui conduit à l'intensification de champ électrique à proximité de la barrière, entraînant automatiquement l'augmentation du courant de décharge (l'intensification des impulsions de courant) (**Figure IV.15 (a)**). Dans le cas d'une simple DBD (sans grille) ou le cas de la barrière installée à l'extrémité de la plaque, la distance devient plus petite que dans le cas où la barrière installée au milieu de la plaque. La raison dernière est que la décharge se produit entre la barrière et l'extrémité de la plaque entourée par les particules (**Figure IV.15 (c)**), par contre dans le cas de la DBD où la barrière se retrouve milieu, la décharge se produit en deux endroits : entre la barrière et les bornes de la plaque entourée par les particules, et entre la barrière et le plan de masse (espace libre entre particules) (**Figure IV.15 (b)**).



d_0 : distance entre la plane de masse et la grille;
 d_1 : distance entre la barrière et la grille;
 d_2 : distance entre la barrière et le plan de masse;
 d_3 : distance entre la barrière et l'extrémité de la plaque entouré par les particules.

Figure IV.15 : Représentation schématique du processus de décharge d'une DBD (création des streamers) : (a) DBD avec grille, (b) simple DBD (au milieu de la plaque), (c) simple DBD (à l'extrémité de la plaque).

L'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la de la fréquence à $U_n = 18$ kV pour la forme d'onde sinusoïdale est illustrée sur la **Figure IV.16**.

La grille métallique à un effet significatif pour les grandes valeurs de fréquence de la tension appliquée où la puissance consommée est plus grande dans le cas de DBD avec grille à celle sans grille. Par contre, l'effet de la grille métallique n'apparaît pas aux faibles valeurs de la fréquence. On peut expliquer ce résultat par l'intensification de l'activité de la décharge pour les hautes fréquences ainsi dans le cas de DBD avec grille que dans le cas de DBD sans grille (à l'extrémité de la plaque), par contre la plus faible décharge se produit dans le cas de la DBD sans grille (au milieu de la plaque), c'est ce que montre les **Figures IV.17, 18**.

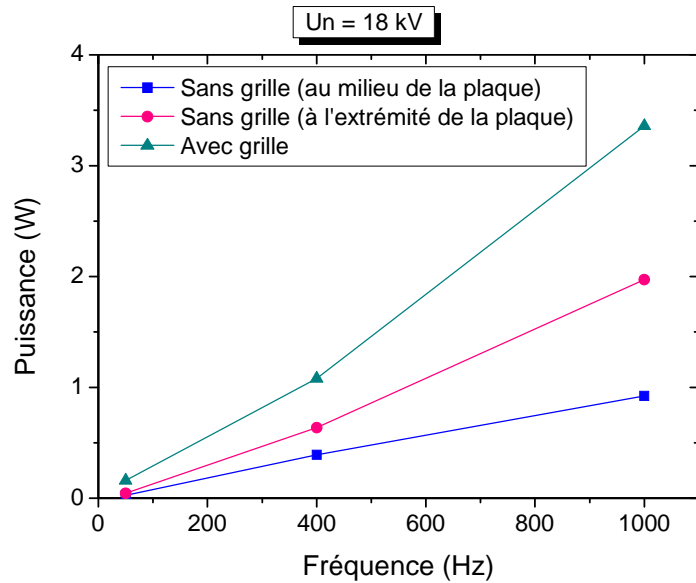


Figure IV.16 : L'influence de la grille métallique sur l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour la forme d'onde sinusoïdale à $U_n = 18$ kV.

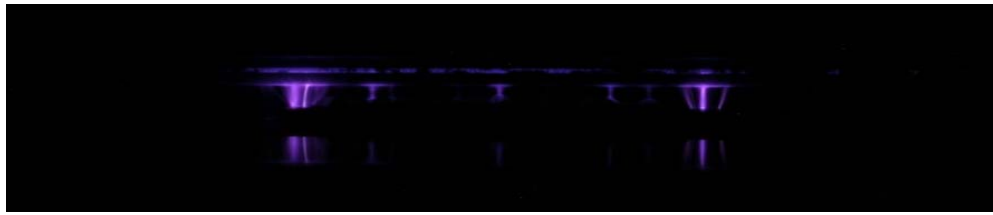
La **Figure IV.17** et **Figure IV.18** présente des photographies de décharges de DBD sans et avec grille à divers fréquences $f = 50$ Hz, 400 Hz et 1000 Hz pour $U_n = 18$ kV.

L'intensification de l'activité de la décharge devient de plus en plus importante avec l'augmentation de la fréquence de la tension appliquée pour les deux cas de DBD (sans et avec l'insertion de la grille métallique), ce qui explique l'augmentation du courant de décharge (pics de plus grande amplitude) avec l'élévation de la fréquence.

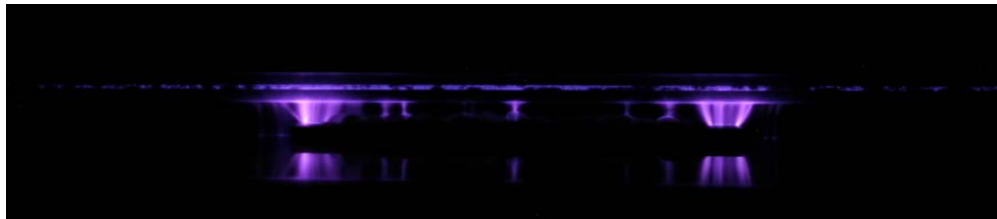
Dans le cas de DBD sans grille métallique, l'activité de la décharge est plus intense à l'extrémité qu'au milieu de la plaque. On peut expliquer ces résultats par la distance entre la barrière et le plan de masse (l'espace gazeux) qui devient plus petite à l'extrémité qu'au milieu de la plaque et par la présence des particules (au milieu de la plaque) qui joue le rôle d'une autre barrière diélectrique.



(a)

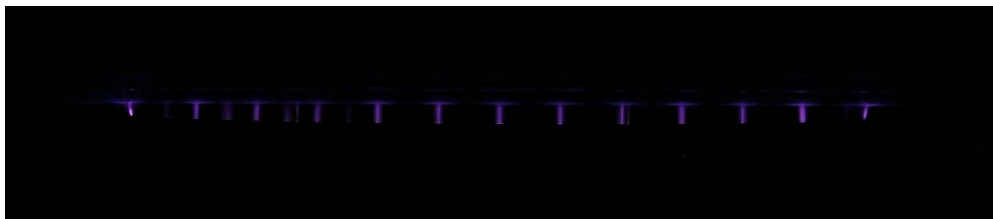


(b)

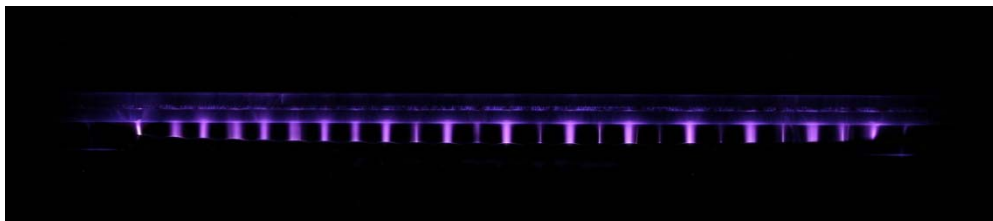


(c)

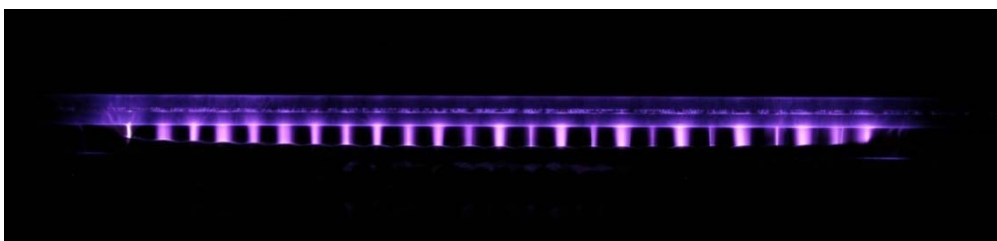
Figure IV.17 : Photographie de la DBD sans grille métallique pour diverses fréquences à $Un = 18$ kV : (a) $f = 50$ Hz, (b) $f = 400$ Hz, (c) $f = 1000$ Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.18 : Photographie de la DBD avec une grille métallique pour diverses fréquences à $Un = 18$ kV : (a) $f = 50$ Hz, (b) $f = 400$ Hz, (c) $f = 1000$ Hz.

IV.3.4 Influence de la présence de particules

La **Figure IV.19** montre l'influence de la présence des particules sous la grille reliée à la terre sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée à 1 kHz pour la forme d'onde sinusoïdale.

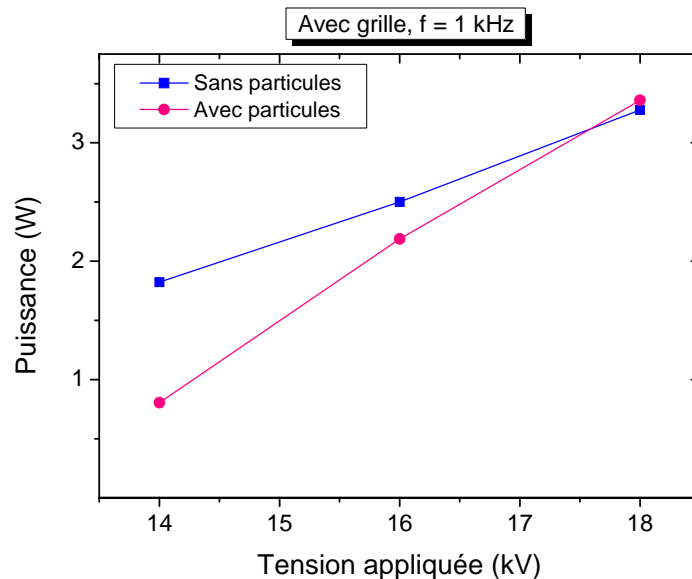


Figure IV.19 : Influence de la présence des particules sur l'évolution de la puissance en fonction de la tension appliquée pour la forme d'onde sinusoïdale à $f = 1$ kHz.

La puissance moyenne relevée est plus faible en présence de particules lorsque $Un < 17$ kV, par contre à 18 kV on trouve quasiment la même puissance dans les deux cas (avec et sans particules).

L'évolution de la puissance consommée en fonction de la fréquence pour une DBD avec grille pour les deux cas avec et sans la présence des particules est présentée dans la **Figure IV.20**.

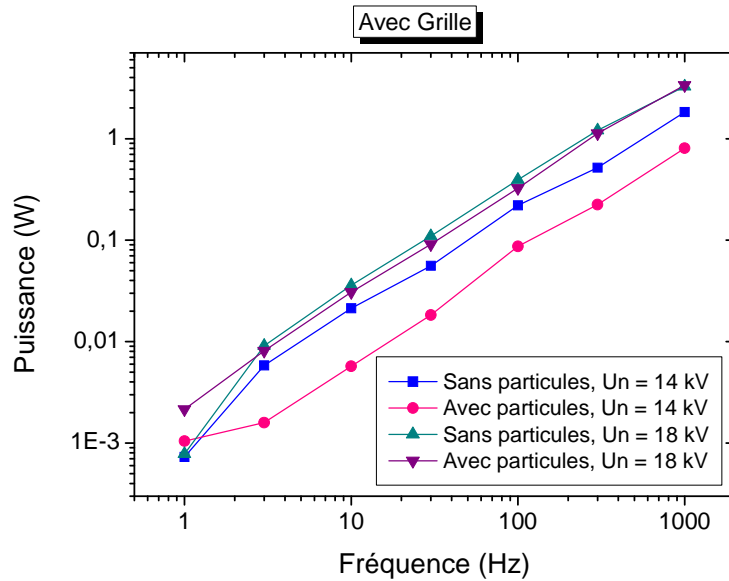


Figure IV.20 : L'influence de la présence des particules sur l'évolution de la puissance en fonction de la fréquence pour la forme d'onde sinusoïdale pour deux niveaux de tension 14 kV et 15 kV à $f = 1$ kHz.

Les courbes de la puissance électrique consommée en fonction de la fréquence dans le cas de la DBD avec grille montrent que son évolution avec la fréquence est quasi linéaire dans les deux cas : sans et avec la présence de particules.

A tension constante (14 kV par exemple), la puissance électrique consommée en présence des particules est inférieure à celle consommée sans la présence des particules. À 18 kV, la présence des particules a moins d'influence sur la décharge.

Dans le cas de la DBD avec grille en configuration fil-plan, la puissance moyenne est moins sensible à la présence de particules à haute fréquence.

Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre concernent principalement l'étude du comportement électrique de la décharge à barrière diélectrique DBD fil-plan. Les principaux résultats sont les suivants:

- Les formes d'onde de la tension et du courant de décharge ont montré que la décharge à barrière diélectrique (DBD) dans la configuration Fil-Plan est de type « filamentaire ».

- L'augmentation de la fréquence provoque une intensification de l'activité de la décharge qui conduit à l'augmentation du courant de décharge, ce qui se traduit par la présence de nombreuses impulsions plus intenses.
- La tension appliquée influe sur la décharge à travers l'intensification de l'activité filamentaire de la décharge.
- La puissance consommée augmente avec la fréquence et la tension. De plus elle est plus élevée pour les hautes tensions carrées que pour les formes sinusoïdales et triangulaires.
- La puissance électrique consommée dans le cas de la DBD avec grille est supérieure à celle consommée dans le cas d'une simple DBD (sans grille).
- Dans le cas de la DBD avec grille en configuration Fil-Plan, la puissance moyenne est moins sensible à la présence des particules à haute fréquence.

Chapitre V

CONTROLE DE L'ETAT DE CHARGE DES MATERIAUX DIELECTRIQUES PAR LA DECHARGE A BARRIERE DIELECTRIQUE

Le contrôle de la charge électrique à la surface des matériaux isolants est un problème qui touche plusieurs secteurs et c'est un besoin qui s'impose de plus en plus en raison des risques et troubles qu'elles sont susceptibles de créer [180-182]. Par ailleurs, le développement des différentes applications de l'électrostatique durant les dernières décennies posent à son tour ce même problème de contrôle du niveau de charge aussi bien au début qu'à la fin de l'application [7, 147]. En effet, à la fin du processus électrostatique, les charges qui ont servi à la création d'une force par exemple durant ce processus doivent être éliminées ou à la limite réduites à des niveaux suffisamment bas pour ne pas provoquer de problèmes. Dès lors, les outils permettant l'élimination des charges électrostatiques doivent à leur tour suivre ce développement pour être plus performants et plus sûrs.

Les études présentées dans cette thèse, ont montré que la décharge à barrière diélectrique constitue un outil offrant à la fois l'efficacité et la sûreté pour la neutralisation des charges de surface. Dans ce chapitre, nous présentons les résultats des expériences de neutralisation des charges à la surface des couches de granules de polyéthylène (PE), réalisées sur l'installation de la **Figure II.10, 11** (voir **chap. II**). Les résultats comprennent en particulier l'effet des grandeurs électriques de la décharge : fréquence, tension, polarité et mode de chargement. L'accent sera mis sur la configuration de l'électrode à savoir une électrode DBD simple et une électrode DBD avec grille en montrant à chaque occasion la différence entre les deux et l'apport de la présence de la grille.

V.1 Influence de l'amplitude de la tension

Les **Figures V.1** et **V.2** montrent la distribution du potentiel électrique à la surface de la couche granulaire avant et après la neutralisation en fonction de la tension de la décharge DBD pour les deux électrodes avec et sans grille (respectivement **Figure V.1** et **Figure V.2a, b**). La distribution du potentiel de surface de la couche granulaire n'est pas uniforme avant la neutralisation. Cette non-uniformité est due à l'irrégularité que présente la surface de la couche granulaire ainsi qu'à la forme et la taille des particules qui influent sur la charge créée par effet triboélectrique [175]. D'après les résultats des figures ci-dessous, avant l'installation de la grille métallique, l'électrode DBD simple est incapable de neutraliser les charges de surface. Dans ce même cas, l'augmentation de la tension (au-delà de 13 kV) entraîne même un rechargement du matériau (**Figure V.1**).

En revanche, dans le cas de la DBD avec la grille, la neutralisation s'améliore progressivement avec l'augmentation de la tension. Il convient de noter que des tensions relativement élevées sont nécessaires pour obtenir les meilleurs résultats de neutralisation. En effet, des taux de neutralisation élevés ont été atteints pour des valeurs élevées de tension et de fréquence correspondant respectivement à 18 kV et 400 Hz (**Figure V.2 (a), (b)**).

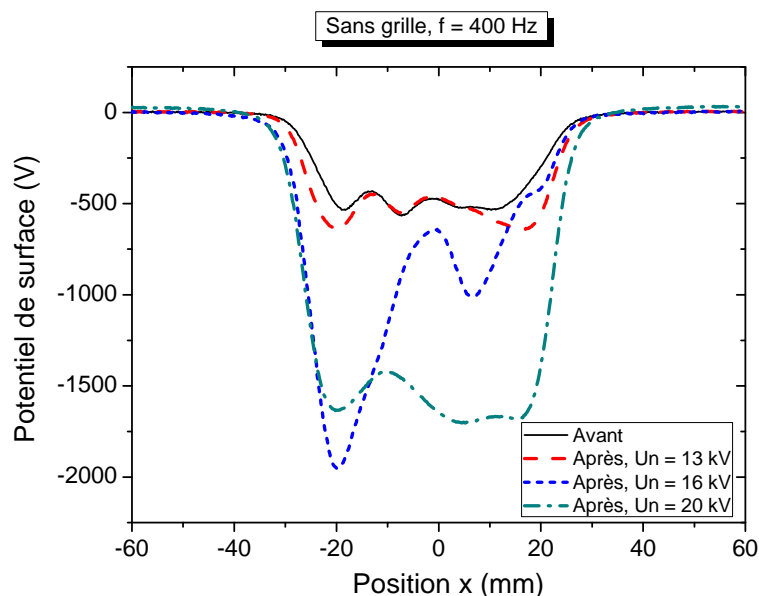
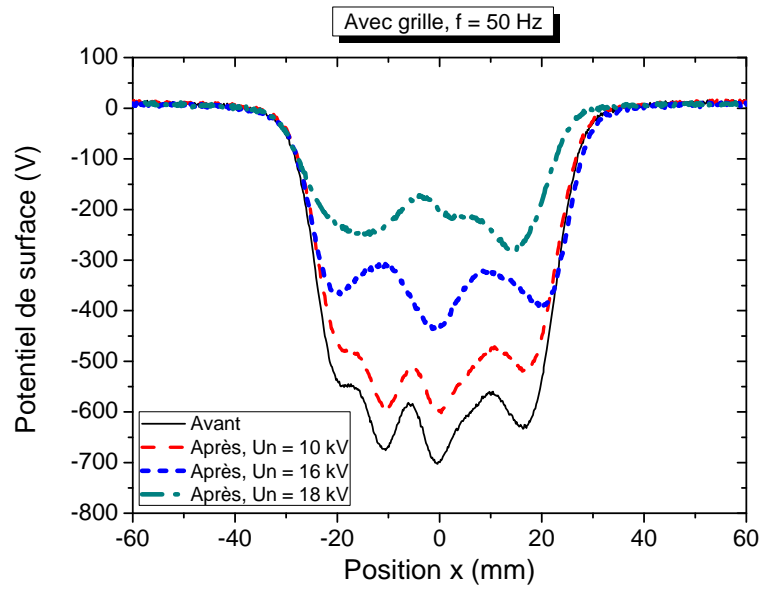
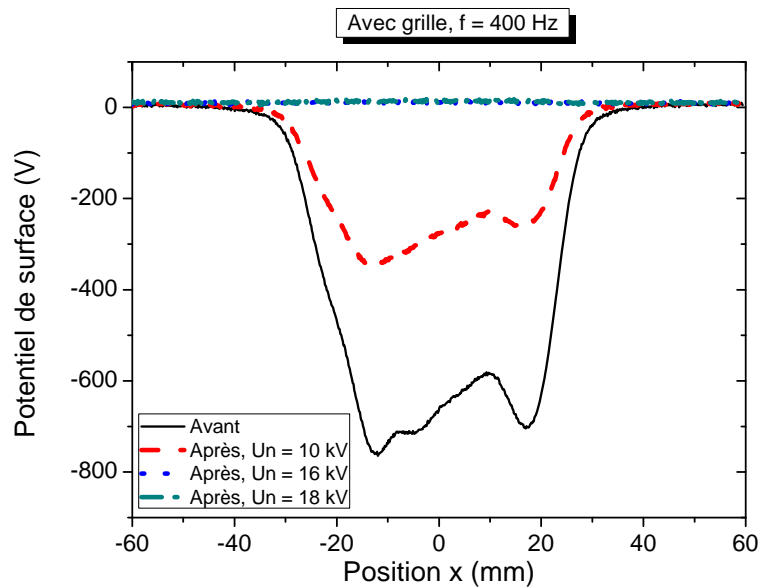


Figure V.1 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires chargées par triboélectricité : Effet de la tension de neutralisation pour une DBD sans grille métallique.



(a)



(b)

Figure V.2 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires PE chargé par triboélectricité : Effet de la tension et la fréquence pour une électrode DBD avec grille métallique (a) à 50 Hz, (b) à 400 Hz.

Afin de d'évaluer précisément la performance du système de neutralisation, nous allons calculer le taux de neutralisation "Nr" à partir de la valeur intégrée (aire) des courbes de potentiel de surface avant (V_{avant}) et après ($V_{après}$) neutralisation [183] :

$$Nr(\%) = (1 - (V_{après}/V_{avant})) \times 100 \quad (V.1)$$

La **Figure V.3** montre l'évolution du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée pour les deux situations d'électrodes considérées, à savoir, avec et sans l'insertion de la grille métallique. Sans la grille, l'électrode DBD n'a pas la capacité de neutraliser le matériau à des tensions relativement basses, mais plutôt de charger à nouveau le matériau avec une polarité négative à des tensions plus élevées (**Figure V.3**).

En effet, l'échantillon inséré dans l'intervalle de décharge se comporte comme une barrière diélectrique et influe sur son propre traitement par plasma. L'effet du traitement DBD des polymères dans l'air peut être résumé par un changement de la rugosité de surface (augmentation du point de contact). L'augmentation significative de la rugosité de surface peut être attribuée à la gravure de surface du polymère par le plasma DBD dans l'air [184].

D'autre part, le traitement par la décharge par barrière diélectrique a un effet important pour obtenir une activation de surface rapide des surfaces des polymères. Une activation rapide de la surface peut être obtenue après seulement quelques secondes de traitement [185]. Ainsi les propriétés de surface, telles que la mouillabilité et le niveau d'oxydation semblent augmenter considérablement au cours des premières 0,1 à 0,2 seconde de traitement; de plus, toute modification ultérieure pour des temps de traitement plus longs (> 1,0 s) est moins importante [186].

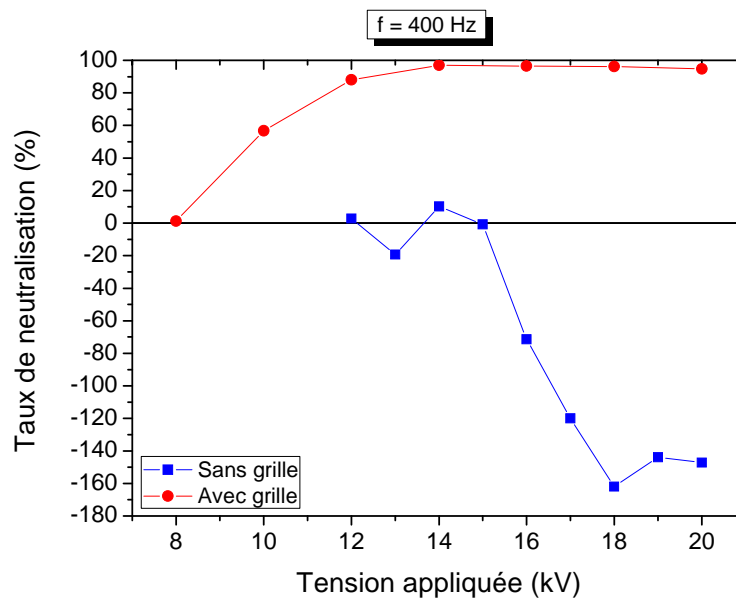


Figure V.3 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée correspondant à une DBD avec et sans grille pour $f = 400$ Hz.

Avec la grille installée entre l'électrode DBD et l'échantillon, la distribution de potentiel devient plus régulière et le processus de neutralisation est de plus en plus amélioré en augmentant l'amplitude de la tension DBD (**Figure V.2(a)**, **Figure V.3**). Dans ce cas, il est même possible d'atteindre des taux de neutralisation plus élevés, dépassant 97% à la fréquence de 400 Hz, avec des tensions appliquées comprises entre 14 kV et 16 kV (**Figure V.3**). Ainsi, des tensions relativement plus élevées sont nécessaires pour obtenir les meilleurs résultats de neutralisation. En effet, en fonction de la fréquence, les meilleurs taux de neutralisation ont été atteints pour des tensions supérieures à 14 kV. La **Figure V.4** montre l'évolution du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée dans le cas de la DBD avec grille métallique pour deux fréquences : 50 Hz et 400 Hz.

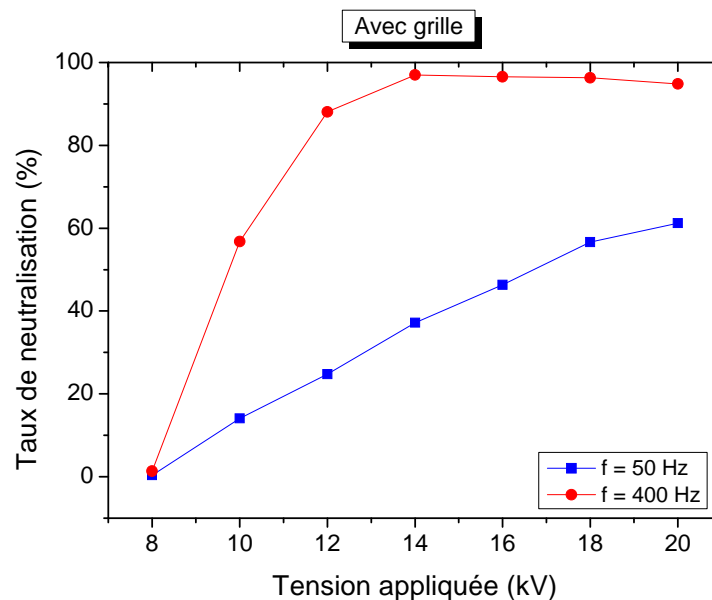
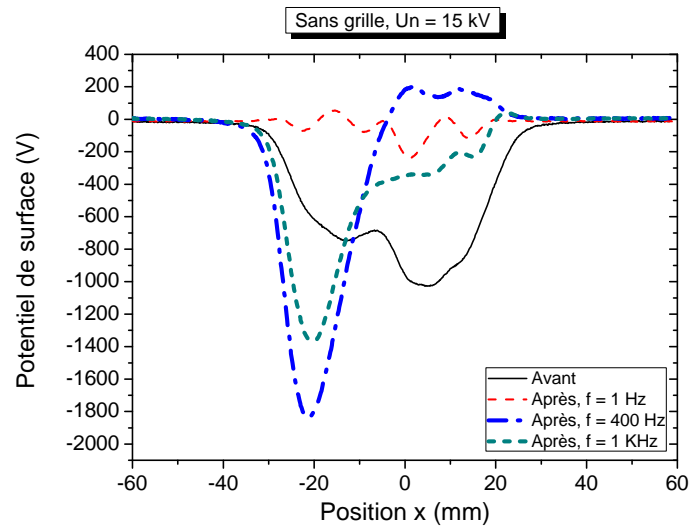


Figure V.4 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée dans le cas d'une DBD avec grille pour $f = 50$ et 400 Hz.

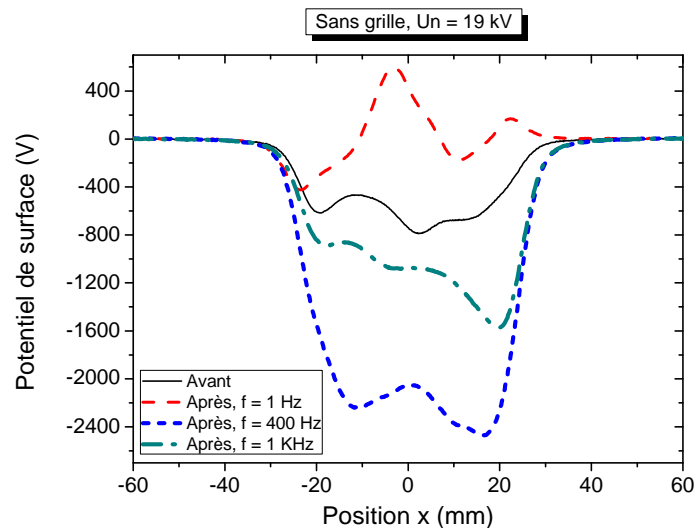
Dans le cas de la fréquence $f = 50$ Hz et pour la tension de neutralisation $U_n = 14$ kV le taux de neutralisation ne dépasse pas 37 %, tandis que, dans le cas 400 Hz et pour la même tension, le taux de neutralisation (N_r) atteint 96 %. Même en augmentant la tension à 20 kV, le taux de neutralisation ne dépasse pas 60 % à 50 Hz, alors que des taux élevés sont atteints avec des tensions dépassant juste 14 kV à 400 Hz. Ceci montre alors l'importance de la fréquence dans le processus de neutralisation. L'effet de la fréquence est présenté en détails dans la section suivante.

V.2 Influence de la fréquence

La **Figure V.5** montre la distribution du potentiel de surface pour plusieurs valeurs de la fréquence pour une électrode sans la grille à 15 et 19 kV. La **Figure V. 6** présente le cas d'une électrode avec la grille à 12 kV. Les courbes correspondantes du taux de neutralisation en fonction de la fréquence sont présentées sur la **Figure V.7** et la **Figure V.8**.



(a)



(b)

Figure V.5 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation des couches granulaires de PE chargées par triboélectricité: effet de la fréquence pour une électrode sans grille (a) à 15 kV, (b) à 19 kV.

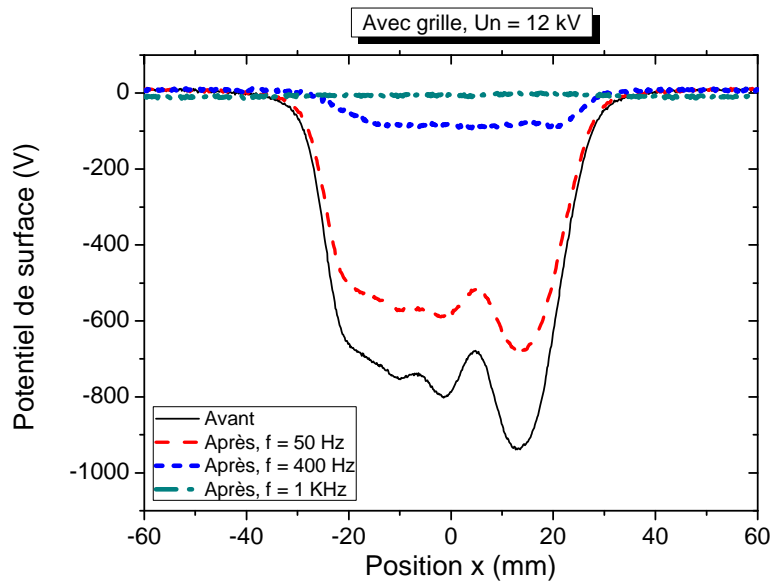


Figure V.6 : Distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation de couches granulaires de PE chargés par triboélectricité : Effet de la fréquence pour une électrode DBD avec grille à 12 kV.

Sans l'installation de la grille, les meilleures neutralisations sont obtenues à 1 Hz pour les deux cas à 15 kV et 19 kV (**Figures V.5**), par contre, pour des valeurs plus élevées de la fréquence (400 Hz et 1000 Hz) le taux de neutralisation diminue et le matériau se charge encore plus. Dans le cas de la neutralisation par DBD avec grille métallique le taux de neutralisation s'améliore de plus en plus avec l'augmentation de la fréquence (**Figures V.6**).

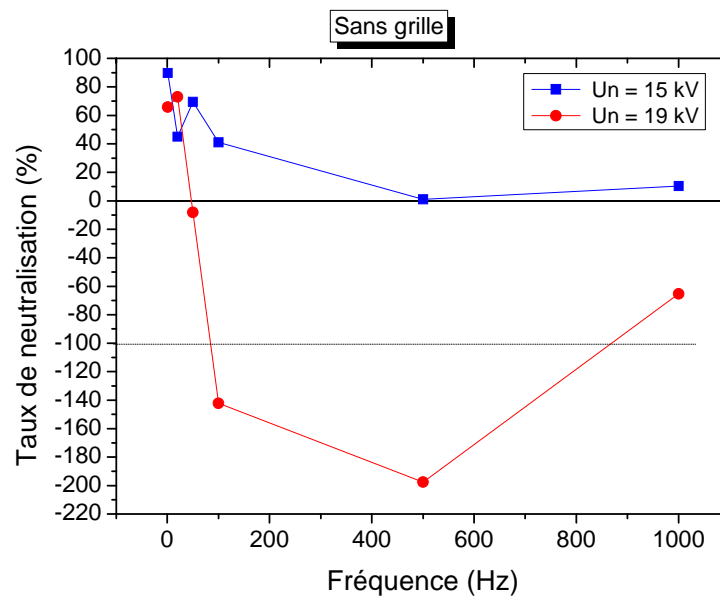


Figure V.7 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à une électrode DBD sans grille.

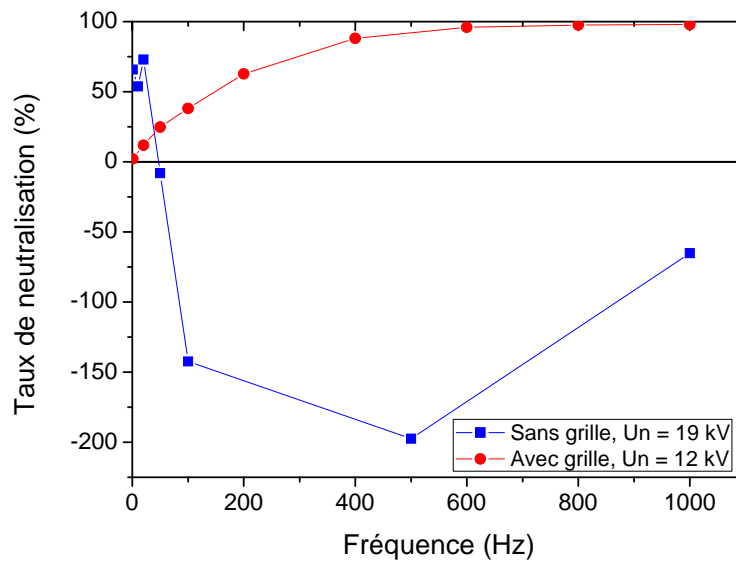


Figure V.8 : Variation du taux de neutralisation en fonction de la fréquence correspondant à une électrode DBD sans et avec grille.

Comme indiqué dans la section précédente, la présence de la grille a une influence significative sur les processus de neutralisation par une décharge DBD. Sans l'installation de la grille, l'effet de neutralisation de charge apparaît à des valeurs de fréquence très basses de moins de 20 Hz (**Figure V.7**), puis diminue pour s'inverser en rechargement du matériau à des fréquences plus élevées.

Dans la plage de 1 Hz à environ 20 Hz, où la durée de la tension est importante, les granules chargés sont attirés par l'électrode DBD et libérés après avoir été neutralisés par ce contact. Ceci explique pourquoi la neutralisation sans grille est assez bonne pour les basses fréquences. Cependant, à mesure que la fréquence augmente, l'attraction des particules n'est plus possible en raison de la variation rapide du signal haute tension, ce qui conduit nécessairement à une mauvaise neutralisation et même à une recharge du matériau lors de son passage sous la DBD. En installant la grille, le processus de neutralisation devient plus régulier et efficace à mesure que la fréquence augmente, par exemple le taux de neutralisation atteint 98 % à 1000 Hz (**Figure V.8**). La relation entre le taux de neutralisation et la fréquence est également non linéaire et suit un comportement similaire à celui de la tension.

L'utilisation de l'électrode DBD pour neutraliser les charges électriques conduit à la question comment les charges de neutralisation sont-elles créés ?

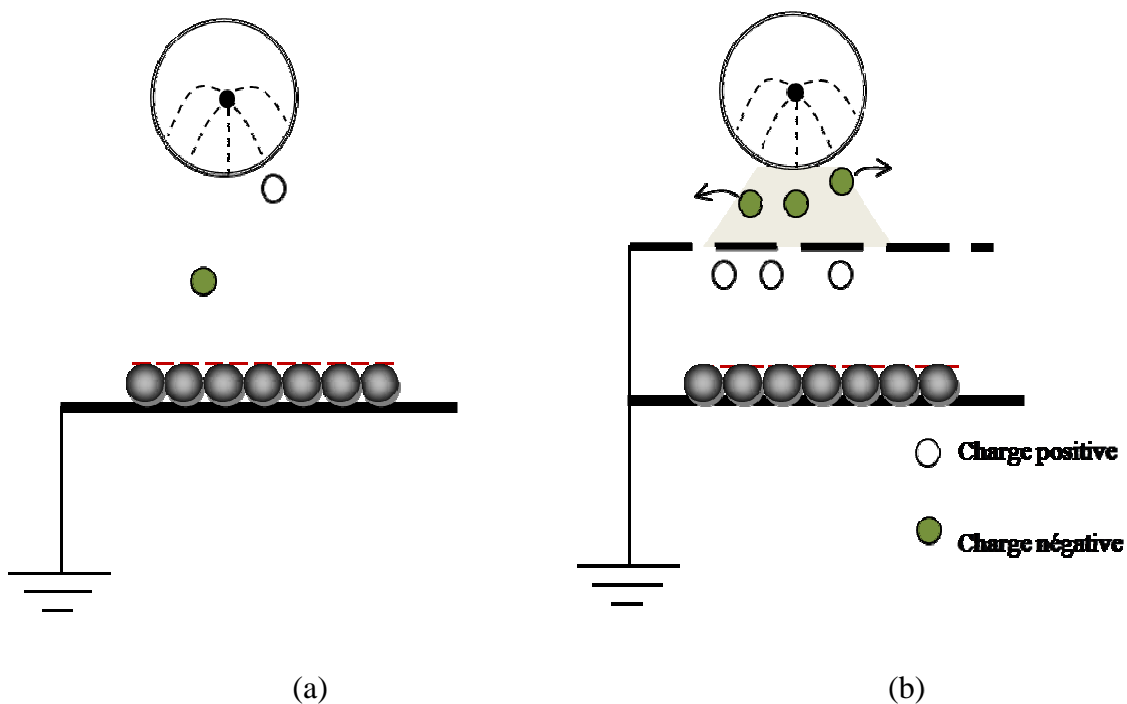


Figure V.9 : Influence de la grille métallique sur le processus de neutralisation (a) DBD sans grille, (b) DBD avec grille.

En effet, la décharge électrique est créée à proximité du verre isolant, ce qui génère une charge d'espace dans le gap entre l'électrode DBD et la couche granulaire.

Le rôle de la grille métallique installée entre l'électrode DBD et la couche chargée est crucial. Comme le montrent les résultats présentés ci-dessus, sans la grille, la distribution de potentiel de surface est non uniforme et la couche granulaire peut même être rechargée. Cependant, lorsque la grille est installée, la neutralisation devient plus uniforme et s'améliore considérablement. La **Figure V.9** explique la différence entre les deux situations. Sans grille, le champ électrique généré par l'électrode DBD est suffisamment fort pour entraîner des charges positives ou négatives vers la surface chargée négative (**Figure V.9a**). Cela conduit à la recharge du matériau et à la non-uniformité du potentiel de surface.

En installant la grille, la distance entre la barrière diélectrique et la masse est réduite, ce qui conduit à l'intensification de champ électrique à proximité de la barrière. Par conséquent, le processus d'ionisation est accentué et les charges neutralisantes sont augmentées. D'autre part, la présence de la grille métallique crée une zone de champ électrique nul entre la grille et la plaque mise à la terre, de sorte que seul le champ électrique provenant de la couche chargée négativement dominera cette région. En conséquence, les charges passant à travers la grille seront sélectionnées par la couche chargée. Ainsi, les

charges négatives sont repoussées et les charges positives sont attirées, jusqu'à la neutralisation totale de la couche. A ce moment, le flux de charges à travers la grille sera automatiquement annulé [7] (**Figure V.9b**). La **Figure V.10** présente la photographie de la décharge DBD avec la grille pour $U_n = 18$ kV et $f = 1$ kHz.

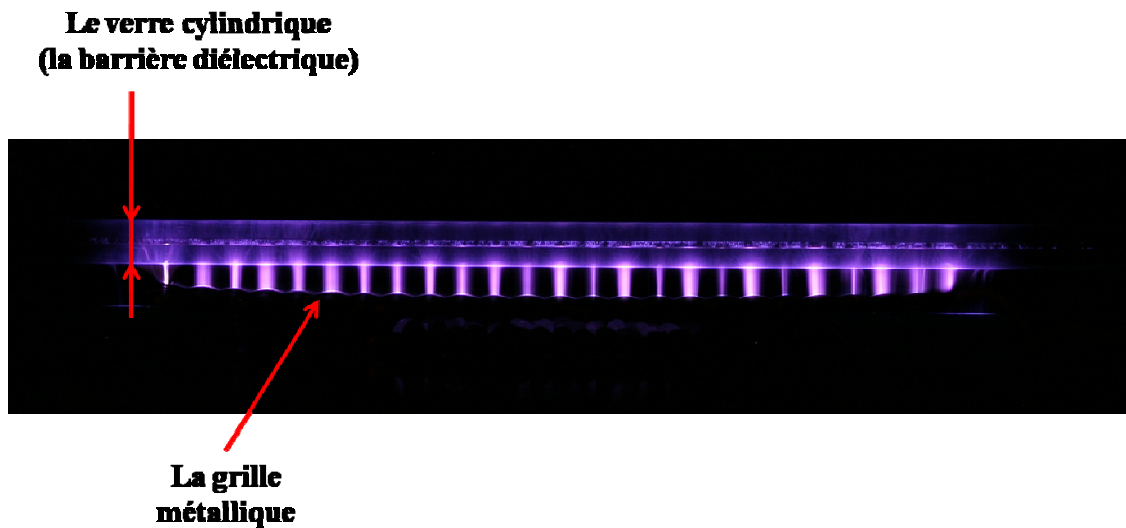


Figure V.10 : Photographie de la décharge DBD avec la grille pour $U_n = 18$ kV et $f = 1$ kHz.

V.3 Influence du mode de charge

Quatre mécanismes de charge ont été utilisés : triboélectricité, décharge couronne (négative et positive) et décharge à barrière diélectrique (DBD). Les résultats de neutralisation obtenus en utilisant la DBD avec grille sont montrés sur la **Figure V.11**.

La distribution du potentiel à la surface des granules avant la neutralisation est non uniforme pour les quatre systèmes de charge. D'autre part, le potentiel de surface des granules après neutralisation est proche de zéro dans les quatre cas. Il est clair que le mécanisme de charge n'a quasiment aucun effet sur l'efficacité de la neutralisation par DBD. En effet, dans les quatre cas, le taux de neutralisation est supérieur à 96 % et atteint même 99 %.

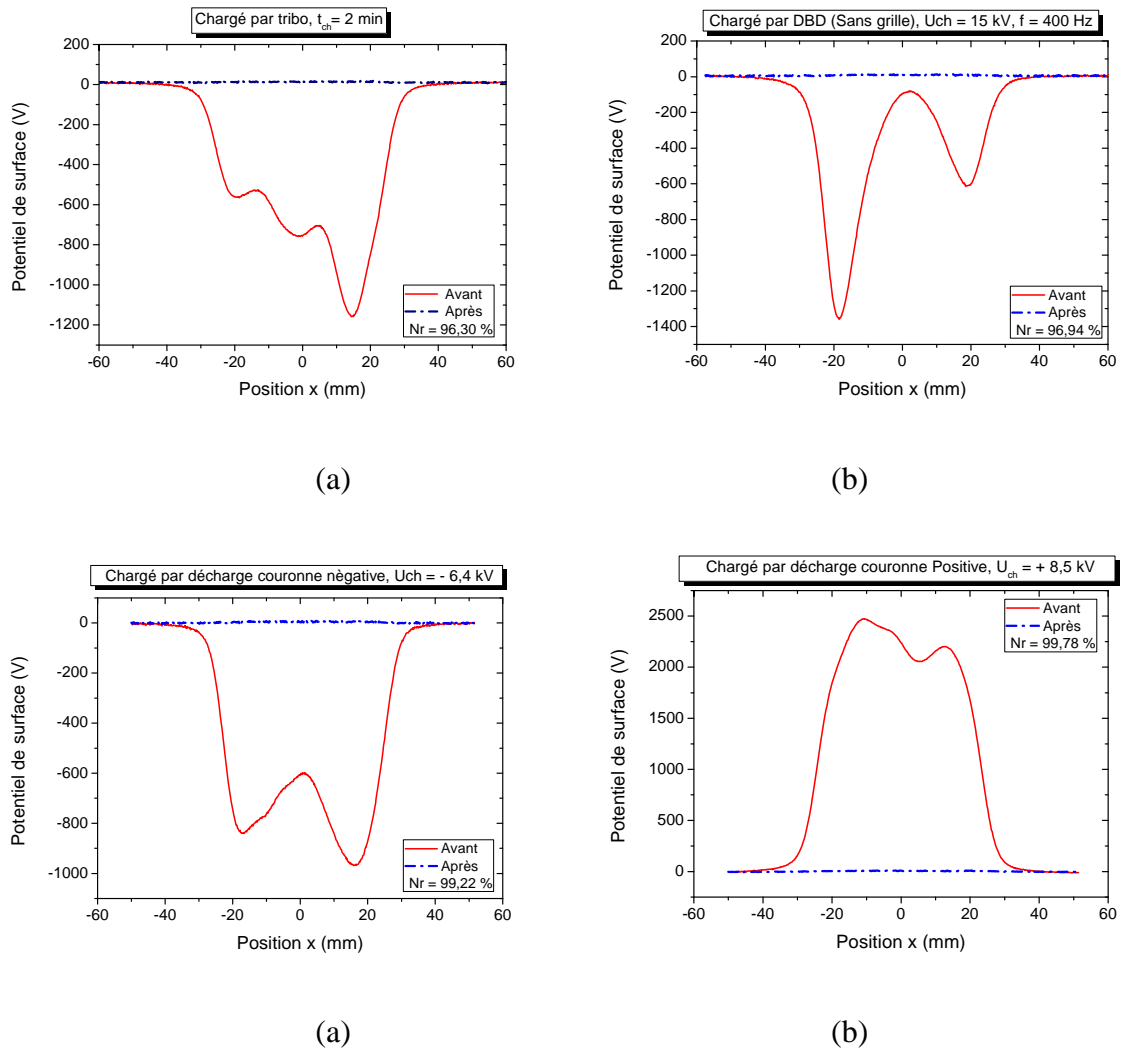


Figure V.11 : Distribution de potentiel de surface avant et après neutralisation en utilisant une DBD avec grille à 400 Hz, 18 kV pour des couches granulaires PE chargées par : (a) Effet triboélectrique pendant 2 min, (b) DBD sans grille (400 Hz, 15 kV), (c) décharge couronne DC négatif $U_{ch} = - 6,4$ kV et (d) décharge couronne DC positive $U_{ch} = + 8,5$ kV.

V.4 Influence de la régularité de la surface à neutraliser

La **Figure V.12** montre la distribution du potentiel avant et après neutralisation sur deux matériaux : une couche de granules en PE et un film plat en PP. Ils présentent respectivement des surfaces irrégulières et lisses. Dans le cas des films, la distribution du potentiel de surface avant la neutralisation est symétrique et plus uniforme en raison de la surface lisse du film. Même si le potentiel initial est presque le même, le potentiel de surface après neutralisation n'est pas nulle dans le cas d'une surface lisse. En effet, le taux de neutralisation est d'environ 93 % pour la surface lisse alors qu'il dépassait 99 % pour la surface irrégulière. Par conséquent, la distribution irrégulière des charges électrostatiques sur

la surface du matériau diélectrique permet d'améliorer le processus de neutralisation, en raison de la divergence du champ à la surface des granules.

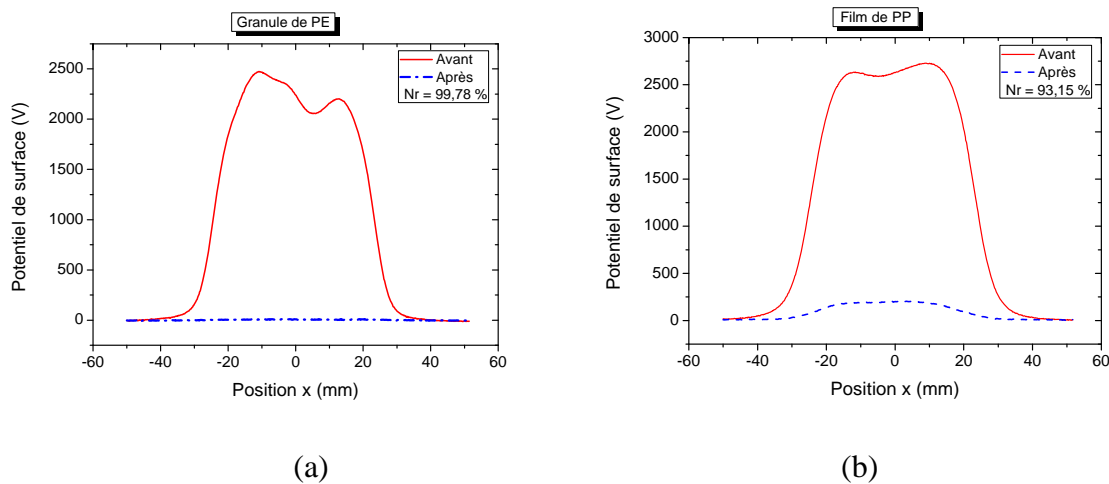


Figure V.12 : Potentiel de surface avant et après neutralisation en utilisant une DBD avec grille à 400 Hz, 18 kV pour (a) couches granulaires PE, (b) film PP. Les échantillons sont chargés par décharge couronne DC positive, $U_{ch} = 8,5$ kV.

Conclusions

La présente étude a montré l'efficacité de la décharge de la barrière diélectrique en tant qu'outil sûr pour l'élimination des charges électriques. Les résultats obtenus montrent que:

- L'électrode DBD avec grille métallique peut éliminer jusqu'à 99 % de la charge initiale, en fonction de la tension et de la fréquence de l'électrode active.
- La grille métallique améliore considérablement la neutralisation. Sans la grille, aucune neutralisation contrôlable n'est possible et le matériau diélectrique peut même être rechargé.
- Les charges de neutralisation sont générées à l'extérieur de la barrière et à cause de la grille, seule la charge requise peut passer à travers la grille.
- Dans l'ensemble, des tensions relativement élevées et des fréquences plus élevées sont nécessaires pour atteindre des taux de neutralisation élevés.
- Le mécanisme de charge ou le signe de charge n'altère pas l'efficacité de la neutralisation lors de l'utilisation d'une électrode DBD avec une grille métallique.

Chapitre VI

INFLUENCE DE LA FORME D'ONDE DE LA TENSION SUR L'ELIMINATION DES CHARGES A LA SURFACE DES GRANULES DE POLYETHYLENE PAR DBD.

La sécurité et l'efficacité sont deux caractéristiques que doit satisfaire un neutraliseur de charge électrique. La décharge à barrière diélectrique, qui présente l'avantage d'empêcher la transition à l'arc, est un outil intéressant pour neutraliser en toute sécurité des charges électrostatiques indésirables [187].

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter les résultats expérimentaux réalisées sur l'installation expérimentale de la **Figure II.22**, décrite en détail dans le **paragraphe II.4** (voir **Chap. II**). Cette installation permet d'étudier l'influence de la forme d'onde sur l'efficacité d'élimination de charges positives, à la surface de polyéthylène (PE) granulaire, en utilisant la décharge à barrière diélectrique avec grille. Trois signaux de tension avec plusieurs amplitudes et fréquences ont été considérés: sinusoïdale, triangulaire et carré. Les mesures du potentiel de surface avant et après neutralisation ont été effectuées en vue de comparer l'effet résultant de chacun des trois signaux.

Les taux de neutralisation obtenus des trois formes d'onde de la tension ont été comparés en vue de recommander le meilleur signal haute tension conduisant à une meilleure neutralisation.

VI.1 Profil du potentiel de surface

VI.1.1 Influence de la tension

VI.1.1.1 Influence de la tension à basse fréquence (3 Hz)

Les profils de distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation en utilisant la forme d'onde sinusoïdale, triangulaire et carrée à 3 Hz sont représentés par la **Figure VI.1**. Les amplitudes des tensions appliquées sont 12 kV, 14 kV, 16 kV et 18 kV.

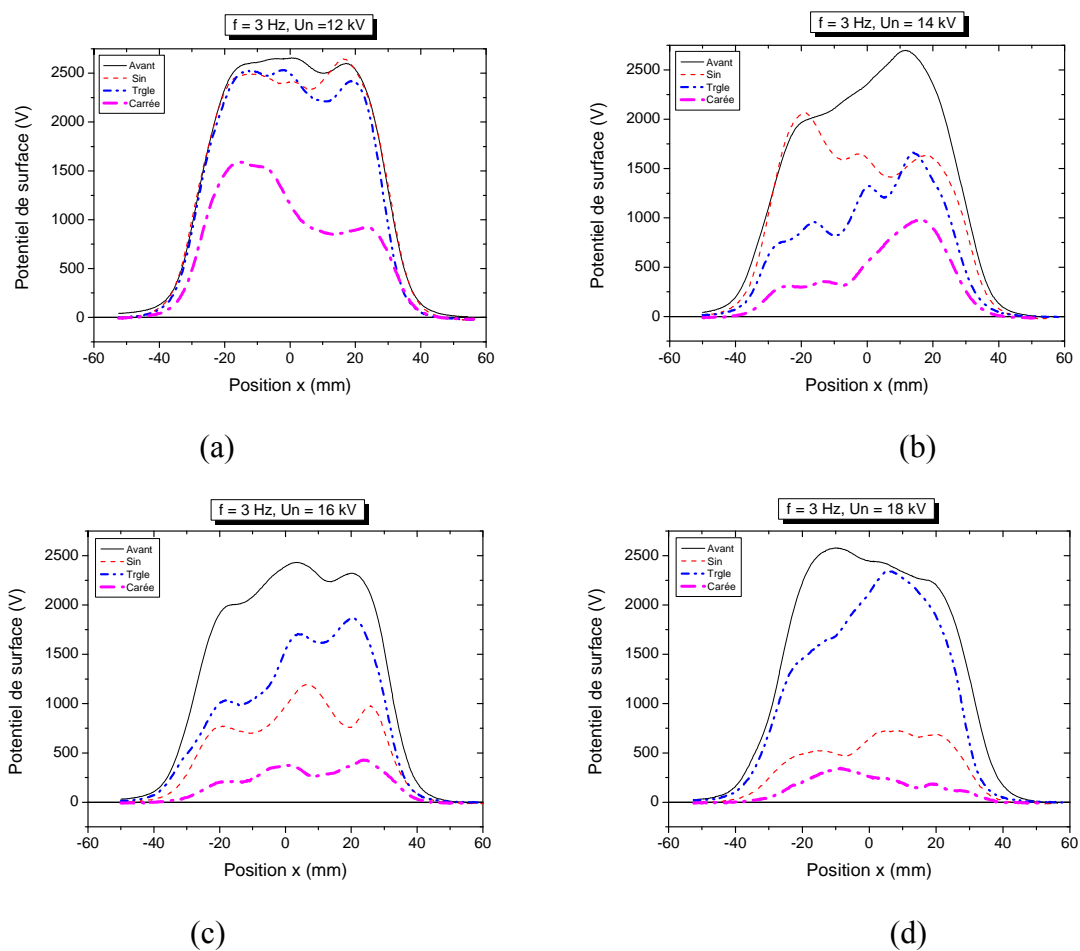


Figure VI.1 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD avec différents signaux: sinusoïdal, triangulaire et carré en fonction de la tension à $f = 3$ Hz : (a) 12 kV, (b) 14 kV, (c) 16 kV et (d) 18 kV.

À une fréquence de 3 Hz et avec une faible amplitude de tension (12 kV), la neutralisation est pratiquement inefficace pour les trois formes d'onde considérées (**Figure VI.1 (a)**). Cependant, même avec ces basses tensions et fréquences, la forme carrée peut réduire la charge résiduelle à environ la moitié du potentiel initial. En augmentant la tension,

la neutralisation peut être améliorée, en particulier pour le signal sinusoïdal et carré. Selon la **Figure VI.1**, la forme d'onde carrée est plus efficace que les deux autres, quelque soit le niveau de la tension. À des tensions relativement élevées (16 kV et 18 kV), la forme d'onde sinusoïdale est plus efficace que la forme triangulaire, mais encore moins qu'une forme carrée [182]. Ainsi, à basse fréquence, la neutralisation peut être améliorée en augmentant la tension. Le signal carré est plus efficace que les deux autres. Le signal sinusoïdal peut mieux neutraliser les charges de surface à des tensions plus élevées, tandis que la forme triangulaire est inefficace à ce niveau de fréquence.

VI.1.1.2 Influence de la tension à haute fréquence (300 Hz)

La **Figure VI.2** montre la distribution du potentiel de surface avant et après neutralisation à 300 Hz.

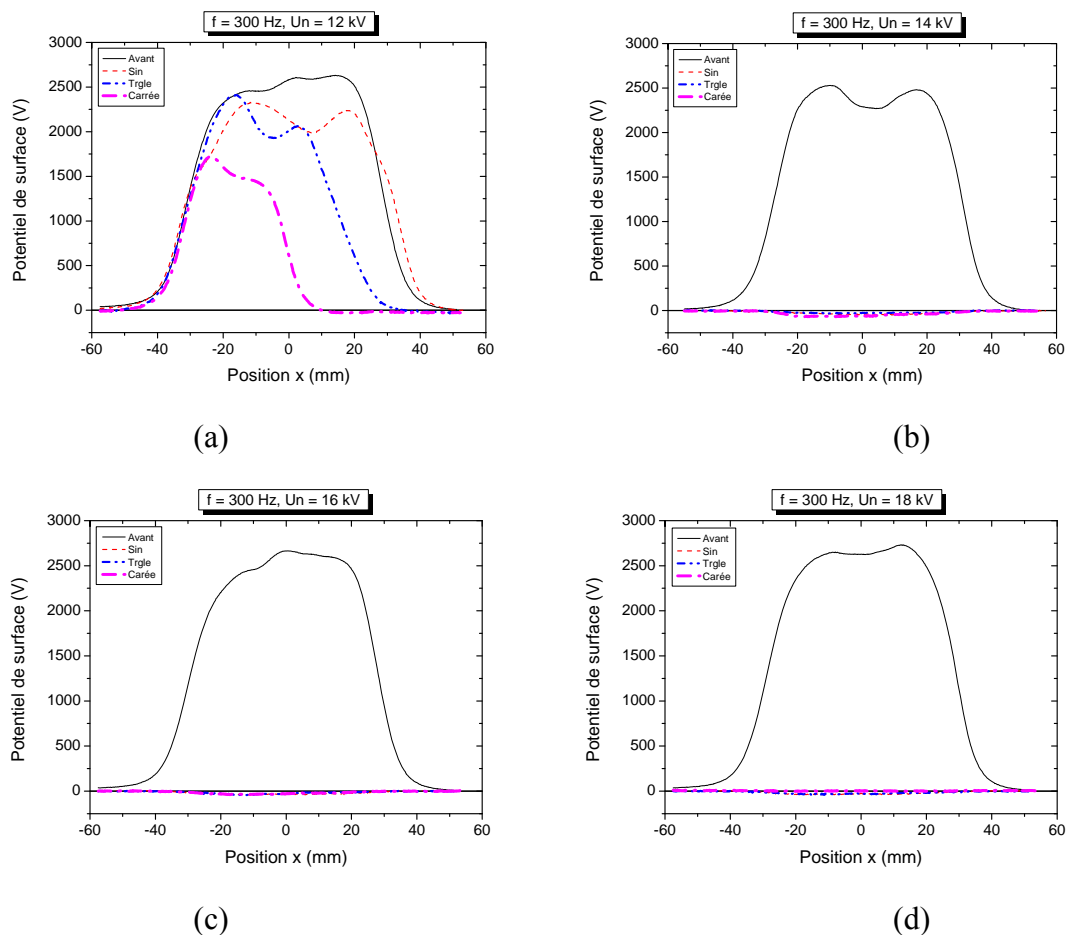


Figure VI.2 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD alimentée avec différents signaux : sinusoïdal, triangulaire et carré à fréquence $f = 300$ Hz et différentes tensions : (a) 12 kV, (b) 14 kV, (c) 16 kV et (d) 18 kV.

L'augmentation de la fréquence améliore sensiblement le processus de neutralisation. En effet, les trois signaux appliqués peuvent parfaitement neutraliser le matériau sauf à 12 kV (**Figure VI.2**). Sur cette base, on peut déduire que 12 kV est une valeur très faible de la tension incapable de créer une décharge à barrière diélectrique suffisamment stable pour la neutralisation. De ce fait, les résultats correspondants à 12 kV n'apparaîtront plus dans la section suivante. Avec des fréquences plus élevées, l'augmentation de la tension conduit à une très bonne neutralisation en utilisant la forme d'onde sinusoïdale, triangulaire ou carrée.

VI.1.2 Influence de la fréquence

La distribution du potentiel de surface après neutralisation à 1Hz, 10Hz, 100Hz et 1000 Hz est représentée pour les trois signaux. Seules les amplitudes 14 kV et 18 kV sont représentées comme des valeurs de tension basse et haute, respectivement.

VI.1.2.1 Influence de la fréquence à basse tension (14 kV)

Les profils de potentiel de surface avant et après neutralisation à 14 kV et à différentes fréquences sont représentés sur la **Figure VI.3** montrant l'effet du signal sinus, carré et triangle.

Les résultats montrent que le processus de neutralisation est de plus en plus amélioré avec la fréquence. Comme précédemment, la forme carrée commence à être efficace à des fréquences relativement basses (10 Hz) par rapport aux formes triangulaires et sinusoïdales (**Figure VI.3 (b)**). Lorsque des valeurs de fréquence plus élevées sont utilisées, les trois signaux peuvent conduire à un bon résultat de neutralisation (**Figure VI.3 (c), (d)**).

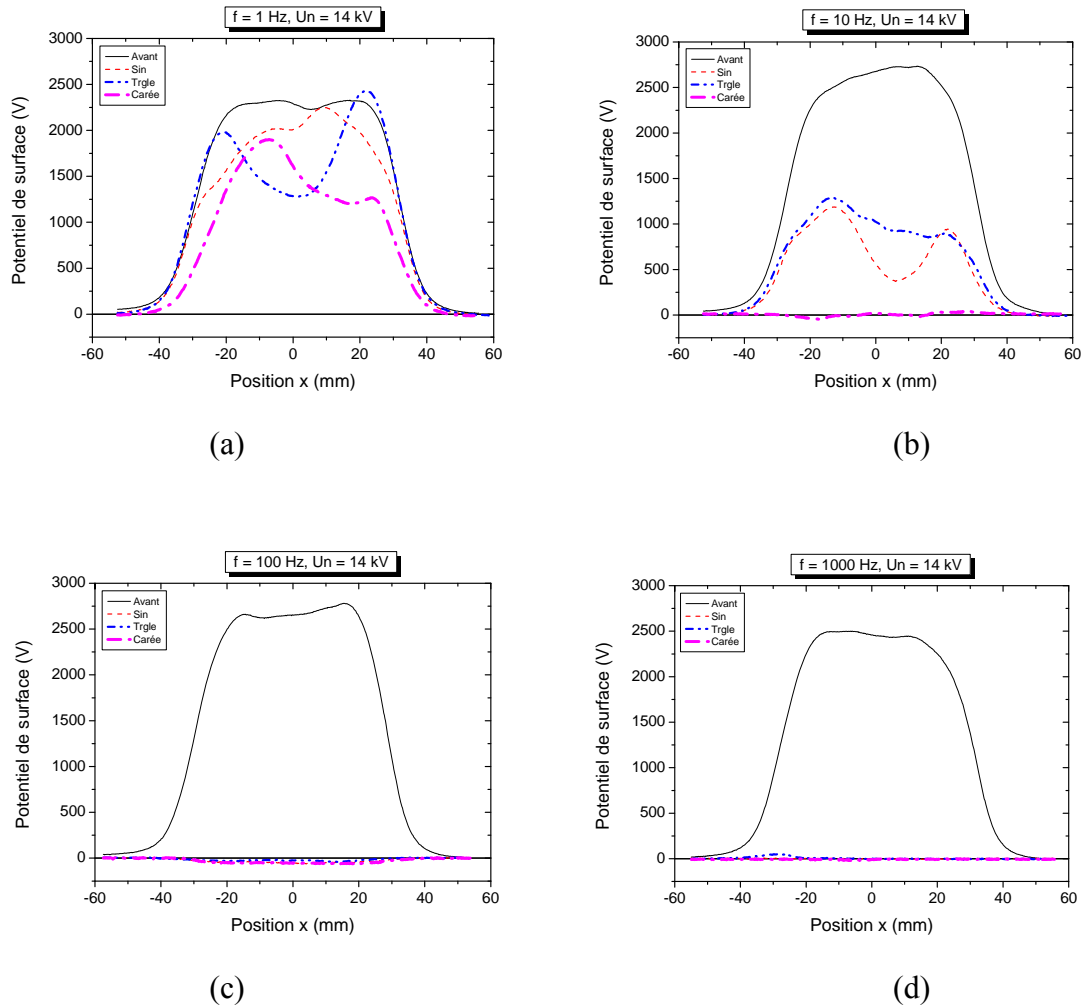


Figure VI.3 : Distribution du potentiel à la surface des couches de polyéthylène granulés avant et après exposition à une DBD alimentée à 14 kV de forme sinusoïdale, triangulaire et carré en fonction de la fréquence : (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 100 Hz et (d) 1000 Hz.

VI.1.2.2 Influence de la fréquence à haute tension (18 kV)

L'augmentation de l'amplitude de la tension améliore rapidement la neutralisation même si la fréquence n'est pas aussi élevée que dans le cas des tensions relativement basses (14 kV). Par exemple, à 10 Hz et 14 kV (**Figure VI.3 (b)**), la tension sinusoïdale réduit le potentiel résiduel à environ la moitié, tandis que dans le cas de 18kV, le signal sinusoïdale conduit à une bonne élimination des charges indésirables avec un potentiel de surface proche de zéro (**Figure VI.4 (b)**). A partir des résultats présentés, on peut conclure qu'une bonne neutralisation de la couche granulaire à l'aide de l'électrode DBD à grille est obtenue lorsqu'une tension ou une fréquence élevée suffisante est appliquée à l'électrode. De plus, les tensions avec un signal de forme carrée peuvent donner d'excellents résultats, même à une tension ou à une fréquence relativement basse. Ce résultat peut être expliqué par la

consommation de puissance qui est plus élevée pour le signal carré par rapport aux deux autres signaux, ce qui permet d’avoir une quantité de charge relativement importante pour le processus de neutralisation.

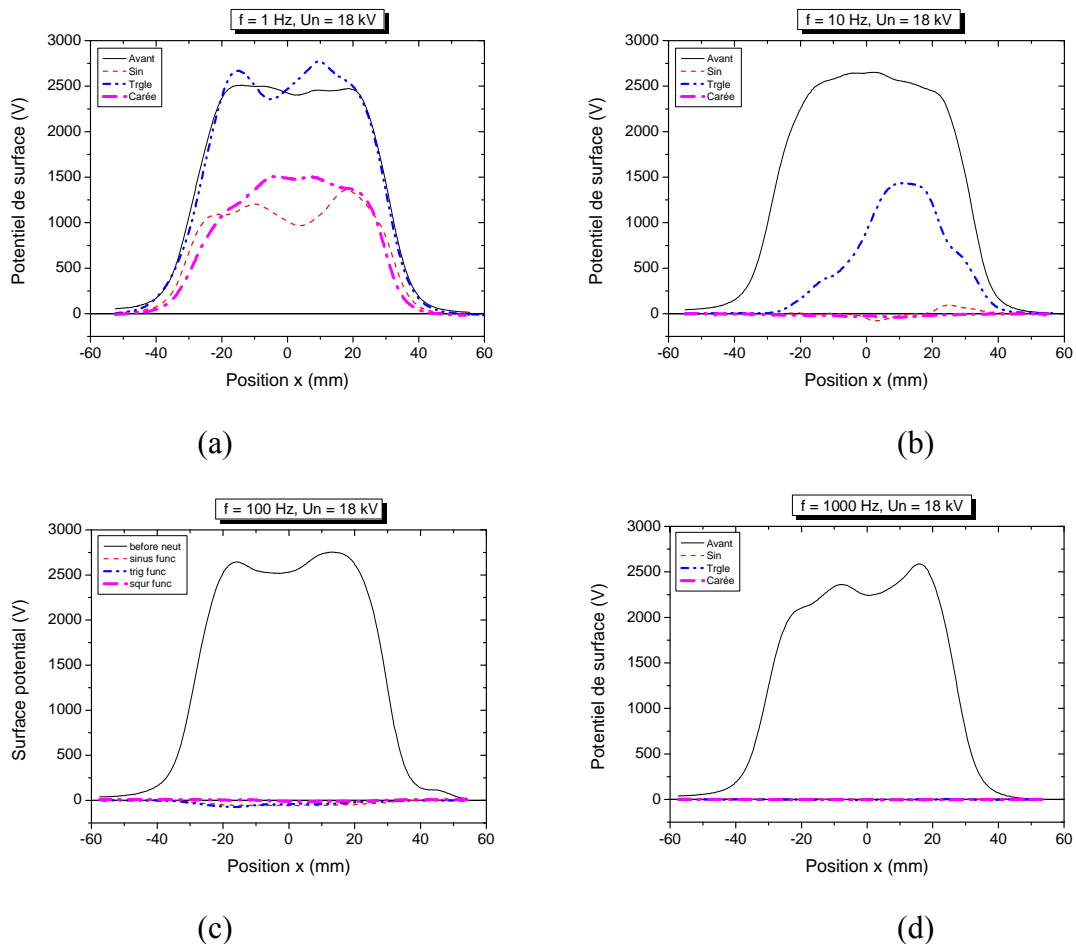


Figure VI.4 : Distribution du potentiel électrique à la surface des couches de polyéthylène granulé avant et après exposition à une DBD alimentée à 18 kV avec des formes sinusoïdale, triangulaire et carrée en fonction de la fréquence : (a) 1 Hz, (b) 10 Hz, (c) 100 Hz et (d) 1000 Hz.

VI.2 Taux de neutralisation

Le **Tableau VI.1** résume le taux de neutralisation correspondant aux trois signaux alternatifs considérés pour différentes tensions et fréquences.

Compte tenu des valeurs proches de 100 % (valeurs marquées dans le tableau), il est clair que le signal alternatif carré peut conduire à une neutralisation appropriée, même à des valeurs de tension et de fréquence faibles. Le signal sinusoïdal arrive alors en seconde place.

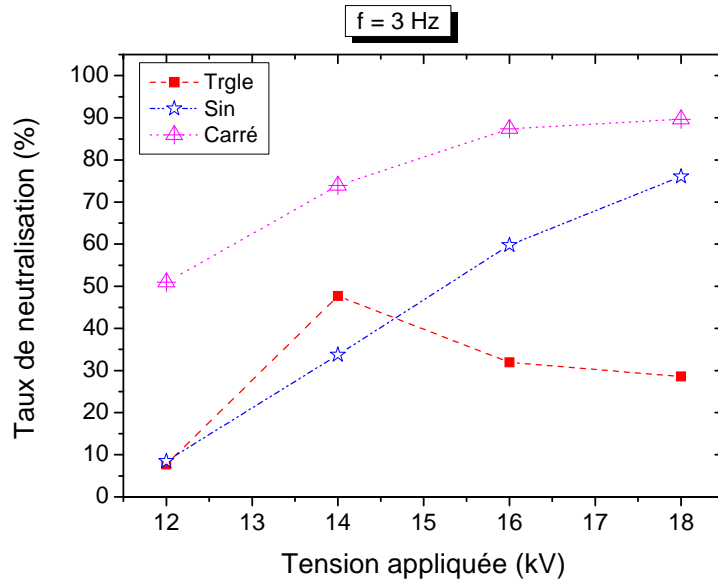
Aux amplitudes et fréquences plus élevées, les trois signaux peuvent avoir le même niveau d'efficacité.

Comme observation générale, l'électrode DBD-Grille utilisée dans le processus de neutralisation des charges de surface commence à être efficace à partir d'une valeur minimale de fréquence ou de tension, variant en fonction du signal utilisé. Par exemple, le signal carré commence à être efficace à 10 Hz - 14 kV, tandis que le signal triangulaire commence à 30 Hz - 18 kV.

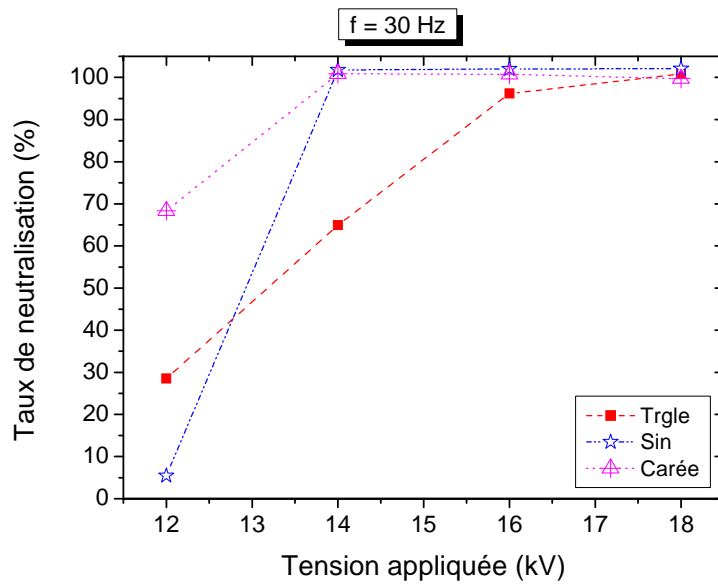
Tableau VI.1 : Taux de neutralisation résultant des expériences d'élimination de charge par une électrode DBD avec grille énergisée pour des signaux alternatifs carrés, triangulaires et sinusoïdales.

f (Hz)	Un (kV)	Taux de Neutralisation Nr (%)		
		Signal Sinusoïdale	Signal Triangulaire	Signal Carrée
1	12	12.09	13.87	41.67
1	14	17.39	14.13	40.32
1	16	21.26	19.22	42.68
1	18	43.71	9.3	48.9
3	12	8.51	7.73	51.01
3	14	33.73	47.72	73.95
3	16	59.78	31.94	87.41
3	18	76.02	28.57	89.67
10	12	10.85	24.27	62.91
10	14	68.01	60.47	99.49
10	16	96.16	77.59	100.28
10	18	99.65	70.17	100.97
30	12	5.44	28.54	68.37
30	14	101.76	64.95	100.88
30	16	102.02	96.19	100.73
30	18	102.11	100.79	99.75
100	12	17.09	20.73	45.73
100	14	101.63	100.97	101.91
100	16	101.56	101.74	100.91
100	18	101.76	101.73	99.84
300	12	9.75	37.03	65.42
300	14	101.77	101.06	102.14
300	16	101.17	100.89	101.07
300	18	101.01	101.05	99.71
1000	12	76.15	15.76	92.76
1000	14	99.88	99.55	100.52
1000	16	99.63	99.98	100.32
1000	18	99.82	100.12	100.05

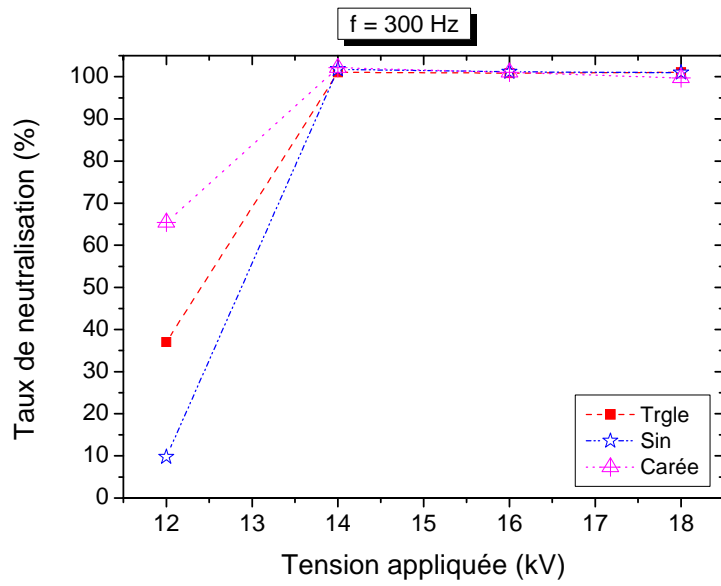
L’évolution du taux de neutralisation en fonction de la tension et de la fréquence est montrée sur les **Figures VI.5** et **Figure VI.6**. Selon les résultats présentés, au-delà des valeurs minimales, les performances du système DBD-grille deviennent quasiment insensibles aux variations de la tension et de la fréquence.



(a)

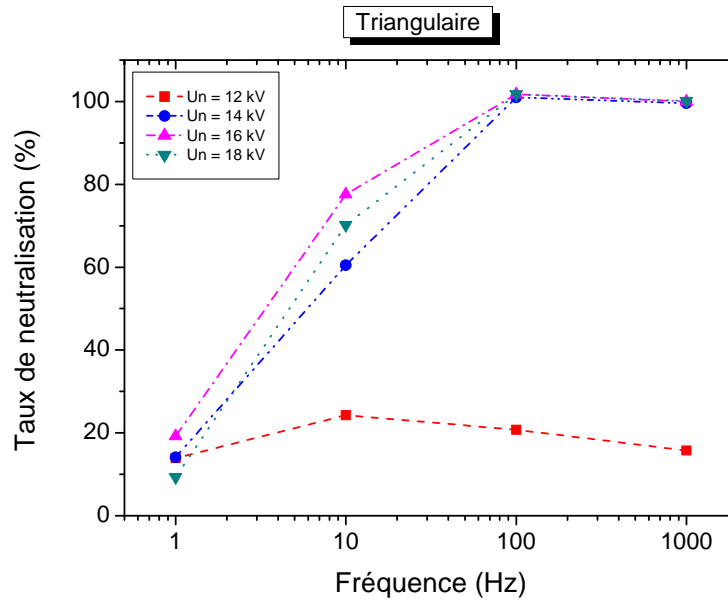


(b)

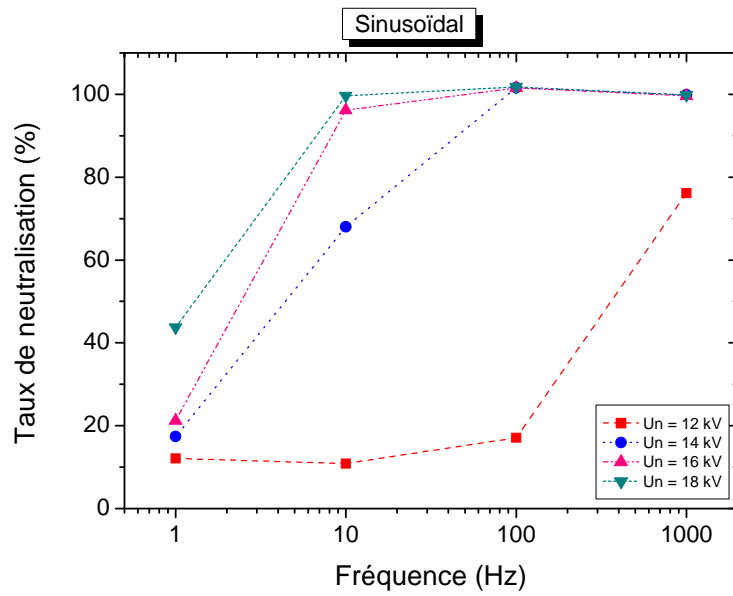


(c)

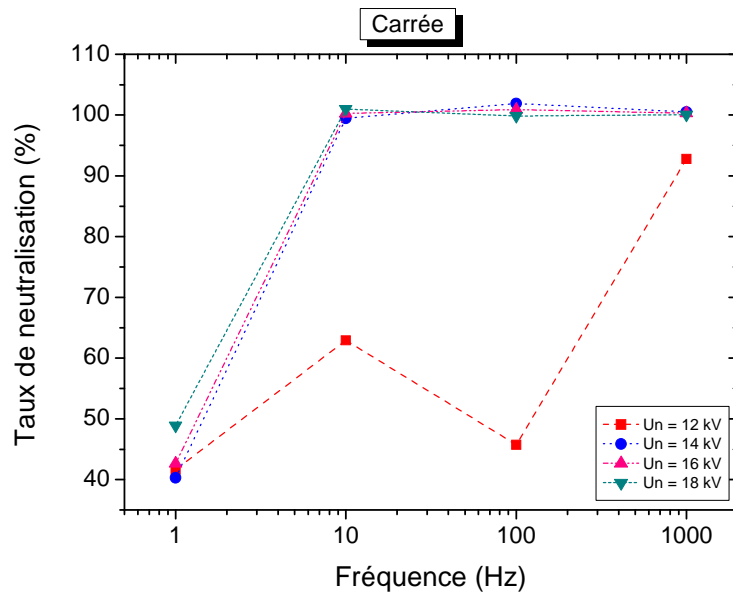
Figure VI.5 : Taux de neutralisation en fonction de la tension de neutralisation à différentes fréquences et formes d'ondes de tension : (a) $f = 3$ Hz, (b) $f = 30$ Hz et (c) $f = 300$ Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure VI.6 : Taux de neutralisation en fonction de la fréquence à différentes amplitudes et formes d’onde de tension: (a) onde triangulaire, (b) onde sinusoïdale, (c) onde carrée.

Les résultats ci-dessus montrent que l’efficacité de la neutralisation par DBD peut être ajustée en agissant sur l’un ou les deux paramètres compensatoire fréquence / tension. En effet, l’effet de la tension peut être rattrapé par la fréquence et *vice-versa*. Par exemple, à 10 Hz et 14 kV, la tension sinusoïdale réduit le potentiel résiduel à environ la moitié ($Nr \approx 68\%$),

tandis que l'augmentation de la tension à 18 kV, pour le même signal et forme d'onde conduit à une bonne élimination de charge de surface avec un taux $Nr \approx 100\%$.

Pour les mêmes valeurs d'amplitude et de fréquence, la forme d'onde de tension carrée présente une durée de décharge plus longue par demi-cycle que les formes sinusoïdales ou triangulaires. De plus, selon [188], la montée et la descente rapides du signal carré pourraient avoir une influence sur la quantité de charge générée (voir **Chap.IV**), ce qui peut expliquer l'efficacité du signal carré par rapport aux deux autres signaux.

VI.3 Discussion sur l'effet de la forme du signal

Les résultats présentés ci-dessus montrent que le choix de la forme du signal peut avoir une influence sur le processus de neutralisation, en particulier pour les valeurs basses de tension et de fréquence. En conséquence, les signaux peuvent être classés en termes d'efficacité comme suit: la forme alternative carrée est la plus efficace, puis la forme d'onde sinusoïdale puis le signal triangle à la dernière place. L'explication de ce résultat peut être attribuée à la puissance consommée par chaque forme et à la durée de la tension pour chaque signal [189] (**Figure VI.7**). En effet, pour chaque demi-cycle d'un signal carré, la tension appliquée à l'électrode DBD est à sa valeur maximale durant toute la demi-période $T / 2$. Pour les formes d'ondes triangulaires et sinusoïdale, la tension dépasse la tension minimale nécessaire pour provoquer une décharge ($U_{décharge}$) en un temps inférieur à $T / 2$. La tension de forme triangulaire, par exemple, ne permet pas d'avoir une décharge que pendant une durée très courte de la demi-période par rapport aux autres signaux. Par conséquent, la quantité de charge neutralisante générée et la durée de neutralisation par cycle varient en fonction de la forme du signal. C'est la raison pour laquelle le signal triangulaire est la forme la plus inefficace, tandis que la forme carrée conduit à une très bonne neutralisation, même à des faibles valeurs de tension et de fréquence.

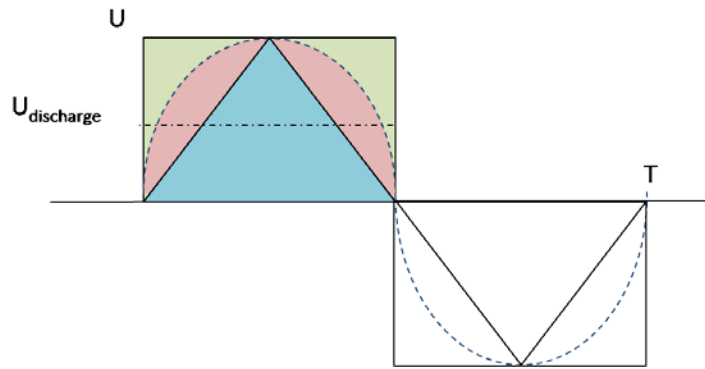


Figure VI.7 : Les trois formes d'onde des signaux alternatifs.

VI.4 Effet de la vitesse de balayage

La Figure VI.8 montre l'effet de vitesse de balayage sur le taux de neutralisation à 300 Hz pour 12 et 14 kV.

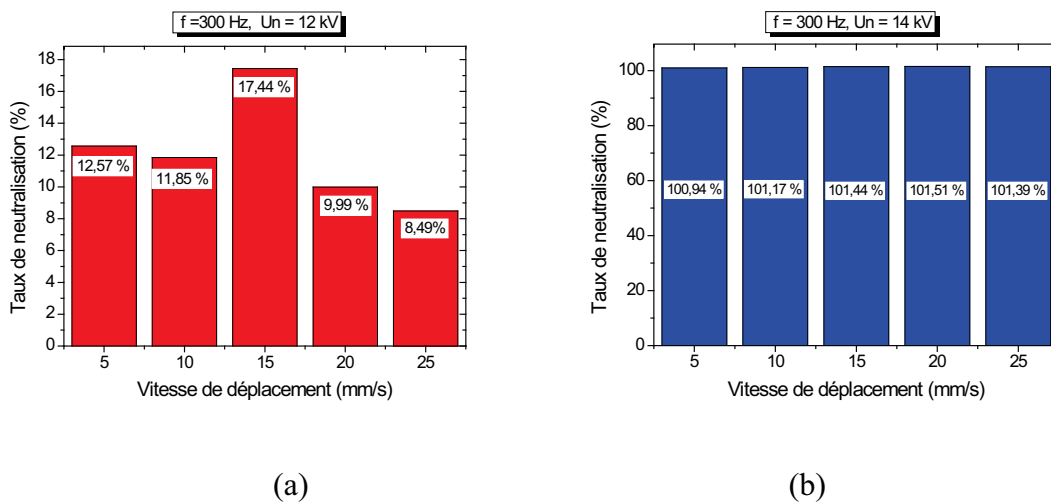


Figure VI.8 : Effet de vitesse de balayage sur le taux de neutralisation à 300 Hz pour: (a) 12 kV, (b) 14 kV.

Dans le cas où la tension de neutralisation est fixé à une valeur de 14 kV, on voit que la vitesse de balayage n'a aucune effet sur le taux de neutralisation de sorte que $Nr \approx 100 \%$ quelque soit la vitesse de balayage à cause du choix de fréquence et de tension de neutralisation qui sont fixées à des valeurs efficaces.

Part contre dans le cas où la tension de neutralisation est fixée à une valeur de 12 kV qui est une valeur inefficace pour déclencher la décharge, on voit que la vitesse de balayage a un effet très faible où le meilleur taux de neutralisation se trouve à une vitesse de 15 mm/s par

apport aux autres vitesses. Comme la distance de l'échantillon qui traverse la décharge à barrière diélectrique est de 60 mm, l'échantillon est exposé sous la DBD avec une vitesse de 15 mm/s un temps autour de 4 s. Donc, pour des temps dépassant les 4 s, l'effet de DBD sur la neutralisation des charges est renversé. L'importance de la durée du traitement DBD et leur influence sur la charge acquise par les matériaux granulaire sont été soulignées par *Nadjem et al.* [147] où les meilleurs effets de DBD sont obtenus pour des expositions relativement courtes (typiquement 3 s).

Conclusion

Ce chapitre montre l'influence de la forme d'onde de la tension et de la fréquence sur le processus de neutralisation par une électrode DBD avec grille. Les principaux résultats sont les suivants:

- L'électrode DBD avec grille est très efficace dans le processus de neutralisation de charge lorsque des tensions ou des fréquences suffisantes sont appliquées. Au-delà des valeurs minimales, ce système d'électrode est très stable et pratiquement indépendant de la tension et de la fréquence.
- L'effet de la tension peut être rattrapé par la fréquence et *vice-versa*.
- La forme d'onde de la tension carrée est la forme la plus efficace par rapport aux formes sinusoïdales ou triangulaires, en raison d'une durée de décharge par cycle très significative. La forme d'onde de tension triangulaire est généralement le cas le moins efficace dans cette étude.
- La neutralisation commence à des valeurs de tension et de fréquence relativement faibles lors de l'utilisation d'un signal carré, tandis que des valeurs plus élevées sont requises pour les signaux de forme d'onde sinusoïdale et triangulaire.
- la vitesse de déplacement n'a pas un effet important sur l'efficacité de la neutralisation par DBD dans des conditions de tension et fréquence favorables à la neutralisation.

CONCLUSION GÉNÉRALE



Charles-Augustin Coulomb

(1785)

« La loi fondamentale de l'électrostatique est établie par Charles-Augustin Coulomb en 1785 ».

CONCLUSION GÉNÉRALE

La présente thèse vise l'étude et l'amélioration de la neutralisation des charges déposées à la surface des couches de granules diélectriques. Une électrode à décharge à barrière diélectrique (DBD) avec grille métallique mise à la terre a été proposée et étudiée afin de rendre l'opération de neutralisation plus sûre et plus efficace.

L'efficacité de neutralisation des charges de surface par décharge à barrière diélectrique dépend à la fois de la géométrie de l'électrode, de la tension et de la fréquence ainsi que la forme d'onde de la haute tension appliquée.

Dans les conditions de l'étude, et pour le cas de l'électrode en DBD en configuration fil-cylindre-grille-plan, on a pu tirer les conclusions suivantes :

- La décharge est principalement de type filamentaire ;
- L'effet de la tension sur la décharge se traduit par l'intensification de l'activité filamentaire de la décharge au fur et à mesure de l'élévation de la tension ;
- La fréquence impacte fortement l'activité de la décharge surtout lorsqu'elle est élevée ;
- La puissance électrique consommée dans le cas de la DBD avec grille est supérieure à celle consommée dans le cas d'une simple DBD ;
- La consommation d'énergie est plus élevée pour les hautes tensions carrées que pour les formes sinusoïdale et triangulaire ;
- La présence des particules induit une diminution de la charge ionique nette résultante dans le volume.

Dans le cadre de l'étude paramètre géométrique, il a été constaté que :

- L'électrode DBD sans grille, n'a pas la capacité de neutraliser les charges indésirables à la surface des matériaux diélectrique, mais peut même recharger le matériau ;

- La grille métallique a une influence significative sur le processus de neutralisation par une décharge DBD ;
- Les résultats de neutralisations obtenus par DBD avec grille sont très satisfaisants lorsque des tensions et des fréquences suffisantes sont appliquées ;
- Le signe et le mécanisme de charge n'a aucun effet sur l'efficacité de la neutralisation par DBD avec grille.

Enfin, l'étude des paramètres électriques a fourni les résultats ci-après :

- Le système d'électrodes DBD avec grille permet d'obtenir une neutralisation complète de la charge de surface avec un taux de neutralisation atteignant 100% de la charge initiale, à une tension et une fréquence suffisantes ;
- L'efficacité de neutralisation augmente au fur et à mesure de l'élévation de la tension appliquée en raison de l'accroissement du champ électrique ;
- La forme carrée de la tension appliquée est la plus efficace par rapport à la forme sinusoïdale ou triangulaire. De plus, les tensions avec un signal carré peuvent donner d'excellents résultats de neutralisation, même à des tensions ou des fréquences relativement basses ;
- La forme d'onde de tension triangulaire est généralement le signal le moins efficace.

Perspectives

Les études réalisées dans le cadre de cette thèse ouvrent des perspectives intéressantes d'amélioration de l'efficacité de neutralisation des charges électrostatiques présentes à la surface des matériaux isolants, en utilisant la décharge à barrière diélectrique. Il serait intéressant d'approfondir encore l'étude de neutralisation par DBD en tenant compte d'autres facteurs, paramètres et géométries :

- Etude de l'effet des paramètres géométriques de l'électrode DBD elle-même : distance inter-électrodes, diamètre de la barrière, géométrie et disposition des électrodes et nature du matériau constituant la barrière.
- Etaler l'étude de la neutralisation à d'autres formes d'isolants comme les média fibreux.

- Utilisation d'autres configurations de DBD qui permettent la neutralisation des matériaux granulaires pendant l'écoulement.
- Une analyse approfondie sur les modifications physico-chimiques des matériaux à neutraliser suite à leur exposition à l'environnement plasmagène de la décharge à barrière diélectrique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Payne J. M., "Contact electrostatic photocopying process and apparatus forming reversed image master using web-type photoconductive surface," U.S. Patent N°. 4, 167,326, 1979.
- [2] Evans R. L., Seno S., "Electrostatic copying machine for books and the like," U.S. Patent N°. 3,395,610, 1968.
- [3] Elmoursi A. A., "Laplacian fields of bell-type electrostatic painting systems," IEEE Transactions on industry applications, Vol. 25, N°. 2, pp. 234-240, 1989. Doi: [10.1109/28.25537](https://doi.org/10.1109/28.25537)
- [4] Miller E. P., "Apparatus and method of electrostatic powdering," U.S. Patent N°. 2,748,018, 1956.
- [5] Dramane B., Zouzou N., Moreau E., Touchard G., "Electrostatic precipitation in wire-to-cylinder configuration: Effect of the high-voltage power supply waveform," Journal of electrostatics, Vol. 67, N°. 2-3, pp. 117-122, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.01.022>
- [6] Cloupeau M., Prunet-Foch B. "Electrostatic spraying of liquids: main functioning modes," Journal of electrostatics, Vol. 25, N°. 2, pp. 165-184, 1990. Doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(90\)90025-Q](https://doi.org/10.1016/0304-3886(90)90025-Q)
- [7] Kachi M., Dascalescu L., "Corona-discharge-based neutralization of charged granular insulating materials in contact with an electrode of opposite polarity," Journal of electrostatics, Vol. 76, pp. 246-253, 2015. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2015.06.00>
- [8] Robinson K., Durkin W., "Electrostatic issues in roll-to-roll manufacturing operations," IEEE Transactions on industry applications, Vol. 46, N°. 6, pp. 2172-2178, 2010. Doi: [10.1109/TIA.2010.2071270](https://doi.org/10.1109/TIA.2010.2071270)
- [9] Glor M., "Hazards due to electrostatic charging of powders," Journal of electrostatics, Vol. 16, N°. 2-3, pp. 175-191, 1985. Doi: [https://doi.org/10.1016/0304-3886\(85\)90041-5](https://doi.org/10.1016/0304-3886(85)90041-5)
- [10] ECKHOFF Rolf K., "Dust explosions in the process industries: identification, assessment and control of dust hazards," Elsevier, 2003.
- [11] Vinson J. E., Liou J. J., "Electrostatic discharge in semiconductor devices: an overview," Proceedings of the IEEE, Vol. 86, N°. 2, pp. 399-420, 1998. Doi: [10.1109/5.659493](https://doi.org/10.1109/5.659493)
- [12] Dragan C., Bilici M., Das S., Dascalescu L., "Triboelectrostatic phenomena in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, N°. 3, pp. 661-667, June 2009. Doi: [10.1109/TDEI.2009.5128503](https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.5128503)
- [13] Cartwright P., Singh S., Bailey A. G., Rose L. J., "Electrostatic Charging Characteristics of Polyethylene Powder During Pneumatic Conveying," IEEE transactions on industry applications, Vol. 21, N°. 2, pp. 541-546, 1985. Doi: [10.1109/TIA.1985.349702](https://doi.org/10.1109/TIA.1985.349702)
- [14] Choi K., Endo Y., Suzuki T., "Experimental study on electrostatic charges and discharges inside storage silo during loading of polypropylene powders," Powder Technology, Vol. 331, pp. 68-73, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.03.007>
- [15] Iuga A. I., Mihailescu M., Coeis A., Dasealescu L., "Particle charge neutralization in roll-type electroseparators," Journal of electrostatics, Vol. 40-41, pp. 639-644, 1997. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(97\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00067-3)
- [16] Ohsawa A., "Modeling of charge neutralization by ionizer," Journal of electrostatics, Vol. 63, N°. 6-10, pp. 767-773, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.043>

- [17] Ohsawa A., “Precisely balanced ionizer using atmospheric pressure glow discharge in air,” *Journal of electrostatics*, Vol. 63, N°. 1, pp. 45-57, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.06.005>
- [18] KLINKENBERG Adriann, VANDER MINNE Johan Leonard, “Electrostatics in the Petroleum Industry,” Elsevier, 1958.
- [19] Gibson N., “Static electricity _an industrial hazard under control?” *journal of electrostatics*. Vol. 40-41, pp. 21-30, 1997. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(97\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00010-7)
- [20] LACRAMPE Nicolas, “ Méthodologie de modélisation et de caractérisation de l’immunité des cartes électroniques vis-à-vis des décharges électrostatiques (ESD),” Thèse de Doctorat, L’Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2008.
- [21] HAMMI Tarik, “ Étude de méthodes de mesures et réalisation d’un banc de test pour l’évaluation des propriétés électrostatiques des textiles,” Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2005.
- [22] GIRALDO Sandra, “Etude de la robustesse d'amplificateurs embarqués dans des applications portables soumis à des décharges électrostatiques (ESD) au niveau système,” Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [23] Szafraniec J., Brearey R., Robinson K., Health C., Inc, “Voltage Diffusion in an Insulating Sheet with a Conductive Layer,” *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*. Paper I2, pp.1-7, 2008.
- [24] KIYOSHI Ota, “Evaluation and Prevention of Electrostatic Hazards in Chemical Plants,” SUMITOMO KAGAKU (Sumitomo Chemical Co., Ltd) Process & Production Technology Center, pp.1-12, 2004.
- [25] LODEL Roland, “Etude de cas: stockage et transport de produits pulvérulents,” Séminaire Euroforum, Explosions de poussières, pp. 98-105, 1997.
- [26] BOUCHARBEB Siham, “ Etude de matériaux irradiés sous faisceau d'électrons,” Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2014.
- [27] BERGER N., DENOZIERE M., GILET J.-C., GUIONNET D., ROMAT H., “ Électricité Statique,” Editions: INRS ED 874 (L’Institut National de Recherche et de Sécurité) - 2ème édition, 2004.
- [28] GUITARD Nicolas, “Caractérisation de défauts latents dans les circuits intégrés soumis à des décharges électrostatiques,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2006.
- [29] ROMANESCU Sorin, “Modèle compact paramétrable du SCR pour applications ESD et RF,” Thèse de Doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [30] MARDIGUIAN Michel, “Electrostatic Discharge,” *Understand, Simulate, and Fix ESD Problems*. John Wiley & Sons. Third Edition, 2011.
- [31] ESD Association, “Fundamentals of Electrostatic Discharge,” Part One—An Introduction to ESD. ESD Association, Rome, NY, 2013.
- [32] AMERASEKERA E. Ajith, DUVVURY Charvaka, “ESD in Silicon Integrated Circuits”, 2ème édition. 2002.
- [33] ATHANASIOU Sotirios, “Conception, fabrication and characterization of new advanced FDSOI devices for ESD robustness and performance,” Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, 2017.
- [34] CUI Qiang, LIOU Jun J., HAJJAR Jean-Jacques, SALCEDO Javier, ZHOU Yuanzhong, PARTHASARATHY Srivatsan, “On-Chip Electro-Static Discharge (ESD) Protection For Radio-Frequency Integrated Circuits,” Springer, 2015.
- [35] DUGUET Etienne, PARIENTE Jean-Louis, CONORT Pierre, “ Chapitre II : Aspects physico-chimiques des biomatériaux utilisés en Urologie,” *Progrès en Urologie*, Vol. 15, N°. 5, pp. 865-886, 2005.

- [36] HUMBERT Julien, “Conception, élaboration et production d'agrocomposite à partir de tourteau de tournesol : étude du procédé d'extrusion-formulation-granulation et d'injection-moulage,” Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2008.
- [37] JARROUSSE Gauthier, “Adhésion des polymères semi-cristallins entre leur température de transition vitreuse et leur température de fusion,” Thèse de Doctorat, Université de Paris 6, 2004.
- [38] MOUATSI Abdelmalek, “Etude de l'effet de l'humidité sur les propriétés électrique de la surface d'un polymère”, Mémoire de Magistère, Université Mentouri de constantine.
- [39] HOANG Mai Quyen, “Implémentation de la polarisation dans un modèle de transport de charges appliqué au PEN sous contrainte électrique,” Thèse de Doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2014.
- [40] KAHÈOUCHE Ahmed, “Contribution à la modélisation des mécanismes de transport de charges électriques dans les polyéthylènes,” Thèse de Magister, Université de Constantine, 2000.
- [41] WEISS P., “ Cours : La chimie des polymères”, 2010.
<http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap3/site/html/cours.pdf>
- [42] COELHO Roland, ALADENIZE Bernhard, “Les diélectriques: propriétés diélectriques des matériaux isolants,” Hermès, 1993.
- [43] ZOZOU Nouredine, “Étude de la mobilité moléculaire du PEN destine à la fabrication des condensateurs : influence de la microstructure,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier (Toulouse 3), 2002.
- [44] DUBOIS Jean-Claude, “Propriétés diélectriques des plastiques,” Technique de l'Ingénieur, Plastiques et Composites, AM 3 140, 2001.
- [45] “Different Types of Polarization Mechanism in Dielectrics”,
<http://vedupro.blogspot.com/2013/07/different-types-of-polarization.html>
- [46] “Types of polarisation,” <https://www.embibe.com/exams/types-of-polarisation/>
- [47] “What is dielectric polarization?” <https://www.quora.com/What-is-dielectric-polarization>
- [48] Knight R. J., Nur A., “The dielectric constant of sandstones, 60 kHz to 4 MHz,” Geophysics, Vol. 52, N°.5, pp. 644-654, 1987. Doi: <https://doi.org/10.1190/1.1442332>
- [49] Maxwell J. C., “A treatise on electricity and magnetism. With prefaces by WD Niven and JJ Thomson,” Reprint of the third (1891) edition, 1954.
- [50] Wagner K. W., “Erklärung der dielektrischen nachwirkungsvorgänge auf grund maxwellscher vorstellungen,” Archiv für Elektrotechnik, Vol. 2, N°. 9, pp. 371-387, 1914. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF01657322>
- [51] MOUDOUD Mustapha, “ Etude de la conduction électrique dans les polymères isolants,” Thèse de Doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [52] ABID Djamila, “Caractérisation des polymères par la méthode des courants thermiquement stimulés,” Mémoire de Magistère, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Mohamed BOUDIAF), 2010.
- [53] KACHI Miloud, “Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires,” Thèse de Doctorat, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2011.
- [54] REMADNIA Mokdad, “Déclin de potentiel sur la surface d'un film isolant (PET),” Mémoire de Magister, Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2007.
- [55] DUTRIEZ Cédric, “Corrélations entre les propriétés diélectriques et mécaniques des Polymères ; influence de la température,” Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lyon, 2004.
- [56] Le roy S., Segur P., Teyssedre G., Laurent C., “Description of bipolar charge transport in polyethylene using a fluid model with a constant mobility: model prediction,” Journal of

- physics D: Applied physics, Vol. 37 N° 2, pp. 298-305, 2003. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/37/2/020>
- [57] LE ROY Séverine, “Modélisation numérique des phénomènes de transport électrique dans un isolant polyéthylène sous contrainte électrique,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2004.
- [58] KAO Kwan Chi, “Dielectric Phenomena in solids,” Elsevier Academic press, 2004.
- [59] SEGUI Yvan, “Diélectriques, courants de conduction,” Techniques de l'ingénieur, D 2301-5, 2000.
- [60] Das S., Samuila A., Dragan C., Dascalescu L., “Behaviour of charges insulating particles in contact with a rotating roll electrode,” Journal of Electrostatics, Vol. 67 N° 2-3, pp. 189-192, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2008.12.016>
- [61] Dascalescu L., Morar R., Iuga A., Samuila A., Neamtu V., Suarasan I., “Charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators,” Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 27, N° 6, pp. 1242-1251, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/6/023>
- [62] BOUZID Kheireddine, “Comportement à l'usure et à la corrosion dans différents milieux, de systèmes ternaires des nitrures élaborés par pulvérisation cathodiques dual Magnétron,” Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, 2015.
- [63] Holme I., McIntyre J. E., Shen Z. J., “Electrostatic charging of textiles,” Textile Progress, vol. 28, N° 1, pp. 1-85, 1998.
- [64] PANG Hailong, “Dépoussiérage Electrostatique pour Les Particules Submicroniques en Atmosphère Usuelle (Terre) et Raréfiée (Planète Mars),” Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier - Grenoble I, 2006.
- [65] TABTI Belaid, “ Contribution à la modélisation de dispositifs et la caractérisation de matériaux en électrotechnique”, Thèse de Doctorat, Université de Bejaia, 2011.
- [66] KAISER, Kenneth L., “Electrostatic discharge”, CRC Press, 2006.
- [67] Kacprzyk R., Stec C., “Measurements of the surface charge density on moving webs,” Journal of Electrostatics, Vol. 40-41, pp. 455-461, 1997. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0304-3886\(97\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3886(97)00087-9)
- [68] Lacks D. J., SANKARAN R. M., “Contact electrification of insulating materials,” Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 44, N° 45, pp. 453001, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/45/453001>
- [69] Liu C. y., Bard A. J., “Electrons on dielectrics and contact electrification,” Chemical physics letters, vol. 480, N° 4-6, pp. 145-156, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2009.08.045>
- [70] AGUET Michel, IANOZ Michel, “ Haute tension,” PPUR presses polytechniques, 2001.
- [71] STAUDINGER Hermann, “Die hochmolekularen organischen Verbindungen, Kautschuk und Cellulose (the high-molecular organic compounds rubber and cellulose),” Springer, Berlin, 1932.
- [72] “Piézoélectricité”, <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-piezoelectricite-4807/>
- [73] DRAMANE Boni, “ Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge à barrière diélectrique-étude électrique, granulométrique et aérodynamique,” Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2009.
- [74] **MOUSSAOUI Aida**, “Caractérisation des décharges électriques produits dans les gaz isolants,” Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945_Guelma, 2014.
- [75] Koller J., Kříha V., Píchal J., Aubrecht L., “Corona discharge light emission and electric field intensity comparison,” Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, N° 3, pp. C810-C815, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF03166491>

- [76] Lowke J. J., Morrow R., "Theory of electric corona including the role of plasma chemistry," Pure and applied chemistry, Vol. 66, N°.6, pp. 1287-1294, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac199466061287>
- [77] LACOSTE Déanna A., PAI David, LAUX Christophe O., "Ion wind effects in a positive DC corona discharge in atmospheric pressure air," 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, N°.2004-0354, PP. 1-7, 2004.
- [78] Trichel G. W., "The mechanism of the negative point to plane corona near onset," Physical Review, Vol. 54, N°. 12, pp. 1078-1084, 1938. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.54.1078>
- [79] Zouzou N., Moreau E., Touchard G., "Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan," Journal of Electrostatics, Vol. 64, N°.7-9, pp. 537-542, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.10.036>
- [80] Goldman M., Goldman A., Sigmond R. S., "The corona discharge, its properties and specific uses," Pure and Applied Chemistry, Vol. 57, N°.9, pp. 1353-1362, 1985. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac198557091353>
- [81] BECKER Kurt H., KOGELSCHATZ U., SCHOENBACH K. H., BARKER R. J., "Non-equilibrium air plasmas at atmospheric pressure," CRC press, 2004.
- [82] LABERGUE Alexandre, "Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas-Application au contrôle de décollements d'écoulements," Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [83] Kodama T., Suzuki T., Mogami T., Watano S., "A new passive-type electrostatic eliminator used in a powder storage silo," Powder technology, Vol. 135, pp. 209-215, 2003. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00161-X](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00161-X)
- [84] Kachi M., Nadjem A., **Moussaoui A.**, Zouzou N., Dascalescu L., "Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, N°.2, pp. 390-395, 2018. Doi: [10.1109/TDEI.2017.006493](https://doi.org/10.1109/TDEI.2017.006493)
- [85] Kachi M., **Moussaoui A.**, Nadjem A. K., "Neutralization of Charged Granular Insulating Materials Using DC Corona Discharge", 10th National conference on high voltage CNHT, 2016.
- [86] Kachi M., Dascalescu L., Herous L., Nemancha M., "Experimental study of charge neutralization at the surface of granular layers of insulating materials," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 49, N°.2, pp. 691-698, 2013. Doi: [10.1109/TIA.2013.2243393](https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2243393)
- [87] Andrews T., Tait P. G., "VII. On the volumetric relations of ozone, and the action of the electrical discharge on oxygen and other gases," Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 150, pp. 113-131, 1860. Doi: <https://doi.org/10.1098/rstl.1860.0008>
- [88] Siemens W. V., "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen," Annalen der Physik, Vol. 178, N°.9, pp. 66-122, 1857. Doi : <https://doi.org/10.1002/andp.18571780905>
- [89] Manley T. C., "The electric characteristics of the ozonator discharge," Transactions of the electrochemical society, vol. 84, N°1, pp. 83-96, 1943. Doi: [10.1149/1.3071556](https://doi.org/10.1149/1.3071556)
- [90] SUBLET Alban, "Caractérisation de décharges à barrière diélectriques atmosphériques et sub-atmosphériques et application à la déposition de couches d'oxyde de silicium," Thèse pour l'obtention du grade de Docteur ès sciences, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2007.
- [91] Kogelschatz U., "Collective phenomena in volume and surface barrier discharges", Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, Vol. 257, N°.1, pp. 012015, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/257/1/012015>

- [92] Gibalov V. I., Pietsch G. J., “The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 33, N° 20, pp. 2618-2636, 2000. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/33/20/315>
- [93] Wagner H. E., Brandenburg R., Kozlov K. V., Sonnenfeld A., Michel P., Behnke J. F., “The barrier discharge: basic properties and applications to surface treatment”, *Vacuum*, Vol. 71 N° 3, pp.417-436, 2003. Doi: [10.1016/S0042-207X\(02\)00765-0](https://doi.org/10.1016/S0042-207X(02)00765-0)
- [94] NAUDÉ Nicolas, “Etude électrique de la physique d'une décharge de Townsend à la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur: modèle et expérience,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2005.
- [95] Kogelschatz U., “Dielectric-barrier discharges: their history, discharge physics, and industrial applications,” *Plasma chemistry and plasma processing*, vol. 23, N° 1, pp. 1-46, 2003. Doi: <https://doi.org/10.1023/A:102247090>
- [96] SARRA-BOURNET Christian, “Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surface dans le domaine des biomatériaux,” Mémoire pour l'obtention du grade de maître ès sciences, Université de Laval, 2007.
- [97] Kogelschatz U., “Silent discharges and their applications,” *Proc. 10th International Conference on Gas Discharge and their Applications*, Swansea, Vol. 3, pp. 972-980, 1992.
- [98] Kulikovskiy A. A., “The structure of streamers in N₂. II. Two-dimensional simulation,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 27 N° 12, pp. 2564-2569, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/12/018>
- [99] Hassouni K., Massines F., Pouvesle J. M., “Plasmas hors-équilibre à des pressions atmosphériques,” *Publications de l'Université de Saint Etienne*, pp. 49-108, 2004.
- [100] Bauville G., Choque P., Lacour B., Michel E., Puech V., Silberberg E., “Traitement de tôles métalliques par décharge à barrière diélectrique monopolaire fonctionnant à pression atmosphérique,” *Proceeding des résumés du 8^{iem} congrès “Plasma” de la société Française de physique -Cadarache- St Paul Lez Durance, 5-7 Mai 2003.*
- [101] Gherardi N., “Physico-chimie et régimes des décharges contrôlées par barrière diélectrique en mélange azote - gaz oxydant - silane. Application à l'activation de surfaces polymères et aux dépôts,” Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1998.
- [102] BEAUDETTE Tristan, “Caractérisation et Optimisation de lampes planes sans mercure: décharges à barrières diélectriques et luminophores,” Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [103] Bartnikas R., “Note on ac discharge between metallic-dielectric electrodes in helium,” *Journal of Applied Physics*, Vol. 40 N° 4, pp. 1974-1976, 1969. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.1657880>
- [104] Kanazawa S., Kogoma M., Moriwaki T., Okazaki s., “Stable glow plasma at atmospheric pressure,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 21 N° 5, pp. 838-840, 1988. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/5/028>
- [105] Kanazawa S., Kogoma M., Okazaki S., Moriwaki T. “Glow plasma treatment at atmospheric pressure for surface modification and film deposition,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, Vol. B37/38, pp.842-845, 1989. Doi: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(89\)90310-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(89)90310-8)
- [106] Yokoyama T., Kogoma M., Moriwaki T., Okazaki S., “The mechanism of the stabilisation of glow plasma at atmospheric pressure,” *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 23 N° 8, pp. 1125-1128, 1990. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/23/8/021>
- [107] [107] Massines F., Gouda G., “A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure,” *Journal of*

- Physics D: Applied Physics, Vol. 31 N°24 pp. 3411-3420, 1998. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/24/003>
- [108] Naudé N., Cambronne J.P., Gherardi N., Massines F., “Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure townsend discharge to a filamentary discharge,” Journal of Physics D : Applied Physics, Vol. 38 N°4, pp.530-538, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/38/4/004>
- [109] Roth J. R., Laroussi L., Liu C., “Experimental generation of steady-state glow discharge at atmospheric pressure,” In Proc. 19th IEEE International Conference on Plasma Science, Tampa, pp. 170-171, 1992. Doi: [10.1109/PLASMA.1992.697987](https://doi.org/10.1109/PLASMA.1992.697987)
- [110] Liu C., Roth J. R., “Plasma-related characteristics of a steady-state glow discharge at atmospheric pressure”, In Proc. 20th IEEE International Conference on Plasma Science, Vancouver, pp.129, 1992. Doi: [10.1109/PLASMA.1993.593248](https://doi.org/10.1109/PLASMA.1993.593248)
- [111] Messaoudi R., Massines F., Younsi A., Despax B., Mayoux C., “Humidity effect on corona discharges, role of electric field”, In Proc. 10th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Swansea, pp.318-321, 1992.
- [112] Massines F., Mayoux C., Messaoudi R., Rabehi A., Ségur P., “Experimental study of an atmospheric pressure glow discharge, application to polymers surface treatment”, In Proc. 10th International Conference on Gas Discharges and their Applications, Swansea, pp.730-733, 1992.
- [113] Massines F., Gherardi N., Naudé N., Ségur P., “Recent advances in the understanding of Homogeneous dielectric barrier discharges,” The European Physical Journal-Applied Physics, Vol. 47, N° 2, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2009064>
- [114] Roth J., Sherman D., Wilkinson S., “Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma,” 36th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, paper 98-0328, 1998. Doi: <https://doi.org/10.2514/6.1998-328>
- [115] Moreau E., “Airflow control by non-thermal plasma actuators,” Journal of PhysicsD : Applied Physics, Vol. 40 N°3, pp. 605-636, 2007. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/40/3/S01>
- [116] Enloe C. L., McHarg M. G., McLaughlin T. E., “Time-correlated force production measurements of the dielectric barrier discharge plasma aerodynamic actuator,” Journal of Applied Physics, Vol. 103 N°7, 2008. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.2896590>
- [117] Grundmann S., Tropea C., “Experimental damping of boundary-layer oscillations using DBD plasma actuators,” International Journal of Heat and Fluid Flow, Vol. 30 N°3, pp. 394-402, 2009. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2009.03.004>
- [118] Corke T. C., Enloe C. L., Wilkinson S. P., “Dielectric barrier discharge plasma actuators for ow control,” Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42 N°1, pp. 505-529, 2010. Doi: <https://doi.org/10.1146/annurev-fluid-121108-145550>
- [119] Post M. L., Corke T. C., “Separation control on high angle of attack airfoil using plasma actuators,” AIAA journal, vol. 42 N°11, pp. 2177-2184, 2004. Doi: <https://doi.org/10.2514/1.2929>
- [120] PIETSCH, G. J., “Peculiarities of dielectric barrier discharges,” Contributions to Plasma Physics, vol. 41, N° 6, pp.620-628, 2001. Doi: [https://doi.org/10.1002/1521-3986\(200111\)41:6<620::AID-CTPP620>3.0.CO;2-H](https://doi.org/10.1002/1521-3986(200111)41:6<620::AID-CTPP620>3.0.CO;2-H)
- [121] d’Agostino R., Capezzuto P., Bruno G., Cramarossa F., “Mechanism of etching, polymerization and deposition in RF (radio frequency) discharges,” Pure and Applied Chemistry, Vol. 57, N°9, pp. 1287-1298, 1985. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac198557091287>

- [122] Venugopalan M., “Basic processes in glow discharge plasmas,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 23, N° 4, pp. 405-417, 1987. Doi: [https://doi.org/10.1016/0168-583X\(87\)90467-8](https://doi.org/10.1016/0168-583X(87)90467-8)
- [123] Denes F. S., Manolache S., “Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science,” Progress in polymer science, Vol. 29, N° 8, pp. 815-885, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2004.05.001>
- [124] Coburn J. W., “Surface processing with partially ionized plasmas,” IEEE transactions on plasma science, Vol. 19, N° 6, pp. 1048-1062, 1991. Doi: [10.1109/27.125030](https://doi.org/10.1109/27.125030)
- [125] Sheu M. S., Hudson D. M., Loh I. H., “Biomaterials surface modification using plasma gas discharge processes,” Encyclopedic handbook of biomaterials and bioengineering. Part A: Materials, Vol. 1, pp. 865-894, 1995.
- [126] Vasilets V. N., Hirata I., Iwata H., Ikada Y., “Photolysis of a fluorinated polymer film by vacuum ultraviolet radiation,” Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry, Vol. 36, N° 13, pp. 2215-2222, 1998. Doi: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0518\(19980930\)36:13<2215::AID-POLA7>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0518(19980930)36:13<2215::AID-POLA7>3.0.CO;2-S)
- [127] Wertheimer M. R., Fozza A. C., Holländer A., “Industrial processing of polymers by low-pressure plasmas: the role of VUV radiation,” Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, Vol. 151, N° 1-4, pp. 65-75, 1999. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(99\)00073-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(99)00073-7)
- [128] MERICAM-BOURDET Nicolas, “Recherche d’optimisation énergétique d’un réacteur plasma froid de traitement d’effluents gazeux chargés en composés organiques volatils à pression atmosphérique,” Thèse de Doctorat, Ecole Doctorale Sciences et Technologies de l’Information des Télécommunications et des Systèmes, 2012.
- [129] Kogelschatz U., Eliasson B., Egli W., “Dielectric-Barrier Discharges. Principle and Applications,” Le Journal de Physique IV, vol. 7, N° C4, pp. C4-47-C4-66, 1997. Doi : <https://doi.org/10.1051/jp4:1997405>
- [130] Eliasson B., Egli W., Kogelschatz U., “Modelling of dielectric barrier discharge chemistry,” Pure and applied chemistry, Vol. 66, N° 6, pp.1275-1286, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac199466061275>
- [131] Eliasson B., “CO2 chemistry: An option for CO2 emission control?” in: Carbon Dioxide Chemistry, pp.5-15, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-1-85573-799-0.50006-6>
- [132] Bill A., Wokaun A., Eliasson B., Killer E., Kogelschatz U., “Greenhouse gas chemistry,” Energy Conversion and Management, vol. 38, pp. S415-S422, 1997. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(96\)00304-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(96)00304-4)
- [133] Okazaki K., Nozaki T., Uemitsu Y., “Direct conversion from methane to methanol by a pulsed silent discharge plasma,” International Union of Pure and Applied Chemistry; American Physical Society, New York, NY (United States), 1995.
- [134] Shepelev S. S., Gesser H. D., Hunter N. R., “Light paraffin oxidative conversion in a silent electric discharge,” Plasma chemistry and plasma processing, vol. 13 N° 3, pp. 479-488, 1993. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF01465877>
- [135] Linsley Hood J.L., “The corona treatment of plastic films,” in Proc. 6 th Int. Conf. on Gas Discharges and Their Applications (GD 80), Edinburgh, pp. 86-90, 1980.
- [136] Markgraf D. A., “Corona Treatment: An Oüerüiew”, (2001). <https://www.enerconind.com/mediaLib/stml/techPaper/Enercon-corona-treating-overview.pdf?ext=.pdf>
- [137] Uehara T., “Corona discharge treatment of polymers,” in Adhesion Promotion Techniques: Technological Application (Mittal K. L., Pizzi A.), Marcel Dekker, New York,Basel, Chapter 7, pp.191-204, 1999.

- [138] Donohoe K. G., Wydeven T., "Plasma polymerization of ethylene in an atmospheric pressure discharge," *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 765-771, 1979. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.1979.070230905>
- [139] Kanazawa S., Kogoma M., Moriwaki T., Okazaki S., "Stable glow plasma at atmospheric pressure," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 21 N° 5, pp. 838-840, 1988. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/21/5/028>
- [140] Yokoyama T., Kogoma M., Kanazawa S., Moriwaki T., Okazaki S., "The improvement of the atmospheric-pressure glow plasma method and the deposition of organic films," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 23, N° 3, pp. 374-377, 1990. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/23/3/021>
- [141] Okazaki S., Kogoma M., Uehara M., Kimura Y., "Appearance of stable glow discharge in air, argon, oxygen and nitrogen at atmospheric pressure using a 50 Hz source," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 26 N° 5, pp. 889-892, 1993. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/26/5/025>
- [142] Kogoma M., Okazaki S., "Raising of ozone formation efficiency in a homogeneous glow discharge plasma at atmospheric pressure," *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 27 N° 9, pp. 1985-1987, 1994. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/27/9/026>
- [143] Massines F., Mayoux C., Messaoudi R., Rabehi A., Ségur P., "Experimental study of an atmospheric pressure glow discharge: Application to polymers surface treatment," In: *Proc. 10 th Int. Conf. Gas Discharges and their Applications*, pp. 730-733, 1992.
- [144] Massines F., Gadri R. B., Decomps P., Rabehi A., Segur P., Mayoux C., "Atmospheric pressure dielectric controlled glow discharges: diagnostics and modelling," in: *AIP Conference Proceedings*. AIP, pp. 306-315, 1996. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.50123>
- [145] Salge J., "Plasma-assisted deposition at atmospheric pressure," *Surface and Coatings Technology*, vol. 80 N° 1-2, pp. 1-7, 1996. Doi: [https://doi.org/10.1016/0257-8972\(95\)02676-2](https://doi.org/10.1016/0257-8972(95)02676-2)
- [146] Meiners S., Salge J.G.H., Prinz E., Forster F., "Surface modification of polymer materials by transient gas discharges at atmospheric pressure," *Surface and Coatings Technology*, Vol. 98 N° 1-3, pp. 1121-1127, 1998. Doi : [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(97\)00234-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(97)00234-X)
- [147] Nadjem A., Kachi M., Bekkara F., Medles K., Zegloul T., Dascalescu L., "Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment," *Journal of Electrostatics*, Vol. 86, pp. 18-23, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2016.12.017>
- [148] Bitzer D. L., Slottow H. G., "The plasma display panel: a digitally addressable display with inherent memory," *joint computer conference (San Francisco)*, Vol. 29, pp. 541-547, 1966. Doi: [10.1145/1464291.1464349](https://doi.org/10.1145/1464291.1464349)
- [149] Slottow H. G., "Plasma displays," *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 23 N° 7, pp. 760-772, 1976. Doi: [10.1109/T-ED.1976.18480](https://doi.org/10.1109/T-ED.1976.18480)
- [150] Boeuf J. P., "Plasma display panels: physics, recent developments and key issues," *Journal of physics D: Applied physics*, Vol. 36, N° 6, pp. R53-R79, 2003. Doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/6/201>
- [151] BENTERROUCHE Lyes, "Investigations sur l'application des plasmas froids dans la stérilisation", Thèse de Doctorat, Université Frères Mentouri-Constantine, 2015.
- [152] "Plasma display panel electronics" <https://www.britannica.com/technology/plasma-display-panel>
- [153] Ishchenko V.N., Lisitsyn V. N., Safonov V. P., Sorokin A. R., "High-pressure electric-discharge CO₂ laser," *Soviet Journal of Quantum Electronics*, Vol. 5 N° 7, pp. 738-741, 1975. Doi: <https://doi.org/10.1070/QE1975v005n07ABEH011410>

- [154] Christensen C. P., "Pulsed transverse electrodeless discharge excitation of a CO₂ laser," Applied Physics Letters, vol. 34 N°3, pp. 211-213, 1979. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.90733>
- [155] Yagi S., Hishii M., Tabata N., Nagai H., Nagai A., "Silent Discharge CO₂ Laser," The Review of Laser Engineering, Vol. 5 N°3, pp. 171-176, 1977. Doi: <https://doi.org/10.2184/laj.5.171>
- [156] Yagi S., Tanaka M., Ogawa S., Kuzumoto M., Tabata N., "Silent Discharge CO₂ Laser," The Review of Laser Engineering, Vol. 10, N°5, pp. 495-500, 1982. Doi: <https://doi.org/10.2184/laj.10.495>
- [157] Tanaka M., Yagi S., Tabata N., "High frequency silent discharge and its application to CW CO₂ laser excitation," in : 8th Int. Conf. on Gas Discharge and Their Application, Oxford, England, pp. 16-20, 1985.
- [158] Yasui K., Kuzumoto M., Ogawa S., Tanaka M., Yagi S., "Silent-discharge excited TEM₀₀ 2.5 kW CO₂ laser," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 25 N°4, pp. 836-840, 1989. Doi: [10.1109/3.17348](https://doi.org/10.1109/3.17348)
- [159] Yagi S., Kuzumoto M., "Silent discharges in ozonisers and CO₂ lasers," Australian Journal of Physics, Vol. 48 N°3, pp. 411-418, 1995. Doi: <https://doi.org/10.1071/PH950411>
- [160] Takenaka Y., Kuzumoto M., Yasui K., Yagi S., Tagashira M., "High power and high focusing CW CO₂ laser using an unstable resonator with a phase-unifying output coupler," IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 27 N°11, pp. 2482-2487, 1991. Doi: [10.1109/3.100887](https://doi.org/10.1109/3.100887)
- [161] "Excimère" article de Wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Excim%C3%A8re>
- [162] Tanaka Y., "Continuous emission spectra of rare gases in the vacuum ultraviolet region," JOSA, Vol. 45 N°9, pp. 710-713, 1955. Doi: <https://doi.org/10.1364/JOSA.45.000710>
- [163] Volkova G. A., Kirillova N. N., Pavlovskaya E. N., Yakovleva A.V., "Vacuum-ultraviolet lamps with a barrier discharge in inert gases," Journal of Applied Spectroscopy, Vol. 41 N°4, pp. 1194-1197, 1984. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00659516>
- [164] Eliasson B., Kogelschatz U., "UV excimer radiation from dielectric-barrier discharges," Applied Physics B, Vol. 46, N°4, pp. 299-303, 1988. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00686452>
- [165] Gellert B., Kogelschatz U., "Generation of excimer emission in dielectric barrier discharges," Applied Physics B, Vol. 52 N°1, pp. 14-21, 1991. Doi: <https://doi.org/10.1007/BF00405680>
- [166] [158] Kogelschatz U., "Silent discharges for the generation of ultraviolet and vacuum ultraviolet excimer radiation," Pure and Applied Chemistry, Vol. 62 N°9, pp. 1667-1674, 1990. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac199062091667>
- [167] Kogelschatz U., Esrom H., Zhang J. Y., Boyd I. W., "High-intensity sources of incoherent UV and VUV excimer radiation for low-temperature materials processing," Applied Surface Science, vol. 168 N°1-4, pp. 29-36, 2000. Doi: [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(00\)00571-7](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(00)00571-7)
- [168] YAGHOUBI Mohammad, "L'effet de la taille et de l'agglomération des charges de CCTO sur les propriétés diélectriques des composites CCTO-époxy," Mémoire, Université LAVAL Québec, Canada de 2018.
- [169] TABTI Belaid, "Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface," Thèse de doctorat, Université de Poitiers, 2011.
- [170] MAKDESSI Maawad, "Modélisation, vieillissement et surveillance de l'état de santé des condensateurs films utilisés dans des applications avioniques," Thèse de doctorat, Université Claude Bernard-Lyon I, 2014.

- [171] Molinié P., “Measuring and Modeling Transient Insulator Response to Charging: the Contribution of Surface Potential Studies,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 12, N° 5, pp. 939-950, 2005.
- [172] Llovera P., Molinié P., “New Methodology for Surface Potential Decay Measurements: Application to Study Charge Injection Dynamics on Polypropylene Films,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11, N° 6, pp. 1049-1056, 2004.
- [173] Zhou T. C., Chen G., Liao R. j., Xu Z., “Charge trapping and detrapping in polymeric materials: Trapping parameters,” Journal of Applied Physics, Vol. 110, no 4, pp. 043724, 2011. Doi: [10.1063/1.3626468](https://doi.org/10.1063/1.3626468)
- [174] Dascalescu L., Urs A., Bente S., Huzau M., Samuila A., “Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices,” Journal of electrostatics, Vol. 63, N° 6-10, pp. 705-710, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.042>
- [175] Wu G., Li J., Xu Z., “Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review,” Waste Management, Vol. 33, N° 3, pp. 585-597, 2013. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.014>
- [176] Li J., Wu G., Xu Z., “Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation,” Waste management, Vol. 35, pp. 36-41, 2015.
- [177] Bouquegneau C., “Doit-on craindre la foudre ? ” EDP Sciences Editions, pp. 163-172, 2006.
- [178] Dramane B., Zouzou N., Moreau E., Touchard G., “Electrostatic Precipitation of Submicron Particles using a DBD in axisymmetric and planar configurations”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 16, pp. 343–51, 2009. Doi: [10.1109/TDEI.2009.4815162](https://doi.org/10.1109/TDEI.2009.4815162)
- [179] Girinon T., “Mesure de l’influence de la concentration des particules sur la puissance consommée d’une décharge plasma de surface (DBD),” 2009.
- [180] Britton L.G., “Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations,” American Institute of Chemical Engineers, New York, NY, USA, 1999.
- [181] Glor M., “Electrostatic ignition hazards in the process industry,” Journal of Electrostatics, Vol. 63, N° 6-10, pp. 447-453, 2005. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.001>
- [182] LUTTGENS Günter, WILSON Norman, “Electrostatic Hazards,” Elsevier, 1997.
- [183] Kachi M., Nemamcha M., Herous L., Dascalescu L., “Neutralization of charged insulating granular materials using AC corona discharge,” Journal of Electrostatics, Vol. 69, N° 4, pp. 296-301, 2011. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2011.04.005>
- [184] Bekkara M. F., Dascalescu L., Benmimoun Y., Zeghloul T., Tilmatine A., Zouzou N., “Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air,” The European Physical Journal Applied Physics, Vol. 81, N° 1, pp. 10801, 2018. Doi: <https://doi.org/10.1051/epjap/2017170149>
- [185] Liu C., Cui N., Brown N. M., Meenan B. J., “Effects of DBD plasma operating parameters on the polymer surface modification,” Surface and Coatings Technology, Vol. 185, N° 2-3, pp. 311-320, 2004. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.024>
- [186] Borcia G., Anderson C. A., Brown N. M. D., “Dielectric barrier discharge for surface treatment: application to selected polymers in film and fibre form,” Plasma Sources Science and Technology, Vol. 12, N° 3, pp. 335, 2003. Doi: <https://doi.org/10.1088/0963-0252/12/3/306>
- [187] **Moussaoui A.**, Kachi M., Zouaghi A., Zouzou, N, “Neutralization of charged dielectric materials using a dielectric barrier discharge,” Journal of Electrostatics, Vol. 87, pp. 102-109, 2017. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2017.04.005>

- [188] Gouri R., Tilmatine A., Zouzou N., Dascalescu L., “Study of DBD Precipitator Energized by a Modified Square Waveform Voltage,” IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 20, N° 5, pp. 1540-1546, 2013. Doi: [10.1109/TDEI.2013.6633681](https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6633681)
- [189] Ariffin A. M., Lewin P. L., Mills D. H., Dodd S. J., “Effect of voltage waveform on phase-resolved electroluminescence measurements,” Annual Report Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena, pp. 603-606, 2008. Doi: [10.1109/CEIDP.2008.4772866](https://doi.org/10.1109/CEIDP.2008.4772866)