

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

Mellouki Hamza

Intitulée

CHARGE ET DECHARGE DES MATERIAUX ISOLANTS

Soutenue le : 14/10/2019

Devant le Jury composé de :

Mr. LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr. HEROUS Lazhar	Professeur	Univ. d'Annaba	Encadreur
Mr. DASCALESCU Lucien	Professeur	Univ. de Poitiers	Co-encadreur
Mr. KACHI Miloud	Professeur	Univ. de Guelma	Examinateur
Mr. REMADNIA Mokdad	M.C. classe A	Univ. de Guelma	Examinateur
Mr. BOURAS Slimane	Professeur	Univ. d'Annaba	Examinateur

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicaces

A mes parents.

A tous mes frères et mes sœurs.

A tous mes proches.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés en collaboration entre l'équipe des Matériaux Diélectrique du Laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG) et l'institut Pprime – IUT d'Angoulême. Mes remerciements, avant tout, à DIEU tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a données durant toutes ces longues années d'études afin que je puisse arriver à ce stade.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma reconnaissance à Herous Lazhar professeur à l'Université de Annaba et membre au laboratoire de Génie Electrique de Guelma (LGEG), pour avoir dirigé les travaux de cette thèse. Je le remercie plus particulièrement pour sa disponibilité, la qualité de son encadrement et ses conseils aussi bien scientifiques que personnels.

Je voudrais exprimer ma gratitude à mon co-directeur de thèse Monsieur DASCALESCU Lucian, pour m'avoir accueilli au sein de son équipe à l'IUT d'Angoulême, pour l'orientation, ses discussions et ses conseils.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à Messieurs Lemzadmi Ahcene, directeurs du laboratoire LGEG. Monsieur ZEGHLOUL Thami, directeur de l'IUT d'Angoulême pour leur soutien. Monsieur MEDLES Karim, pour son soutien scientifique pendant le séjour à l'IUT d'Angoulême.

Je tiens à remercier très chaleureusement tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur de venir juger mon travail.

Je voudrai remercier tous les personnels technique et administratif du laboratoire LGEG et de l'IUT d'Angoulême.

Je remercie tous mes collègues et amis chercheurs et plus particulièrement Neagoé Bogdan, Yopa Eka Parawatya.

Je remercie aussi tous les personnes qui ont contribué à ce travail de près ou de loin.

ملخص

تعتبر كهرباء الاحتكاك ظاهرة معقدة للغاية وتفسيرها مازال ضعيفا، ولهذا فانه لا غنى عن النهج التجريبي لفهم أعمق لهذه الظاهرة. لقد أعتبر شحن المواد عن طريق الاحتكاك ظاهرة سلبية، الا انه يوجد العديد من التطبيقات الصناعية التي تستخدمها. من بين التطبيقات الرئيسية هو الفرز الكهربائي للمواد. لذلك، ركزت دراستنا على تحليل وفهم الآليات المختلفة لنشأة وتبدد الشحن الكهربائي على أسطح البوليمرات وتحديد تأثيرات المعلمات المختلفة على السلوك الكهروستاتيكي لأسطح هذه البوليمرات. سلسلة من التجارب باستخدام طرق الاختبار القياسية و وسائل وتجهيزات تجريبية جديدة، من بينها مولد كهرباء الاحتكاك خطي يسمح بالتحكم في أربع متغيرات في عملية التحميل كالقوة المطبقة والسرعة والمدة ومدى الحركة ، وقياس ثلاث خصائص لنظام الاحتكاك مثل القوة العرضية ، وتغير القوة العمودية المطبقة والانزلاق النسبي بين العينات. الجهاز الثاني هو لقياس توزيع الشحنة الكهربائية السطحية وربطها بخرائط توزيع درجة الحرارة. تم تصميم الجهاز الثالث لدراسة تأثير العلاج عن طريق البلازما لاسطح المواد البوليمرية ، لمعرفة توليد وتبديد الشحنات الكهربائية ومعامل الاحتكاك بعد الاتصال بين البوليمرات المعالجة. أظهرت التجارب التي أجريت أن مستوى الشحن الناتجة عن الاحتكاك الجاف يعتمد على الضغط المطبق عند الاحتكاك و زمن الاحتكاك. وأن الشحنة التي يتم ترسيبها بواسطة تفريغ الهالة هي أكثر تجانساً وسهولة في التحكم مقارنةً بالشحنة الناتجة عن الشحن بالاحتكاك ، لقد تبين ايضا أن العلاج بالبلازما يقلل من توليد الشحن الكهربائي ، ويزيد من معدل انخفاض الشحن ومعامل الاحتكاك.

الكلمات المفتاحية - البوليمرات، الشحنة الكهربائية، تفريغ الاكليل، التوتر الكهربائي، تفريغ حاجز العزل، الفولتميتر الإلكتروني، التصميم التجريبي.

Résumé

Les phénomènes triboélectriques sont extrêmement complexes et mal expliqués, l'approche expérimentale est indispensable. Bien que la charge triboélectrique des matériaux a d'abord été considérée comme un inconvénient, nombreuses sont les applications industrielles qui l'utilisent, tels que la séparation électrostatique des matériaux et les générateurs triboélectrique. Le présent travail porte sur l'analyse et la compréhension des différents mécanismes de génération et dissipation des charges statique et de déterminer les effets de différents paramètres sur le comportement électrostatique des surfaces polymères. Une série d'expériences employant des méthodes d'essai normalisées et des nouvelles installations expérimentales, un tribomètre linéaire qui permet le contrôle des paramètres comme la force normale, la vitesse, la durée et l'amplitude du mouvement de glissement et la mesure de trois caractéristiques du régime de frottement telle que la force tangentielle, la variation de la force normale et le déplacement relatif entre les échantillons. La deuxième installation est un dispositif pour mesurer la distribution de potentiel électrique de surface et la corrélérer avec des cartographies de température. Une troisième installation est destinée à l'étude de l'effet du traitement des surfaces des matériaux polymères par décharge à barrière diélectrique (DBD) sur la génération, la dissipation des charges électriques après un contact glissant et la variation du coefficient de frottement. Les expériences réalisées ont montré que le niveau de potentiel électrique généré par un contact glissant sec dépend du temps de frottement et de la pression de contact. Un potentiel électrique déposé par décharge couronne est plus uniforme et facile à contrôler par rapport à celui généré par effet triboélectrique. Il est montré que le traitement par DBD réduit la génération de potentiel électrique et augmenté le taux de déclin de potentiel et le coefficient de frottement.

Mots clés — Les polymères, charge triboélectrique, décharge couronne, potentiel électrique, décharge à barrière diélectrique, voltmètre électrostatique, plan d'expérience.

Abstract

The triboelectric phenomena are extremely complex and poorly explained, the experimental approach is indispensable. Although the triboelectric charging of materials was initially considered a disadvantage, but many industrial applications use it, a major application concerns the electrostatic separation of materials and the triboelectric generator. The present work deals with the analysis and the understanding of the different mechanisms of generation and dissipation of the electric potential and to determine the effects of different parameters on the electrostatic behaviour of the polymer surfaces. A series of experiments using standard test methods and new experimental installations, a linear tribometer which allows the control of the parameters such as the normal force, the speed, the duration and the amplitude of the sliding movement and the measurement of three characteristics of the friction regime such as the tangential force, the variation of the normal force and the relative displacement between the samples. The second installation is a device for measuring the distribution of surface electric potential and correlating it with temperature maps. A third installation is designed to study the effect of surface treatment of polymeric materials by dielectric barrier discharge (DBD) on the generation, the dissipation of electric potential after a sliding contact and the variation of the coefficient of friction. Experiments have shown that the level of the electric potential generated by dry friction depends on the friction time and the contact pressure. The electric potential deposited by corona discharge is more uniform and easy to control compared to the potential generated by triboelectric effect. DBD treatment has been shown to reduce the electric potential generation and increase the rate of potential decay and coefficient of friction.

Index Terms — Polymers, tribocharging, corona discharge, electric potential, plasma treatment DBD, electrostatic voltmeter, experimental design.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	15
I. ETAT DE L'ART.....	19
I.1 Introduction.....	19
I.2 Connaissance fondamentale sur les polymères.....	19
I.3 Propriétés diélectriques des polymères.....	23
I.3.1 Résistivité de surface.....	23
I.3.2 Conductions dans les isolants.....	24
I.4 Tribologie des polymères.....	26
I.5 Les processus de charge des matériaux isolants.....	29
I.5.1 Chargement des polymères par effet triboélectrique.....	29
I.5.2 Facteurs influents sur le charge triboélectrique.....	31
I.5.2.1 Effet de la force de contact.....	31
I.5.2.2 Effet de la vitesse de frottement.....	32
I.5.2.3 Effet de l'humidité.....	32
I.5.2.4 Effet du temps de frottement.....	32
I.5.2.5 Effet de la structure et la composition chimiques.....	33
I.5.3 Types de tribomètres utilisés pour étudier l'effet triboélectrique.....	33
I.5.3.1 Tribomètre à géométrie cylindre-sphère.....	34
I.5.3.2 Tribomètre linéaire ou va-et-vient.....	34
I.5.3.3 Tribomètre pion-disque.....	35
I.6 Chargement des polymères par effet couronne.....	36
I.6.1 Mécanismes et processus physiques des décharges électriques.....	36
I.6.2 Système d'électrode et topographie de la décharge couronne.....	38
I.7 Mécanismes de décharge électrique des matériaux isolants.....	40
I.8 Traitement et modification des surfaces.....	43
I.8.1 Décharge à barrière diélectrique : DBD.....	44
I.8.1.1 Principe de fonctionnement.....	44
I.8.1.2 Régimes de décharge et propriétés électriques.....	46
I.8.2 Comportement de frottement des polymères traités par DBD.....	47
I.9 Conclusions.....	48
I.10 Position du Problème.....	49

II. INSTALLATIONS ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	51
II.1 Introduction.....	51
II.2 Préparation et caractérisation des matériaux utilisés.....	51
II.2.1 Préparation et dimensions des éprouvettes.....	52
II.2.2 Neutralisation des charges résiduelles.....	55
II.3 Dispositifs de charge par effet triboélectrique.....	55
II.3.1 Banc expérimental.....	55
II.3.2 Instrument virtuel pour le pilotage.....	58
II.4 Dispositifs de charge par effet couronne.....	57
II.5 Installation de traitement par DBD.....	58
II.6 Méthodes de mesures	60
II.6.1 Dispositifs de mesure de la charge électrique totale.....	61
II.6.2 Mesures de potentiel électrique de surface.....	61
II.6.3 Mesures de température de surface.....	63
II.7 Conclusion.....	65
III. 5 MODELISATION EXPERIMENTAL DU PROCESSUS DE CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE DES MATERIAUX POLYMERES	66
III.1 Introduction.....	67
III.2 Etude des facteurs influent sur le chargement triboélectrique.....	67
III.2.1 Effet de nature du matériau sur le chargement triboélectrique.....	68
III.2.2 Effet de la charge mécanique appliqué	69
III.3 Modélisation du processus de chargement triboélectrique des plaques de PTFE	70
III.4 Comparaison entre le comportement triboélectrique des polymères.....	77
III.5 Conclusion.....	79
IV. GENERATION ET DISSIPATION DES POTENTIELS ELECTRIQUES AUX INTERFACES POLYMERIQUES	80
IV.1 Comparaison entre les charges générées par effet triboélectrique et par effet couronne.....	81
IV.1.1 Méthodologie.....	82
IV.1.2 Résultats et Analyse.....	83
IV.2 Comparaison entre la charge électrique et la température produite par frottement.....	89
IV.2.1 Méthodologie.....	89
IV.2.2 Résultats et analyse.....	90
IV.3 Conclusions.....	93
V. CHARGE TRIBOELECTRIQUE DES SURFACES POLYMERES TRAITÉES PAR DECHARGE À BARRIERE DIELECTRIQUE.....	94
V.1 Introduction.....	95

V.2 Méthodologie.....	95
V.3 Résultats et Analyse.....	96
V.3.1 Mesures du potentiel de surface.....	96
V.3.1.1 Effet de la tension de décharge.....	97
V.3.1.2 Effet de la fréquence.....	99
V.3.1.3 Effet des signaux d'excitation.....	100
V.3.1.4 Effet de la distance inter-électrodes.....	102
V.3.1.5 Effet de la nature des matériaux.....	103
V.3.1.6 Effet du temps de traitement.....	104
V.3.2 Mesures du déclin de potentiel de surface (DPS).....	105
V.3.3 Coefficient de frottement.....	106
V.4 Conclusion.....	107
CONCLUSION GENERALE.....	109
BIBLIOGRAPHIE	113
PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS.....	122

Liste des figures

Figure I.1 : Production international des plastiques 1950–2010.....	20
Figure I.2 : Structure de polyéthylène.....	20
Figure I.3 : Les régions cristallines et amorphes.....	21
Figure I.4 : Différents groupes de thermoplastiques et leur température de transition vitreuse (Tg). 22	
Figure I.5 : Diagramme de bande d'énergie. A gauche du diagramme, une représentation de la distribution de Fermi-Dirac indiquant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie en fonction de la température.	24
Figure I.6 : Diagrammes de la bande d'énergie des matériaux dans les trois situations; (a) un isolant, (b) un semi-conducteur et (c) un conducteur.	25
Figure I.7 : Classification des mécanismes de conduction dans un matériau diélectrique.....	26
Figure I.8 : Frottement statique (a), frottement dynamique (b)	28
Figure I.9 : Schéma de la zone de contact apparente par rapport à la zone de contact réelle.....	28
Figure I.10 : Transfert de charge entre deux matériaux par contact.....	29
Figure I.11 : Mécanismes possibles de transfert de charge : (a) Transfert d'électrons ; (b) Transfert d'ions ; (c) Transfert de matière	30
Figure I.12 : Série triboélectrique pour certains matériaux.	31
Figure I.13 : Tribomètre cylindre-sphère pour étudier l'effet triboélectrique.....	34
Figure I.14 : Tribomètre linéaire ou va-et-vient pour étudier l'effet triboélectrique.....	35
Figure I.15 : Tribomètre pion-disque pour étudier l'effet triboélectrique	35
Figure I.16 : Architecture de la décharge couronne.....	37
Figure I.17 : Schéma d'une décharge couronne en géométrie pointe/plan.....	38
Figure I.18 : Systèmes d'électrodes.....	39
Figure I.19 : Système de charge fil-grille-plan: 1 - alimentation haute tension, 2 - cylindre métallique, 3 - tige métallique, 4 - fil de tungstène, 5 - grille en aluminium, 6 échantillon, 7 - plaque en aluminium mise à la ter, 8 - micro-ampèremètre, 9 - résistance variable..	40
Figure I.20 : Différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface.....	41
Figure I.21 : Courbes de DPS obtenues pour plusieurs valeurs de tension de décharge positive.....	42
Figure I.22 : Déclin du potentiel de surface pour différentes valeurs de température.	42
Figure I.23 : Espèces mises en jeu dans les réactions plasma-surface.....	43
Figure I.24 : Configuration classique d'une décharge à barrière diélectrique (DBD).	44
Figure I.25 : Principe de fonctionnement d'une décharge à barrière diélectrique.	45
Figure I.26 : Types de configurations de décharge à barrière diélectrique.....	45
Figure I.27 : Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire.....	46

Figure I.28 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Glow (a), type Townsend (b)	47
Figure II.1 : Matériaux utilisées	52
Figure II.2 : Structure du Polychlorure de vinyle (PVC).....	52
Figure II.3 : Structure du polytétrafluoroéthylène (PTFE).....	53
Figure II.4 : Formules chimiques des monomères d'acrylonitrile butadiene styrene (ABS).....	53
Figure II.5 : Géométries et dimensions des éprouvettes utilisées.	54
Figure II.6 : Procédus de neutralisation: (1) échantillon de polymère; (2) électrode ionisante; (3) support isolant.....	55
Figure II.7 : Banc expérimental pour le chargement triboélectrique : (1) système de contrôle de la force normale; (2) moteur électrique; (3) glissière à billes du guidage horizontal; (4) porte échantillon supérieur; (5) porte échantillon inférieur; (6) éprouvette supérieure; (7) éprouvette inférieure; (8) mesure de température et d'humidité ambiante; (9) capteur de force normale; (10) système biellev-manivelle.	56
Figure II.8 : Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface	57
Figure II.9 : Représentation schématique (a) et photographie (b) du système de charge par effet couronne: (1) fil de tungstène; (2) plan mis à la terre; (3) alimentation haute tension; (4) grille en aluminium; (5) résistance; (6) échantillon de polymère; (7) ampèremètre; (8) bouclier mis à la terre.. ..	58
Figure II.10 : Schématisation de l'installation expérimentale d'étude de la DBD : (1) cellule DBD; (2) amplificateur de puissance HT; (3) générateur de fonction; (4) résistance non inductive; (5) oscilloscope; (6) échantillon; (7) électrode active; (8) électrode mise à la terre; (9) barrière diélectrique (verre); (10) échantillon de polymère... ..	59
Figure II.11 : Photographie de l'installation de traitement de surface par la DBD.. ..	60
Figure II.12 : Configuration expérimentale pour la mesure de charge électrique globale.	61
Figure II.13 : Photographie (a) et principe (b) du voltmètre électrostatique.....	61
Figure II.14 : Position de 95 points dans laquelle le potentiel électrique est mesuré.....	62
Figure II.15 : Mesure de cartographie de potentiel.....	63
Figure II.16 : Illustration de la mesure thermique (a) caméra infrarouge, (b) fenêtre du logiciel Flir Tools.....	63
Figure II.17 : Mesure de la température de surface.	64
Figure III.1 : Représentation schématique du banc expérimental pour le chargement triboélectrique	68
Figure III.2 : Charge générée par effet triboélectrique pour divers types de matériaux	69
Figure III.3 : Cartographie du potentiel électrique à la surface d'un échantillon de PTFE: (a) non uniforme contre ABS; (b) uniforme contre ABS: Force de contact: 4 N; vitesse de glissement: 25 mm / s; cycles de contact = 80.....	70

Figure III.4 : Cartographie du potentiel électrique à la surface de l'échantillon de PTFE: (a): force de contact: 2 N, fréquence: 1 Hz, temps de charge: 10 s, (b): force de contact: 6 N, fréquence: 1 Hz, temps de charge: 150 s.....	72
Figure III.5 : Les coefficients des modèles mathématiques.....	74
Figure III.6 : Variation prévisible du potentiel triboélectrique en fonction: la force de contact (F), le temps de chargement (T) et la fréquence (f).....	75
Figure III.7 : Courbes d'iso-réponse prédites par MODDE 8.0, pour le potentiel triboélectrique moyen (ac) et l'écart type de potentiel (bd) en fonctions: la force de contact, le temps de charge et la fréquence.....	77
Figure III.8 : Effet de la force de contact sur le potentiel électrique moyen généré sur les surfaces de polymères après 130 cycles (fréquence: 1 Hz).....	79
Figure III.9 : Effet de la fréquence sur le potentiel électrique moyen généré sur les surfaces polymères après les 130 cycles (force de contact 10 N).....	78
Figure III.10 : Effet du nombre de cycles sur le potentiel électrique généré sur les surfaces polymères (force de contact 10 N, fréquence: 1 Hz).	79
Figure IV.1 : Répartition des points de mesures pour réaliser la cartographie du potentiel électrique à la surface des échantillons de PTFE, PVC et d'ABS.	82
Figure IV.2 : Cartographie de potentiel après un chargement par effet triboélectrique : a) PTFE-ABS; b) PVC-ABS; c) ABS- PVC.....	85
Figure IV.3 : Cartographie de potentiel après un chargement par effet couronne: a) PTFE; b) PVC; c) ABS.....	86
Figure IV.4 : Courbe de déclin de la valeur moyenne de potentiel après chargement par effet triboélectrique: a) PTFE-ABS; b) PVC-ABS et c) ABS- PVC.....	88
Figure IV.5 : Courbe de déclin de la valeur moyenne de potentiel après chargement par effet couronne: a) PTFE; b) PVC et c) ABS.....	89
Figure IV.6 : Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne b) en fonction de la force normale de contact. $v = 25 \text{ mm/s}$; $Cy = 5 \text{ cycles}$	90
Figure IV.7 : Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne b) en fonction du nombre de cycles. $F_N = 2 \text{ N}$; $v = 25 \text{ mm/s}$	91
Figure IV.8 : Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne b) en fonction de la vitesse de glissement. $F_N = 4 \text{ N}$; $Cy = 80 \text{ cycles}$ / $F_N = 4 \text{ N}$; $Cy = 5 \text{ cycles}$	91
Figure IV.9 : Comparaison des cartographies : (a) potentiel électrique générée par frottement ; (b) température générée par frottement : force de contact = 14 N, nombre de cycles = 80, vitesse de frottement = 100 mm/s.	92
Figure V.1 : Géométries et dimensions des éprouvettes utilisées, échantillon supérieur (a), échantillon inférieur (b).....	96
Figure V.2 : Oscillogramme tension – courant d'une DBD. Conditions : Signal : Carré, Tension = 30 kV, Fréquence = 0,8 kHz.....	97
Figure V.3 : Cartographie du potentiel électrique à la surface d'un échantillon de PVC tapres un frottement contre ABS. Non traité (a), Traité par DBD (b).	97

Figure V.4 : Photographie du gap d'air de DBD pour diverses amplitudes de tension appliquée. Conditions expérimentales : Signal carré; $f = 0,8 \text{ kHz}$	98
Figure V.5 : Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction du niveau du traitement.....	99
Figure V.6 : Effet de la fréquence sur l'allure de la décharge à barrière diélectrique (tension carré).....	99
Figure V.7 : Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées en fonction de la fréquence de la DBD.....	100
Figure V.8 : Oscillogrammes courant/ tension pour différents types de signaux haute tensions $U_{dbd} = 30 \text{ kV}$. $f = 0,8 \text{ kHz}$	101
Figure V.9 : Évolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées en fonction de la nature du signal de DBD.....	102
Figure V.10 : Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction de la distance inter-électrodes	103
Figure V.11 : Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de polymères traitées par la DBD en fonction de la nature du matériau.....	104
Figure V.12 : Relation entre le temps de traitement au plasma et le potentiel électrique moyen généré sur le PVC, le PP et le PE.....	105
Figure V.13 : Déclin de potentiel moyen du PVC non traité et traités par DBD après 50 cycles de frottement contre l'ABS. $U_{abd} = 30 \text{ kV}$. $f = 0,8 \text{ kHz}$	106
Figure V.14 : Coefficient de frottement moyen en fonction du temps du traitement.....	107

Liste des tableaux.

Tableau I.1 : La résistivité de différents matériaux isolants.....	24
Tableau II.1 : Caractéristiques de quelques polymères thermoplastiques.....	54
Tableau III.1 : Les valeurs moyennes et l'écart-type des potentiels électriques pour les 11 essais de plan d'expérience	73
Tableau IV.1 : Comparaison entre les valeurs moyennes et l'écart-type du potentiel électrique à la surface des plaques de PTFE, PVC et ABS chargées par effet triboélectrique et par effet couronne. .	84

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Une grande variété de matériaux isolants est aujourd'hui disponible dans les marchés internationaux. Ces matériaux sont largement utilisés dans nombreuses applications touchant pratiquement tous les domaines technologiques telles que le secteur d'automobile, le textile, la construction, les énergies renouvelables, l'aérospatiale, l'industrie électrique et électronique ...etc, en raison de leurs propriétés thermiques et diélectriques spécifiques ainsi que la flexibilité de leurs mise en œuvre et leurs faible coût. Dans l'industrie, une quantité considérable d'électricité statique peut être générée sur les surfaces des matériaux isolants chaque fois que des plaques, des fibres, des fils ou des tissus frottent sur un autre solide. La charge générée par effet triboélectrique qui se produit au contact entre polymères est un phénomène très important qui doit être pris en compte pour une conception appropriée des différents équipements.

Les charges électrostatiques générées sur les surfaces des matériaux ont des effets positifs et négatifs. Les charges cumulées sur les surfaces des polymères peuvent engendrer des graves accidents au niveau des installations industrielles et entraîner des dégâts économiques importants et des pertes humaines. Les risques d'incendie et d'explosion liés à la charge statique sont associés à de nombreuses activités de production, de stockage et de transport dans les industries de transformation et de fabrication des polymères. Cependant, il existe plusieurs exemples d'utilisation pratique de la charge statique, tels que la photocopie, les imprimantes laser, la peinture électrostatique, les électrets et dans une large gamme d'équipements y compris les séparateurs de particules et les filtres électrostatiques. Les charges statiques sont aussi une source utile d'énergie électrique, des chercheurs ont utilisé ces charges pour mettre au point des générateurs triboélectriques. Pour minimiser l'impact de ces charges statique et l'exploiter d'une meilleure façon, il est important de comprendre et quantifier la charge générée par effet triboélectrique qui se produit au contact entre polymères. De plus, une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans la génération et la dissipation de ces charges est souhaitée.

Étant donné que la nature de la chimie des surfaces des polymères est l'un des facteurs le plus important qui détermine le comportement électrostatique. Le contrôle des propriétés de surface devrait également contrôler les propriétés triboélectriques du polymère. Comme la charge triboélectrique des polymères est un phénomène superficiel, l'introduction de certains groupes fonctionnels par le plasma à leur surface peut changer le comportement électrostatique de cette dernière. Le traitement de surface des polymères est d'une importance considérable dans plusieurs applications industrielles, il peut modifier les propriétés de la surface sans affecter ses propriétés de volume. En effet, la polarité et la quantité de charge peuvent être ajustées en modifiant les propriétés de surface par le traitement. L'amélioration de la génération de charge triboélectrique par le traitement peut être utilisée dans des applications où il est nécessaire de favoriser la charge triboélectrique, comme dans le cas de la séparation électrostatique des déchets plastiques granulaires dans l'industrie du recyclage; tandis qu'une réduction de la génération de charge due au traitement est nécessaire pour la protection contre les risques électrostatiques. La décharge à barrière diélectrique (DBD) est une technique utilisée pour modifier l'état de surface des matériaux polymères. La compréhension de l'impact du traitement par la DBD sur le comportement triboélectrique des polymères (génération et dissipation des charges après un chargement par contact glissant) est très importante pour connaître dans quelle mesure l'état de surface après le traitement influé sur les phénomènes électrostatiques.

Malgré que des efforts de recherches qui visaient au contrôle des charges électrostatiques, les applications industrielles a des difficultés à cause de la multitude des paramètres de contrôles qui pourrait avoir des conséquences sur le processus de génération de charges. Plusieurs questions restent jusqu'à présent sans réponses. La compréhension des mécanismes impliqués, le niveau et la répartition de la charge statique due à un contact glissant entre deux polymères aideraient les chercheurs et les ingénieurs à trouver des solutions pour exploiter ces charges et minimiser leurs effets. L'objectif principal de cette thèse est d'obtenir une meilleure compréhension du comportement électrostatique des surfaces polymériques et de trouver les effets de différents facteurs comme les paramètres de frottement (la force de contact, la vitesse de frottement, le nombre de cycle), la température de surface après frottement et l'état de surface des matériaux traités par la décharge à barrière diélectrique (DBD) dans l'air atmosphérique sur la génération et la dissipation des charges statiques des surfaces des polymères couramment utilisés dans l'industrie.

Cette thèse comporte cinq chapitres présentés comme suit:

Dans le **premier chapitre**, nous avons présenté en premier lieu une revue de la littérature sur des connaissances fondamentales de la science des polymères. En deuxième lieu nous avons présenté les processus de charge et de décharge des matériaux isolants par effet triboélectrique et par la décharge couronne. En plus, quelques notions sur le traitement des surfaces par la technique de DBD ont été abordées.

Dans le **second chapitre**, nous avons présenté les différents matériaux et les dispositifs qui font l'objet de notre étude. Nous avons ensuite discuté la procédure de mise en œuvre des échantillons, les méthodes expérimentales et les techniques de mesures employées.

Le **troisième chapitre** présente des résultats d'une étude menée en utilisant la méthodologie de plan d'expériences pour évaluer les effets de plusieurs paramètres de frottement tels que la variation de la force normale, le temps de chargement et la fréquence de déplacement relatif entre les échantillons frottés sur la génération et la répartition des potentiels électriques aux interfaces polymériques.

L'objectif du **quatrième chapitre** est de caractériser la génération et la dissipation des potentiels électriques des plaques de polymères en termes d'uniformité et de stabilité dans le temps. Une comparaison est faite entre le potentiel de surface générée par effet triboélectrique et celui déposé par la décharge couronne. Une autre comparaison a été faite aussi entre la distribution de potentiel électrique et le champ de température de surface des échantillons après un contact glissant entre deux polymères.

Dans le **cinquième chapitre**, nous avons étudié l'effet de plusieurs facteurs électriques et géométriques de la DBD sur le comportement triboélectrique des plaques de polymères; nous avons étudié les effets du temps de traitement, la tension, la fréquence, le type de signal, la nature des matériaux et la distance inter-électrodes sur la génération de potentiel triboélectrique des matériaux traités.

La charge tribo-électrostatique dépend des conditions dans lesquelles se produit le mouvement relatif des matériaux en contact, ainsi que de leur état de surface qui peut être modifié par l'exposition à l'action d'une décharge à barrière diélectrique. Cette conclusion générale, qui clôture le mémoire, s'accompagne d'une synthèse des principales contributions que la thèse apporte dans le domaine étudié.

CHAPITRE I
ÉTAT DE L'ART

Chapitre I État de l'art

I.1 Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter en premier lieu une revue de la littérature sur les connaissances fondamentales de la science des polymères et leurs applications. En deuxième lieu nous allons présenter les processus de charge et de décharge des matériaux isolants où nous allons concentrer sur les deux modes les plus utilisés : le chargement par effet triboélectrique et par décharge couronne. Les mécanismes et les caractéristiques de chaque méthode sont passés en revue et discutés dans cette section. Nous allons présenter aussi des notions sur le traitement de surfaces des polymères par la technique de la décharge à barrière diélectrique (DBD). Enfin nous allons expliquer l'importance de notre sujet pour évoquer la position du problème et les besoins de recherche.

I.2 Connaissance fondamentale sur les polymères

Au cours des cinq dernières décennies, l'industrie des plastiques est devenue l'une des industries à plus forte croissance dans le monde [1]. De nos jours, la production totale des polymères s'élève à quelques centaines de millions de tonnes par an (**Figure I.1**), en raison de l'utilisation généralisée de ces matériaux, il est à noter que les quantités de production sont importantes et en progression d'une année à l'autre. Les polymères occupent de nombreux secteurs de l'industrie, notamment les industries électriques et électroniques, le bâtiment et les travaux publics, les textiles, les transports et l'agriculture. En raison de faibles coûts de fabrication et de bonnes propriétés électriques, thermiques et mécaniques [2]. L'utilisation des polymères et de polymères composites a rapidement augmenté dans l'industrie. Ils sont préférés comme composants dans le glissement à sec en raison de leur propriété d'autolubrifiant et de faible coefficient de frottement. Pendant leurs utilisation, ils sont généralement associés à des métaux, mais le couplage polymère-polymère peut être utile pour plusieurs raisons et caractéristiques, notamment: une bonne résistance chimique, une faible densité et une faible conductivité thermique [3]. Le polymère est une substance constituée de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules (**Figure I.2**), la structure d'un polymère est créée par la polymérisation, les arrangements des unités monomères et les différents types de chaînes qui peuvent être synthétisés conduit à la création d'une classe de matériaux caractérisés par une gamme de propriétés énorme.

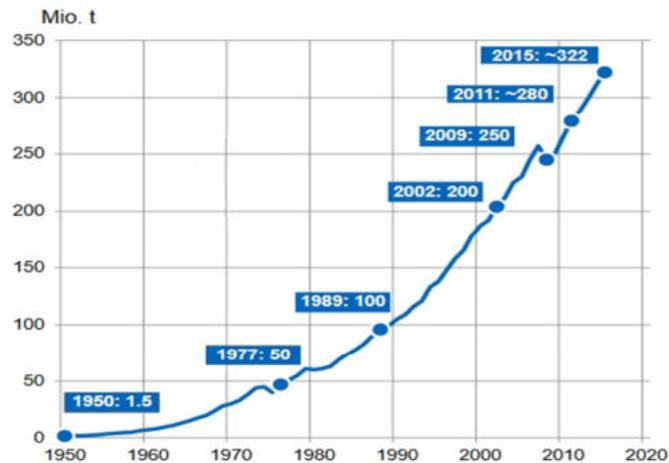


Figure I.1. Production internationale des plastiques 1950–2010 [4].

La structure des matériaux est entièrement déterminée par les liaisons s'établissant entre atomes. Ces liaisons sont une manifestation d'interactions attractives entre atomes, dont l'origine est soit purement quantique (liaisons covalente et métallique, liaisons de type Van der Waals/London), soit électrostatique (liaison ionique, liaison hydrogène). Les polymères ont des compositions chimiques différentes, qui sont caractérisées par des liaisons des molécules spécifiques pour chacun [5]. Les liaisons et les forces intermoléculaires dans les polymères peuvent être divisées en trois catégories:

- Les liaisons covalentes : ou les liaisons chimiques sont des liaisons interatomiques hautement spécifiques, à courte distance et directionnelles.
- Les liaisons ioniques : sont des liaisons physiques à longue distance basées sur l'interaction de Coulomb des groupes chargés et sont classées comme étant plus faibles que les liaisons covalentes.
- Une liaison hydrogène est forte et directionnelle, elle peut être formée entre des atomes électronégatifs tels que O, N, F ou Cl et un atome H, qui est lié de manière covalente à des atomes électronégatifs similaires.

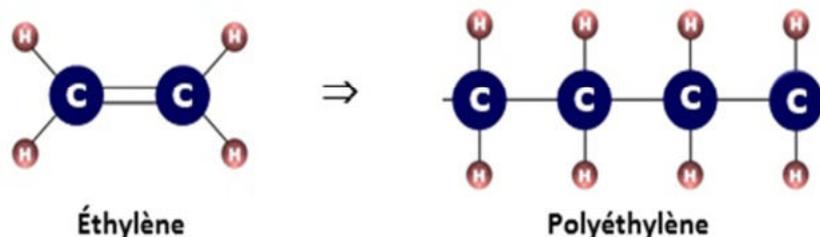


Figure I.2. Structure de polyéthylène.

Les principales caractéristiques des polymères sont dues à l'enchaînement des motifs par des liaisons covalentes. Cependant, les macromolécules qui sont liées entre elles par des interactions faibles (type Van Der Waals ou liaisons hydrogènes) sont aussi d'une importance capitale dans la mesure où elles assurent la cohésion des polymères [6]. En fonction de leurs propriétés, les polymères sont souvent classés en 3 classes :

- Les polymères thermoplastiques ;
- Les élastomères ;
- Les polymères thermodurcissables.

Parmi ces trois types, les thermoplastiques sont les plus couramment utilisés dans les applications industrielles et générales, telles que le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), les polyamides (PA). Ils ont un comportement mécanique malléable ou fragile selon leurs conditions d'utilisation, ces polymères sont réutilisables et recyclables. Leurs propriétés physiques sont sensibles à leur degré de polymérisation et à leur éventuel taux de cristallinité. Les thermoplastiques peuvent résister à des températures allant jusqu'à 315 ° C, d'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Les thermoplastiques ne s'oxydent pas et ils ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques. En raison leur haute résistance mécanique, leur légèreté et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour large gamme d'applications [7, 5].

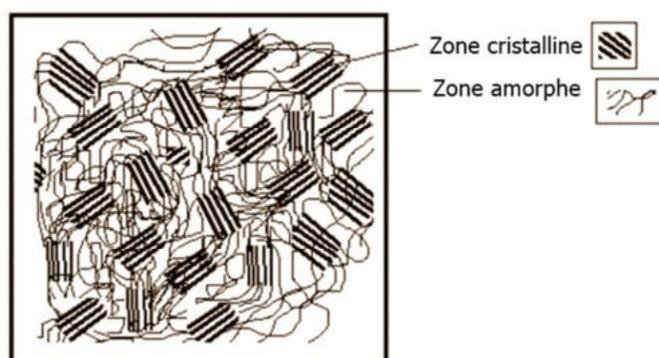


Figure I.3. Les régions cristallines et amorphes [7].

Selon le type d'enchaînement des unités répétitives, les polymères peuvent être classés en des polymères linéaires, ramifiés et réticulés. Les propriétés des polymères dépendent considérablement de la proportion des zones amorphes (organisation des chaînes désordonnée) et cristallines (organisation

des chaînes ordonnée), mais aussi de leurs répartitions. La plupart des polymères existent comme des structures complexes constituées des régions cristallines et amorphes, la **Figure I.3** montre les régions cristallines et amorphes d'un polymère. Les propriétés du matériau polymère ont une dépendance forte de la température [7]. La température la plus critique est la température de transition vitreuse (T_g). Au cours de laquelle les propriétés physiques du matériau sont modifiées d'une manière considérable. La température de transition vitreuse (T_g) est la température à laquelle le polymère, après refroidissement, retrouve son équilibre thermodynamique après un certain temps [8]. Au-dessous du T_g , le matériau est fragile, et quand la T_g est dépassée, le matériau semi cristallin devient dur et malléable. À basses températures, les chaînes sont gelées, et le polymère est dans l'état vitreux (solide, dur, et fragile), lorsque la température est augmentée jusqu'à une certaine valeur (température de transition vitreuse), le polymère s'amollit et entre dans l'état caoutchouteux [9, 8]. Comme on peut le voir sur la **Figure I.4**, les pyramides thermoplastiques divisées en trois groupes principaux en fonction de la température de transition vitreuse (T_g), sont les plastiques à haute performance, les plastiques techniques et les plastiques de base. Dans les configurations classiques de polymères, le polyéthylène (PE) est cristallisé, mais il est encore partiellement amorphe. De plus, les polymères ayant des configurations aléatoires, tels que le polystyrène atactique (aPS), qui présentent souvent une faible cristallinité à différentes valeurs de (T) et sont par conséquent classés comme amorphes.

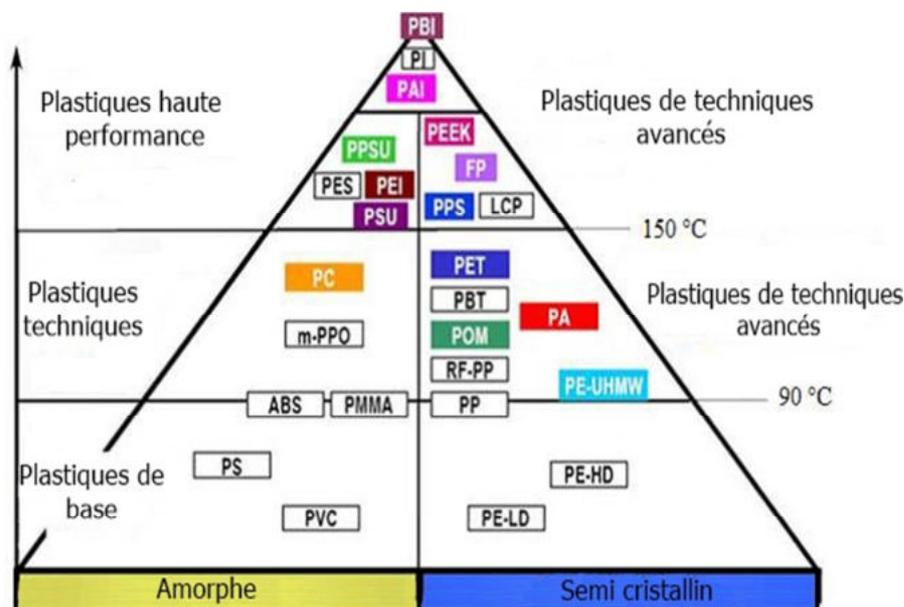


Figure I.4. Différents groupes de thermoplastiques et leur température de transition vitreuse (T_g) [10].

I.3 Propriétés diélectriques des polymères

I.3.1 La résistivité de surface

Les études électrostatiques étant considérées comme un phénomène de surface, la résistance de surface est un facteur important pour la maîtrise de l'évolution de la charge de surface, qui est principalement déterminée par les propriétés de surface des matériaux. Lorsque deux points d'un matériau isolant sont soumis à une tension U , un champ électrique existe sous la forme $E = -\Delta U$. En fonction de la géométrie de l'électrode et de certains autres facteurs, le champ électrique peut être uniforme (tel qu'un échantillon pris en sandwich entre deux électrodes parallèles) ou non uniforme (tel qu'un échantillon placé entre une aiguille et une électrode plane). Lors de l'application du champ électrique, les particules chargées électriquement dans l'isolant subiront une force électrostatique dans la direction du champ électrique. Cette force est égale au produit de leur charge (en Coulombs C) et du champ électrique qui peut entraîner une dérive de la charge et un transport à travers l'isolant. Le courant électrique par unité de surface de la section est appelé densité de courant J ($A\ m^{-2}$).

$$J = \left(\frac{1}{\rho}\right) E = \sigma E \quad I.1$$

Où ρ est la résistivité du matériau et son unité est ($\Omega\ m$), $\sigma = (1/\rho)$: est la conductivité, son unité est $(m.\Omega)^{-1}$. La forme générale de la conductivité, si elle est liée à la concentration du porteur de charge n , est donnée par:

$$\sigma = n e \mu \quad I.2$$

Où e est la charge électrique (C) sur chaque transporteur, μ est la mobilité des porteurs de charges dans le matériau $m^2\ V^{-1}\ s^{-1}$. La mobilité est défini comme la vitesse de dérive v_d par unité de champ qui peut être symboliquement indiquée:

$$\mu = \frac{v_d}{E} \quad I.3$$

La résistivité superficielle et la résistivité linéaire (résistance volumique par unité de longueur, (ohm / m)) sont souvent utilisées pour classer les matériaux isolants, conducteurs. Le **Tableau I. 1** montre la résistivité de différents matériaux isolants [11].

Tableau I.1 : La résistivité de différents matériaux isolants.

Matériaux	Résistivité
Polychlorure de vinyle (PVC)	$10^{14} - 10^{16}$
Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	10^{15}
Polypropylène (PP)	$10^{15} - 10^{16}$
Polyéthylène (PE)	$10^{15} - 10^{18}$
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	$10^{23} - 10^{25}$

I.3.2 Conductions dans les isolants

Les propriétés électriques sont déterminées par la présence des charges électriques libres générées par des défauts, des impuretés, des additifs technologiques ou injectées à partir d'électrodes (un plasma à basse température). Les matériaux isolants ont comme particularité d'avoir une très faible conductivité, mais sous un fort champ électrique, le passage du courant est souvent permis. La classification des matériaux isolants et conducteurs est liée à une valeur d'énergie particulière appelée énergie de Fermi. La probabilité P , qu'un électron occupe un niveau d'énergie avec une énergie E , à une température T , est donnée par la fonction de distribution de Fermi-Dirac comme suit:

$$P(E, T) = \left[1 + \exp\left(\frac{E - E_f}{k_B T}\right) \right]^{-1} \quad \text{I.4}$$

Où k_B est la constante de Boltzmann et E_f est appelé niveau d'énergie de Fermi. À ce niveau, la probabilité d'occupation par un électron est exactement la moitié, comme montré dans la **Figure I.5**.

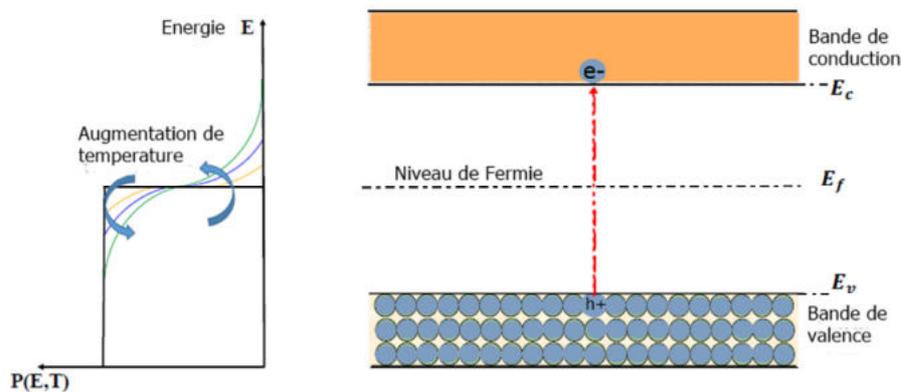


Figure I.5. Diagramme de bande d'énergie. À gauche du diagramme, une représentation de la distribution de Fermi-Dirac indiquant la probabilité d'occupation d'un niveau d'énergie en fonction de la température.

La Figure I.6 illustre toutes les situations pour les bandes d'énergie. Il existe une bande interdite entre les bandes de conduction et de valence, dont les électrons ont besoin pour gagner de l'énergie afin d'être libérés de la bande de valence vers la bande de conduction. En utilisant la fonction de distribution de Fermi-Dirac pour calculer la probabilité que des électrons occupent le fond de la bande de conduction, pour les matériaux conducteurs, une faible bande interdite comprise entre 0 et 0,2 eV est observée. Pour les semi-conducteurs, l'énergie de la bande interdite devient légèrement plus grande, de 0,2 à 2,0 eV. La bande interdite dans les matériaux isolants a la plus grande énergie [12]. La conduction dans un matériau diélectrique est le résultat de la présence d'un flux de porteurs de charges activé par l'application d'un champ électrique aux bornes de l'isolant. De nombreux facteurs peuvent affecter la conduction et le stockage de la charge dans les polymères, notamment la cristallisation, la réticulation et les additifs. Cependant, les propriétés électriques des polymères changent lorsqu'elles sont exposées à des températures élevées pendant une longue période et à des champs électriques élevés. Le contrôle de la charge sera soit par les phénomènes d'interfaces électrodes/diélectrique ou air/diélectrique, soit par des phénomènes de volume au sein de l'isolant [13].

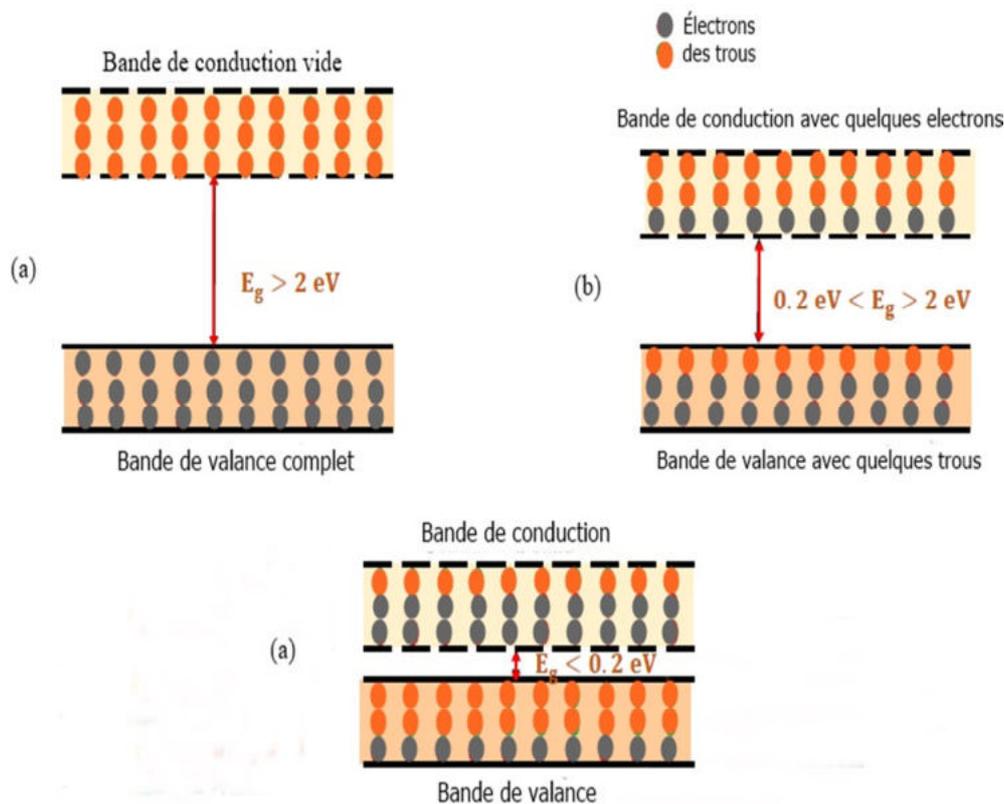


Figure I.6. Diagrammes de la bande d'énergie des matériaux dans les trois situations; (a) un isolant, (b) un semi-conducteur et (c) un conducteur [12].

Dans le cas d'une conduction contrôlée par l'interface, les deux matériaux entrent en contact avec des niveaux de Fermi différents, les charges s'écoulent d'un matériau à l'autre jusqu'à ce que les niveaux de Fermi soient égaux. Ce flux de charges libres génère alors une charge positive d'un côté et une charge négative de l'autre, entraînant la création d'un champ électrique aux bornes de l'interface appelé barrière de potentiel. Les charges doivent avoir suffisamment d'énergie pour franchir cette barrière. Les deux mécanismes les plus couramment utilisés qui peuvent décrire le phénomène d'injection à l'interface sont : l'injection de *Fowler-Nordheim* et l'effet *Shottky* [14]. La conduction contrôlée par le volume est conditionnée par l'existence des charges et à leur aptitude à se déplacer. Aux faibles champs électriques, la conduction du courant électrique dans les isolants est ohmique. À fort champ électrique, la caractéristique de tension et du courant dévie de la loi ohmique, les deux mécanismes principales de conduction sont la conduction limitée par la charge d'espace (CPLC) et les mécanismes de *Poole-Frenkel* [15, 16]. Les mécanismes les plus populaires sont illustrés à la **Figure I.7**. Généralement, plusieurs mécanismes peuvent fonctionner en même temps, mais un seul est dominant.

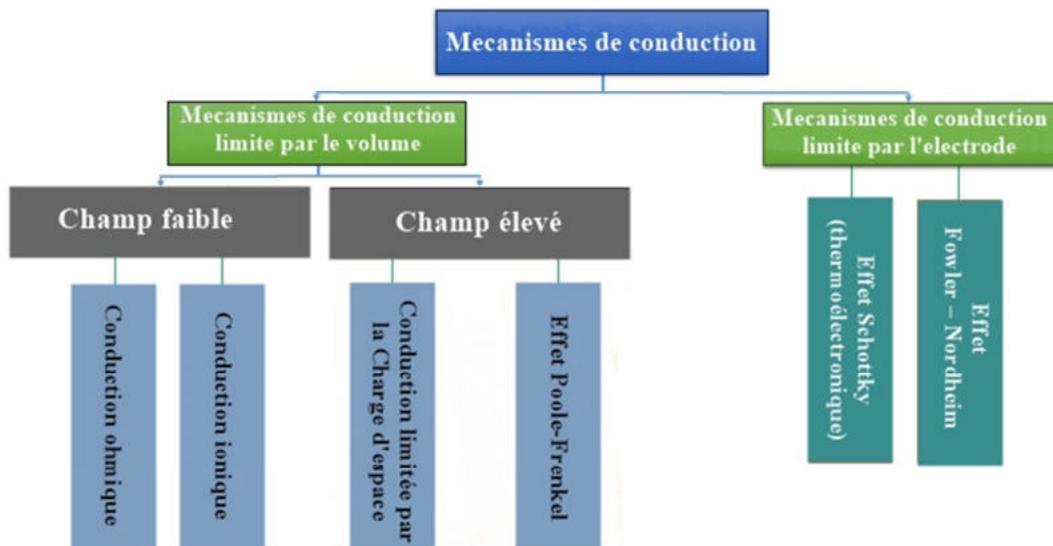


Figure I.7. Classification des mécanismes de conduction dans un matériau diélectrique [12].

I.4 Tribologie des polymères

La tribologie est la science qui étudie les phénomènes qui ont lieu lorsque des surfaces en interaction dans un mouvement relatif, c'est une zone de recherche très intéressante. Il est important de reconnaître le caractère pluridisciplinaire de la tribologie. Cette dernière englobe la science des matériaux, la physico-chimie des surfaces, la mécanique des solides et des surfaces, la thermique, la

thermodynamique et la thermochimie. La tribologie présente trois aspects : le frottement qui est la résistance à un déplacement imposé (secs, lubrifiés et mixtes), l'usure qui se traduit par une perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact [17, 18]. Dans plusieurs situations, les polymères sont utilisés pour des applications de tribologie principalement lorsque le faible frottement est une exigence principale. L'utilisation des polymères comme matériaux pour le glissement des composants des machines et des dispositifs a été augmenté [19]. Les contacts polymère sur polymère sont aujourd'hui importants dans la conception des machines et d'appareils dans la technologie moderne. La défaillance tribologique des composants mécaniques est l'un des problèmes les plus courants limitant la productivité [20], pour cela la compréhension des processus tribologiques est très importante.

Le frottement est une force de résistance agissant sur un corps qui empêche ou ralentit le glissement du corps par rapport à un second corps ou une surface. Le mouvement relatif des surfaces peut être exprimé comme une combinaison de glissement, de roulement et de rotation. La force agit tangentiellement à la surface aux points de contact est dirigée de manière à s'opposer au mouvement relatif, comme illustré à la **Figure I.8**. La loi de frottement la plus utilisée aujourd'hui est celle d'*Amontons – Coulomb* obtenue à l'issue d'études expérimentales d'*Amontons* (1699) et de *Coulomb* (1781), cette loi relie par l'intermédiaire d'un coefficient de frottement supposé constant, les composantes normale et tangentielle des contraintes de contact. L'amplitude du frottement est exprimée par un coefficient de frottement [21, 22], qui est le rapport de la force besoin d'initier ou de maintenir un mouvement tangentiel et de la force normale (F_n) qui plaque les deux surfaces en contact (**Figure I.8**). La première loi d'*Amontons* énonce que tant que la force tangentielle (F_s) est inférieure à une force seuil, il n'y aura pas de glissement. Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur, le corps glisse, le coefficient de frottement est défini comme :

$$F_s = \mu_s F_n \quad \text{I.5}$$

μ_s est appelé coefficient de frottement statique.

Une fois que le solide est en mouvement, une force (F_d) est nécessaire pour maintenir le glissement à vitesse constante. Cette force est aussi proportionnelle à la charge normale appliquée.

$$F_d = \mu_d F_n \quad \text{I.6}$$

μ_d est appelé coefficient de frottement dynamique. μ_d est généralement inférieur à μ_s .

Le coefficient de frottement μ dépend de plusieurs facteurs comme la nature et la rugosité des surfaces en contact et l'état de surface de contact (sèches, lubrifiées). Et par conséquent, le coefficient de frottement μ est indépendant de la pression de contact et l'air des surfaces en contact [23, 24].

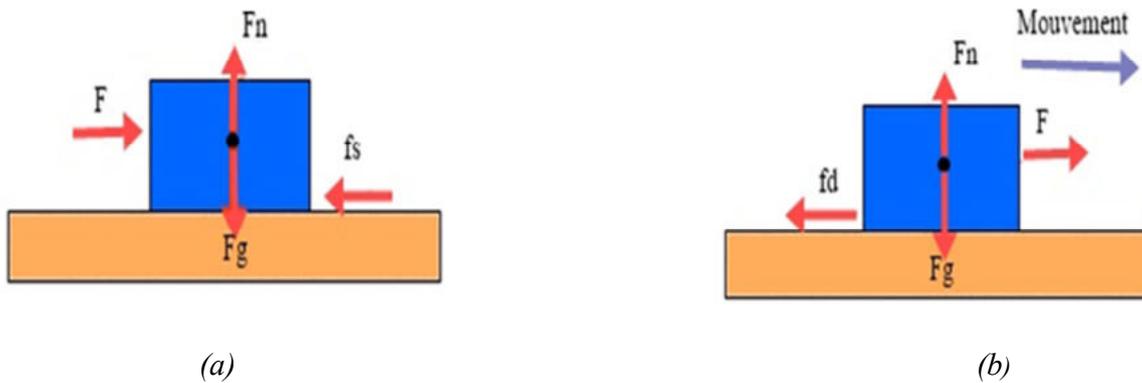


Figure I.8. Frottement statique (a), frottement dynamique (b).

Les propriétés du contact et du frottement dépendent fortement de l'état de surface, ils dominent les propriétés en volume. La notion de surface est définie par l'ensemble des propriétés physico-chimiques et mécaniques des matériaux. Sous l'action d'une charge, les solides se déforiment aux alentours du contact, en créant une zone de contact dont les dimensions restent petites par rapport à celles des corps. La rugosité joue un rôle essentiel puisqu'elle détermine l'aire effective de contact et donc la distribution des pressions superficielles (voir la **Figure I.9**). La zone de contact réel est connue lorsque deux surfaces mis en contact, un vrai contact se produit seulement aux bouts de leurs aspérités quand le glissement se produit, les vraies jonctions de contact seront cisailées. Comme aucune surface n'est idéale, il est difficile de prédire la zone de contact réelle [25, 26].

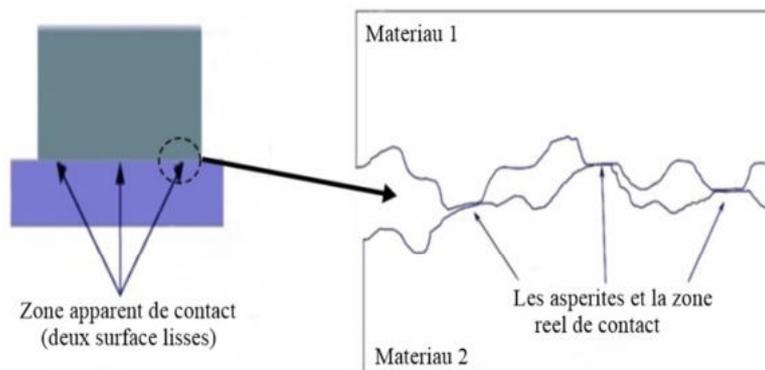


Figure I.9. Schéma de la zone de contact apparente par rapport à la zone de contact réelle [26].

I.5 Les processus de charge des matériaux isolants

Les processus de charge des matériaux isolants sont actuellement intensivement étudiés, en rapport avec plusieurs applications industrielles dans le domaine du recyclage, la séparation électrostatique, les techniques de purification de l'air, le filtrage, la peinture électrostatique et les électrets [27]. Le chargement des matériaux isolants peut être obtenu par différentes techniques; telles que le chargement par effet couronne, par effet triboélectrique, l'utilisation d'un faisceau d'électrons, l'ionisation (émissions d'ions sous haute tension) et les décharges partielles dans les gaz environnants en raison de forts champs électriques [28 29]. Les processus de charge les plus répandues étant la génération de charge par effet triboélectrique (le transfert de charge entre deux corps en contact) et par décharge couronne (charge par bombardement ionique). Dans les paragraphes suivants, nous allons passer en revue quelques concepts théoriques sur l'effet tribo-électrique et la décharge couronne.

I.5.1 Chargement des polymères par effet triboélectrique

L'effet triboélectrique est un phénomène connu depuis plus de deux mille ans. Pourtant, la compréhension des mécanismes mis en jeu n'est pas totale. La charge triboélectrique peut être produite par frottement lors de la fabrication et du transport de nombreux matériaux, à la suite de frottements entre eux ou avec d'autres surfaces (**Figure I.10**). Il est difficile de prévoir le chargement triboélectrique en raison de la complexité des facteurs qui le contrôlent. La charge générée par effet triboélectrique dépend de nombreux paramètres tels que : la nature des matériaux, l'état de leur surface (rugosité), la pression lors du frottement, la vitesse de frottement, la température et le taux d'humidité du milieu ambiant [30, 31].

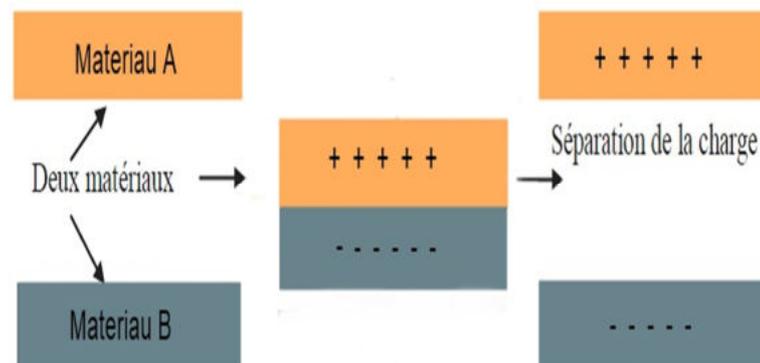


Figure I.10. Transfert de charge entre deux matériaux par contact [32].

Les mécanismes de génération des charges électrostatiques sont assez bien connus si le contact se produit entre deux métaux ou entre un métal et un isolant; elles restent généralement méconnues pour les interfaces isolant/isolant. Les travaux de *Lowell* et *Truscott* [33], partant sur la constatation que deux isolants se chargeaient mutuellement par effet triboélectrique ont ouvert la voie vers la compréhension des mécanismes mis en jeu. Les mécanismes de génération de charge électrostatique entre deux matériaux ont été étudiés par de nombreux chercheurs. *Harper* (1957) a développé le mécanisme de la théorie de l'électrostatique qui a été confirmé en 1980 par les expériences de *Lowell* et de ses collègues. *Lowell* et *Rose-Innes* ont mené des recherches sur le chargement par effet triboélectrique de différents matériaux. Ils ont conclu qu'il existe trois mécanismes pouvant être responsables de la génération de charge après un frottement entre deux matériaux: le transfert d'électrons, le transfert d'ions et le transfert de matière (**Figure I.11**). Il a été démontré que la charge triboélectrique par contact entre métal-métal est due au transfert de l'électron [34, 35]. La nature du porteur de charge pour les polymères n'est pas totalement claire. Certains chercheurs ont supposé que le transfert de charge entre les polymères implique le transfert d'électrons [36]. L'existence d'une double polarité de charge électrostatique sur la même surface est expliquée par le transfert de matière entre les surfaces des corps en contact. Il a été démontré que le transfert de charge dans les polymères est possible et qu'il est dû au déplacement d'ions [37, 38].

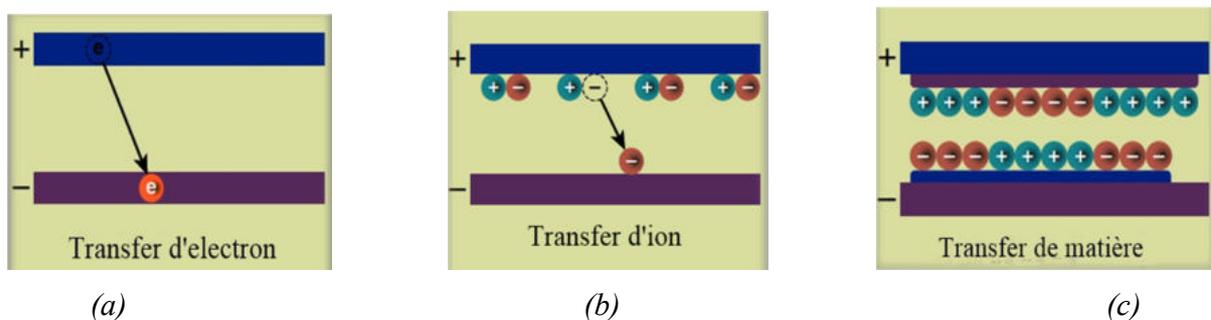


Figure I.11. Mécanismes possibles de transfert de charge : (a) Transfert d'électrons ; (b) Transfert d'ions ;(c) Transfert de matière [21].

Plusieurs auteurs ont mené des études sur la charge triboélectrique entre des matériaux identiques. Il est prouvé que deux matériaux identiques se chargent mutuellement lorsqu'ils sont frottés l'un contre l'autre et peuvent continuer à se charger lorsqu'ils sont contactés plusieurs fois, le transfert de la charge entre les deux matériaux se produit de sorte que la première surface est chargée positivement et l'autre par des charges négatives [37, 32]. Il est observé que le niveau maximum de la charge produite aux surfaces après un contact et au frottement est en fonction de la position des matériaux dans les séries

triboélectriques. Plus les deux matériaux mis en contact sont éloignés dans une telle série, plus la charge engendrée sera élevée. La série triboélectrique est un classement de la polarité d'un matériau lorsqu'il est frotté avec un autre matériau, cette dernière est considérée comme un classement relatif des matériaux (**Figure I.12**). Le classement d'un matériau peut facilement changer de position dans la série en fonction de plusieurs facteurs tels que la rugosité de surface, la force de contact et la fonction de travail [39, 40].

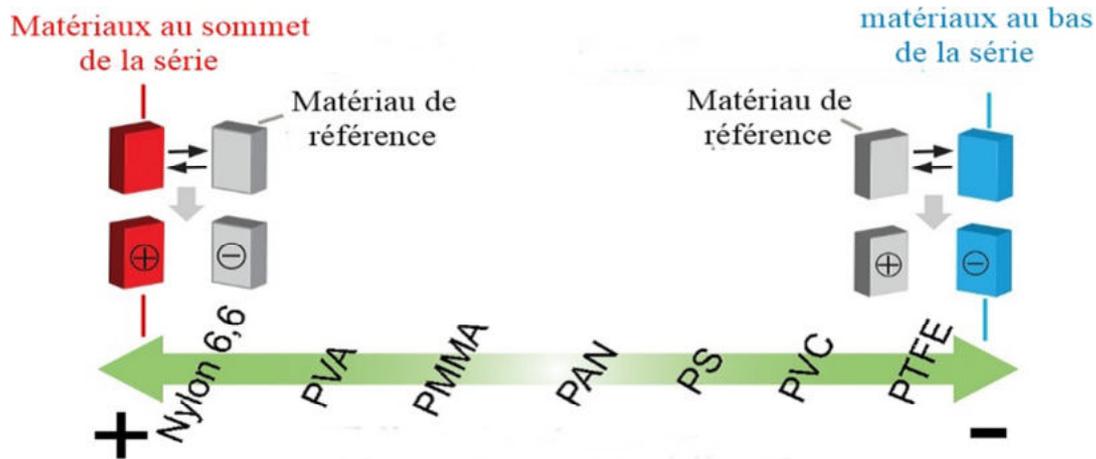


Figure I.12. Série triboélectrique pour certains matériaux [41].

I.5.2 Facteurs influents sur le charge triboélectrique

La complexité de chargement triboélectrique des matériaux isolants peut être expliquée par les nombreux facteurs qui influent sur ce processus, parmi ces facteurs on trouve : l'état chimique de surface, la nature de matériaux (cristallinité), la force de contact, la vitesse de déplacement, le temps de chargement, l'humidité et la température. Cependant, il y'a d'autres paramètres structurels peuvent affecter les propriétés triboélectriques des matériaux, tels que la forme de diélectrique, la zone de contact, la rugosité de surface et la pureté [42, 43]. Tous ces facteurs ont déjà été étudiés individuellement, mais les interactions entre les facteurs n'ont pas été prises en compte. Cette partie résume les analyses de la littérature relatives aux facteurs influents sur le chargement triboélectrique des matériaux isolants.

I.5.2.1 Effet de la force de contact

La charge électrique générée après le frottement entre deux polymères augmente si la force de contact appliquée est augmentée, puis elle stabilise lorsque la force de contact atteint un niveau de force déterminé pour chaque matériau. L'effet de la force appliquée dépend également de l'échelle de la

pression de contact qu'il crée sur la surface de contact. À des faibles forces de contact, les aspérités sur la surface ont une interaction faible et montrent un comportement qui dépend linéairement de la force appliquée. D'autre part, lorsque la force appliquée est élevée, la pression de contact résultant élevée présente un caractère de frottement différent due à la déformation du polymère [42].

I.5.2.2 Effet de la vitesse de frottement

L'effet de la vitesse de frottement sur la génération de charge a été étudié par plusieurs auteurs [44, 45]. Dans certaines études, on trouve que la génération de la charge électrique est indépendante de la vitesse de frottement (ou n'affecte pas d'une manière importante). Cependant, dans autre situation, la charge électrique est augmentée en fonction de la vitesse de glissement. Dans des conditions de frottement simples, une augmentation de la vitesse tend à diminuer la force de frottement selon un modèle logarithmique. Les résultats de *Quaglioni* et al ont montrés que la force de frottement dans une configuration plat à plat augmentait à mesure que la vitesse augmentait [46]. Il est constaté que l'effet de la température est associé à la vitesse de frottement; à des vitesses plus élevées, le polymère a tendance à chauffer rapidement en raison des propriétés superficielles et thermiques du matériau. Ainsi, dans certains cas, une vitesse faible est préférée pour limiter l'effet de la température, qui influence la force de frottement; une augmentation de la température entraîne une augmentation de la force de frottement et cela traduit sur la génération de charge [45].

I.5.2.3 Effet de l'humidité

La génération de charge varie largement avec la teneur en humidité d'un matériau. En général, l'humidité a tendance à augmenter la conductivité de la charge le long de la surface des polymères, ainsi que la dissipation de la charge à l'air ambiant. Par conséquent, on a cru que la charge statique diminue à mesure que l'humidité relative augmente. *Greason* a trouvé que l'augmentation de l'humidité relative (de 10% à 70%) a causé une diminution de la charge nette produite entre une boule d'acier inoxydable et de différents isolants; tels que le verre, le PTFE, le polycarbonate et le nylon [47]. Il a supposé que cette diminution pourrait être liée à une diminution de la résistivité de volume et de surface des isolants provoqués par l'augmentation de l'humidité relative.

I.5.2.4 Effet du temps de frottement

Le temps de frottement a un effet sur la génération de charge après un frottement entre deux polymères, il est observé que la charge générée sur la surface de matériau est plus importante pour des

temps de frottement plus longues; après certain temps la saturation du niveau de charge se change d'un matériau à un autres. Par exemple comme le PTFE est un matériau viscoélastique, leur déformation est fortement dépendante du temps et de la température. Sous une force constante, la zone de contact du polymère est graduellement augmentée avec le temps. La déformation des surfaces des polymères est un processus dépendant du temps de frottement [48]. Comme les temps de contact augmentent, la zone réelle de contact devrait augmenter au sein de certaines limites, par conséquent, la charge transférée va également augmenter. Ceci est vérifié dans le travail de *Homewood et Rose-Innes* (1979), ils ont conclu que la zone de contact augmente avec la durée de mise en contact [49].

I.5.2.5 Effet de la structure et la composition chimiques

Le chargement triboélectrique des polymères se change d'un matériau à l'autre, pour la simple raison que la composition chimique est différente. Le chargement triboélectrique des polymères peuvent affecter par les propriétés physiques-chimiques des surfaces. Des études antérieurs ont montré que les groupes chimiques, comme NH_2 , OCH_3 , CH_3 , C_2H_5 , OH , H , sont repoussant des électrons, qui causent une charge positive sur la surface, certains groupes chimiques, comme le Cl , le Br , I , COCH_3 , NO_2 , sont attirant des électrons, qui a rendu la surface chargée négativement [50].

I.5.3 Types de tribomètres utilisés pour étudier l'effet triboélectrique

Les essais de frottement à l'aide des tribomètres sont généralement effectués dans les laboratoires du monde entier pour accélérer le développement des matériaux. Certaines études antérieures ont été réalisées en tant que mesures du frottement et de corrosion de surface dans plusieurs situations tels que l'utilisation des lubrifiants (d'huiles ou solides) et le traitement des surfaces, ce qui conduit à l'amélioration des propriétés de ces matériaux. Dans la grande majorité des cas, les études réalisées se concentrent sur les mesures du coefficient de frottement où la force tangentielle est mesurée et divisée par la force normale. Cela suffit pour de nombreuses applications, mais des études plus approfondies sont nécessaires pour élucider tous les aspects liés au frottement et les mécanismes responsables pour une large gamme de matériaux, qu'ils soient un frottement conducteur-isolant ou isolant-isolant. Les mesures de génération des charges électrostatiques après un frottement entre deux polymères est nécessaire pour déterminer les facteurs influents sur ce processus et les mécanismes responsables. La génération de la charge électrique par effet triboélectrique a été étudiée par plusieurs groupes de recherche [51 - 53]. Les différences possibles entre les méthodes de préparation des échantillons et les procédures expérimentales avec le niveau de précision des systèmes utilisés conduit aux désaccords et

des différences dans les résultats obtenus. Il existe différentes catégories de bancs d'essais pour étudier les phénomènes triboélectriques. Des recherches ont été réalisées en utilisant des tribomètres qui peuvent être classés selon plusieurs configurations, parmi eux on trouve:

- Tribomètre à cylindre-sphère ;
- Tribomètre linéaire ou va-et-vient ;
- Tribomètre pion-disque.

I.5.3.1 Tribomètre à géométrie cylindre-sphère

Une revue de la littérature a montré que diverses méthodes d'essai ont été utilisées pour évaluer l'accumulation de charge triboélectrique due au contact et à la séparation de différents matériaux. *Greason* a utilisé une géométrie cylindre-sphère (**Figure I.13**) pour étudier les phénomènes triboélectriques [47]. Cette configuration permet d'étudier la charge développée sur une bille en acier inoxydable établissant un contact de roulement avec la surface interne d'un tube en matériau isolant à l'aide d'un seau de Faraday et d'un électromètre. Les échantillons diélectriques ont été montés sur un plateau tournant, une sphère d'essai en métal a été utilisée pour établir un contact unique avec un échantillon donné.

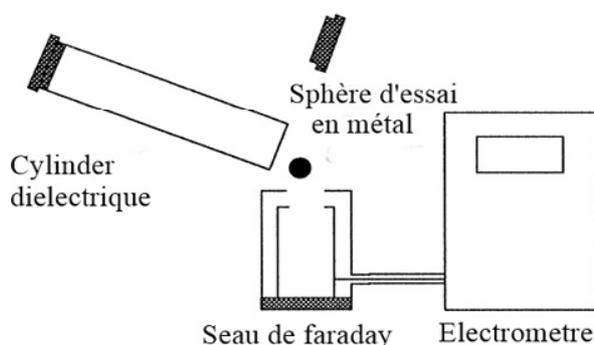


Figure I.13. Tribomètre cylindre-sphère pour étudier l'effet triboélectrique [47].

I.5.3.2 Tribomètre linéaire ou va-et-vient

Ce type de tribomètre est caractérisé par un mouvement de va-et-vient (**Figure I.14**). Il est caractérisé par un mouvement rectiligne. Il permet d'avoir des configurations de contact glissant ponctuel, linéique ou plan. *Ohara* a utilisé ce type de tribomètre pour mesurer les charges triboélectriques dues au frottement réciproque entre différents matériaux [44]. L'appareil est équipé de quatre électrodes grâce auxquelles il est possible de mesurer simultanément la charge générée et leur

déclin sur les deux surfaces. Ce type de dispositif et les procédures utilisés étaient très compliqués, ce qui aurait pu réduire la précision.

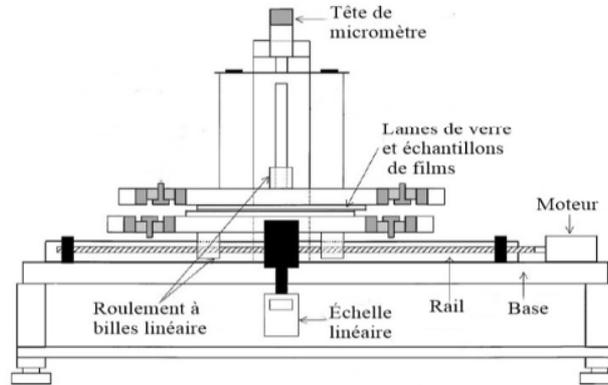


Figure I.14. Tribomètre linéaire ou va-et-vient pour étudier l'effet triboélectrique [45].

I.5.3.3 Tribomètre pion-disque

Le tribomètre pion-disque réalise le contact glissant en tournant un disque sur un pion stationnaire. Ce tribomètre est le banc d'essais le plus couramment utilisé (**Figure I.15**). Il se compose d'un arbre en rotation à vitesse variable sur lequel se fixe un disque constituant le premier matériau à tester. Un pion associé avec le deuxième matériau du couple tribologique se monte sur un support équipé d'un capteur de force normale et tangentielle. Une force normale est appliquée au support de manière à presser le pion sur le disque. Puis le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée. Ce tribomètre permet l'étude des types de contacts : ponctuel, linéique ou plan. La mesure de charge en mode online n'est possible que pour l'éprouvette disque [54].

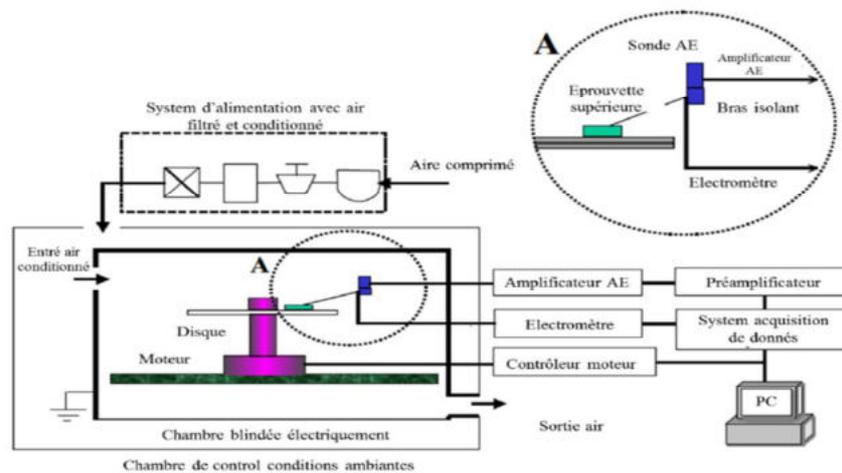


Figure I.15. Tribomètre pion-disque pour étudier l'effet triboélectrique [54].

I.6 Chargement des polymères par effet couronne

Les décharges électriques sont des plasmas froids et sont générées par une différence de potentiel électrique. Parmi les décharges électriques à pression atmosphérique, on trouve les arcs et les torches à plasmas, la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique. Les premières études sur les décharges couronne ont été menées par Townsend au début du 20^e siècle. Dans la plupart des applications électrostatiques actuelles, le chargement est réalisé par décharge couronne, en raison de leur simplicité, sureté et faible coût. Les décharges couronne ont de nombreuses applications commerciales et industrielles, elles remplacent des techniques souvent plus polluantes (utilisation de solvants). Cette méthode est pratique car elle permet de déposer de manière contrôlée une quantité de charge connue (sous forme d'ions) à la surface d'un corps [55, 56], l'effet couronne est utilisée dans :

- La séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices.
- Les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs.
- Les Précipitateurs électrostatiques.
- Les photocopieurs et les électrets.
- La modification des propriétés superficielles des polymères.
- La neutralisation et la charge des médias non tissés.

L'avantage de la décharge couronne est de pouvoir fonctionner avec tous les types d'alimentation électrique, par contre la difficulté principale rencontrée avec ce type de décharge est la transition à l'arc. Pour créer une décharge couronne on applique une tension de valeur suffisante à des électrodes telles que des fils ou des aiguilles et montés à proximité de la surface à charger. La décharge couronne est liée à l'apparition de l'avalanche électronique qui se développe dans un intervalle gazeux séparant deux électrodes asymétriques soumises à un champ électrique élevé. Elle apparait lorsque la valeur maximale du champ électrique atteint celle du champ d'ionisation du gaz (air) et se manifeste sur toute la gamme de fréquences de la tension. La décharge couronne se manifeste aussi dans les conditions naturelles, elle se caractérise par des phénomènes de nature optique, acoustique et électrique [57 - 59].

I.6.1 Mécanismes et processus physiques des décharges couronnes

Le comportement d'une décharge dépend de plusieurs paramètres électriques, géométriques et de paramètres physiques du gaz. Une température plus élevée diminue la rigidité diélectrique de l'air, ce qui favorise la décharge couronne. L'humidité a une influence très importante sur la quantité des espèces d'ions produits. Les processus microscopiques présents dans la décharge couronne sont variés

et très complexes. L'application d'un champ électrique suffisamment intense conduit à l'ionisation du gaz. Cette dernière se fait par le transfert de l'énergie cinétique des électrons aux molécules neutres du gaz. L'existence d'une décharge électrique dépend de la possibilité de créer des particules chargées à partir des atomes ou des molécules neutres constituant ces gaz [60]. Un électron placé dans un champ électrique uniforme (le champ électrique est donné par : $E = V/d$, où V est la différence de potentiel appliquée et d la distance entre les deux électrodes) est accéléré et peut ioniser des atomes ou des molécules. L'ionisation d'une espèce conduit donc à la formation d'une particule chargée et à la libération d'un électron supplémentaire, qui à son tour va être accéléré et acquérir une énergie suffisante pour ioniser une seconde particule. Ce mécanisme d'ionisation successive est connu sous le nom « avalanche électronique » ou « décharge de *Townsend* ». Selon le type de polarité de l'électrode couronne les charges créées par collisions dérivent vers l'électrode collectrice sous l'effet du faible champ en constituant ainsi un dépôt de charge [61, 62]. La **Figure I.16** montre une architecture d'une décharge couronne fil-plan. Sous l'influence du champ électrique appliqué, toutes les particules ainsi créées vont se déplacer dans l'espace inter-électrodes et générer un courant électrique, ce qu'on appelle le courant de décharge [63].

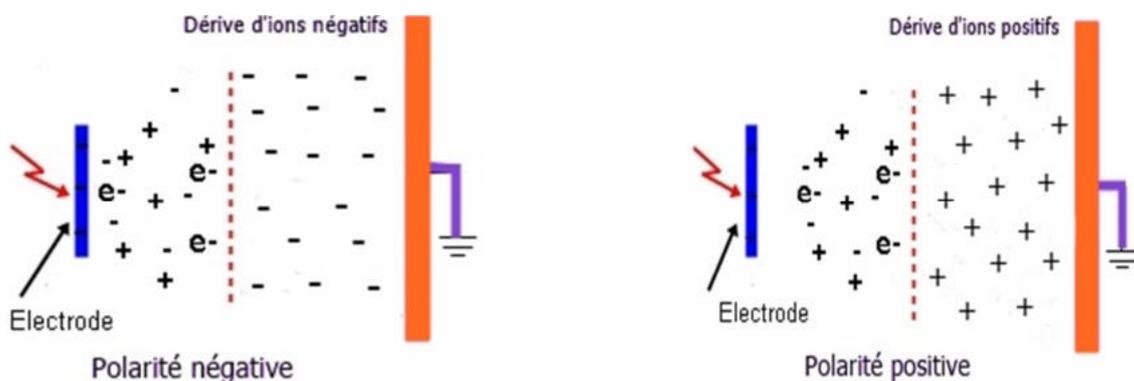


Figure I.16. Architecture de la décharge couronne.

Lorsqu'un matériau isolant chargé par une décharge couronne, les charges entraînées par le champ se déposent et s'accumulent en surface et donnent lieu à un potentiel de surface exprimé en fonction de la densité de charge σ_s par :

$$V_s = \frac{\sigma_s}{\epsilon} e \quad 1.7$$

Où e représente l'épaisseur de l'isolant et ϵ sa permittivité.

Une distribution volumique, nommée charge d'espace, a été formée dans le volume de l'isolant et entraîne ainsi la distorsion du champ au sein de l'isolant. Le potentiel à la surface de l'isolant déposé sur une électrode mise à la masse est donné par :

$$V_s = -\int_0^e E dx \quad \text{I.8}$$

En fonction de la tension appliquée à l'électrode active, le signe de la charge déposée sur l'isolant peut être positif ou négative. Une décharge couronne dans une configuration pointe-plan est représentée dans la **Figure I.17**.

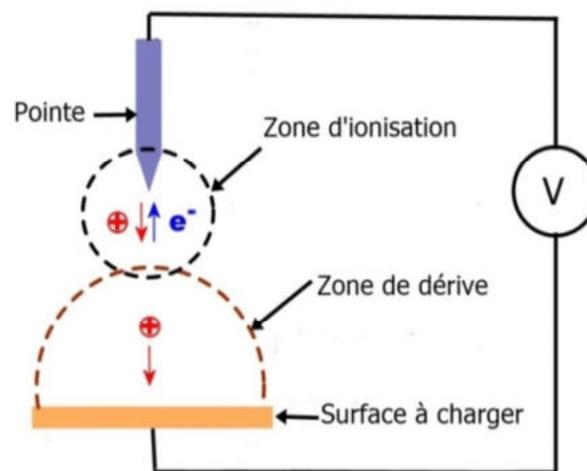


Figure I.17. Schéma d'une décharge couronne en géométrie pointe /plan.

I.6.2 Système d'électrode et cartographie de la décharge couronne

La distribution du champ électrique dans l'espace inter-électrode dépend de la configuration utilisée. La géométrie des électrodes joue un rôle important dans l'analyse de la décharge. La **Figure I.18** représente quatre configurations de la décharge couronne: pointe-plan, fil-plan, pointe-grille-plan et fil-grille-plan. Dans la géométrie pointe-plan, la région de champ élevé où la génération de charge se produit, est confinée près de la pointe. Par contre, la partie restante de la distance inter-électrodes est soumise à un champ suffisamment faible. On utilise généralement une configuration d'électrodes pointe-plan pour imposer le sens de propagation au canal de pré-décharge. Le système d'électrodes élémentaire pointe-plan est inapproprié pour le contrôle du dépôt de charge et donne souvent une distribution de charge surfacique non-uniforme, avec une forte densité au milieu et qui décroît en progressant vers les extrémités [64, 65].

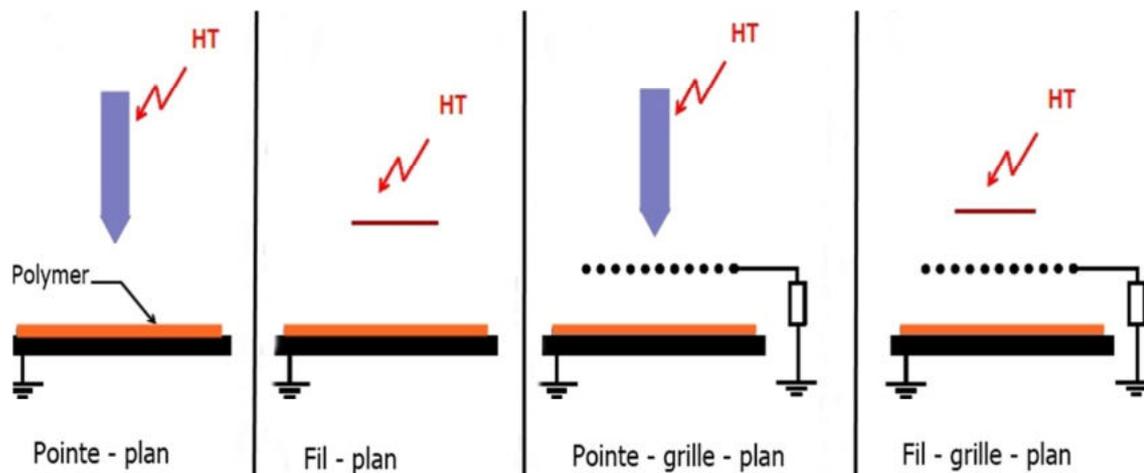


Figure I.18. Systèmes d'électrodes.

Un exemple d'un système plus avancé est nommé « triode corona », où une grille est intercalée dans l'espace entre l'électrode couronne et la surface du matériau qui permet le contrôle du niveau de potentiel de la surface à charger et l'obtention d'un dépôt uniforme (**Figure I.19**). Dans cette configuration d'électrodes, appelée système triode, les charges issues de l'ionisation de l'air sont accélérées sous l'action du champ électrique. La zone active est près de l'électrode active où le champ est supérieur au champ critique du minimum d'ionisation [66, 67]. L'électrode dual permet de contrôler l'orientation de la décharge couronne et son intensification dans une direction. Cette classe d'électrodes est caractérisée par la non-uniformité de l'injection de charge autour de l'élément ionisant. Avant que la décharge se produise et l'électrode dual soit portée à un potentiel élevé, la grille a le même potentiel que celui du plan de masse. Ainsi le champ électrique est très inhomogène dans la zone entre l'électrode et la grille. En présence de la décharge, des charges de même polarité que celle de l'électrode duale sont collectées par la grille s'écoulent à travers la résistance que relie celle-ci à la masse. Les charges qui ont traversées la grille sont attirées par le plan de masse et interceptées par le matériau déposés sur celui-ci. Ainsi la surface libre du matériau subit un dépôt de charges sous l'action du champ électrique dû à la différence de potentiel entre la grille et le plan de masse. Le matériau continue à se charger jusqu'à ce que le potentiel de surface de celui-ci soit égal à celui de la grille [68].

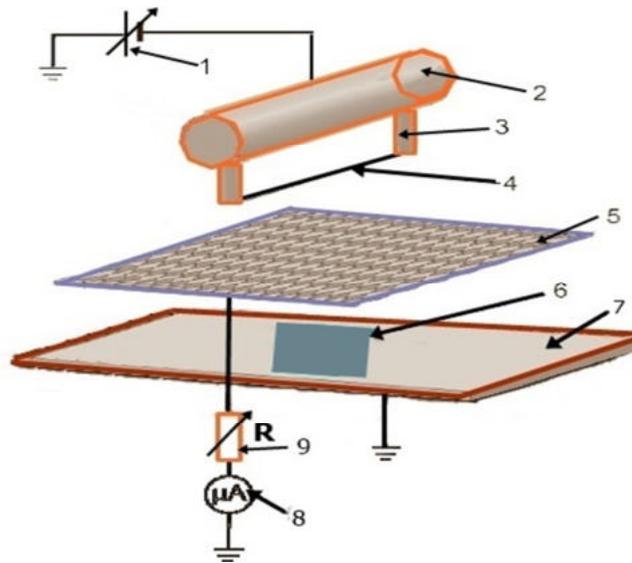


Figure I.19. Système de charge fil-grille-plan: 1 - alimentation haute tension, 2 - cylindre métallique, 3 - tige métallique, 4 - fil de tungstène, 5 - grille en aluminium, 6 échantillon, 7 - plaque en aluminium mise à la terre, 8 - micro-ampèremètre, 9 - résistance variable.

I.7 Mécanismes de décharge électrique des matériaux isolants

Après le dépôt des charges électriques sur la surface des polymères par la décharge couronne ou par le chargement triboélectrique, ces charges resteront un certain temps déterminé par l'efficacité des processus de déclin. Les études de déclin de potentiel de surface (DPS) trouvent leurs importances dans de nombreuses applications électriques, telles que la détermination des propriétés électriques des matériaux d'isolation, la conductivité superficielle des isolants et tester l'aptitude du matériau contre la charge statique. Le déclin de potentiel de surface (DPS) est un facteur clé lors de l'examen du type d'isolant pouvant être utilisé dans les équipements de haute tension [69, 70]. Le déclin de potentiel dans un échantillon chargé implique un certain nombre de processus physiques. Ces processus incluent la polarisation du volume, la conduction de surface, la neutralisation atmosphérique, l'injection de charge et les phénomènes piézoélectriques. C'est pourquoi l'interprétation des courbes d'évolution du potentiel de surface au cours du temps nécessite une compréhension suffisante sur ces processus physiques [71, 72]. La **Figure I.20** résume schématiquement les différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface. Dans la plupart des études rapportées, la présence d'un ou deux mécanismes a été négligée, soit au stade de la conception de l'expérience, soit lors de la comparaison des contributions relatives de ces processus. Dans le même temps, la neutralisation des gaz a également été considérée comme insignifiante en raison du taux de déclin négligeable sur des échantillons épais [73].

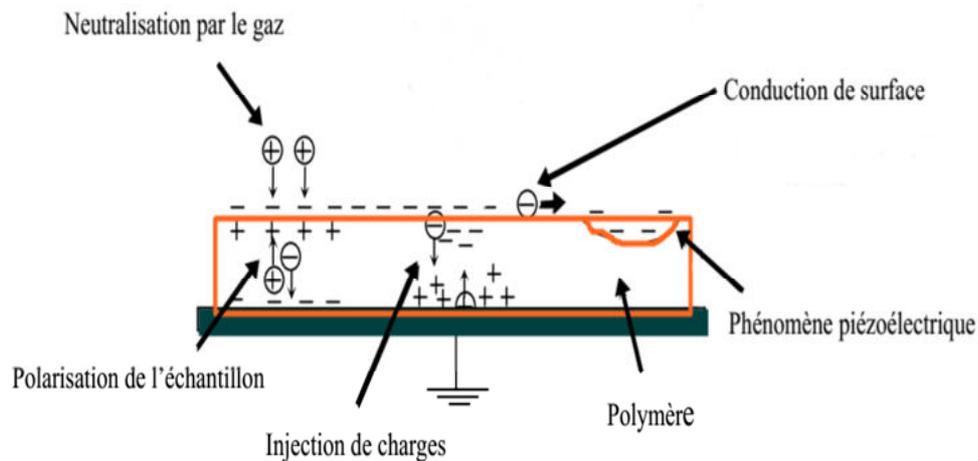


Figure I.20. Différents processus qui peuvent contribuer au déclin du potentiel de surface [74].

La littérature récente sur la mesure du déclin de potentiel de surface est dominée par l'hypothèse d'une injection dans le volume de la charge déposée à la surface accompagnée de processus de polarisation lents sous l'influence de la charge déposée. De toute évidence, une compréhension approfondie du processus physique détaillé de la cinétique de déclin de potentiel de surface est nécessaire. *Baum et al* ont montré que les molécules de gaz excitées ainsi que les photons résultant du chargement par effet couronne de la couche d'air au-dessus de la surface du polymère sont importants pour induire une charge des états de surface vers la masse, où les charges deviennent plus mobiles, conduisant à un déclin de potentielle plus rapide [75]. Le déclin de potentielle de surface du film polymère chargé présente des caractéristiques de croisement. *Tabti et al* [76] ont étudié les caractéristiques de déclin de potentiel de surface sur des feuilles de polypropylène non-tissés après un chargement par effet couronne et un arrangement d'électrode de type triode avec différentes tensions de grille (**Figure 0.21**). Une représentation tdV/dt en fonction de $\log(t)$ a montré un pic large contrairement à une courbe de réponse de base. En absence de potentiel de grille, cette structure non homogène conduit à un dépôt de charge non uniforme et un déclin de charge plus rapide à travers l'électrode de masse. *Dascalescu et al* ont réalisé une étude de déclin de potentiel de surface des granules de chlorure de polyvinyle (PVC), polyéthylène (PE) et de caoutchouc à l'aide d'une sonde électrostatique, ils ont constaté que l'augmentation de l'humidité sur la surface de l'isolant a accéléré la vitesse du déclin [77]. *Remadnia et al* ont étudié le déclin potentiel à la surface d'une couche granulaire de particules de polystyrène à impact élevé (HIPS) d'épaisseur variable, les résultats ont montré que le déclin de potentiel de surface est accéléré par l'augmentation du potentiel de grille et freiné par l'augmentation de l'épaisseur de particules [78].

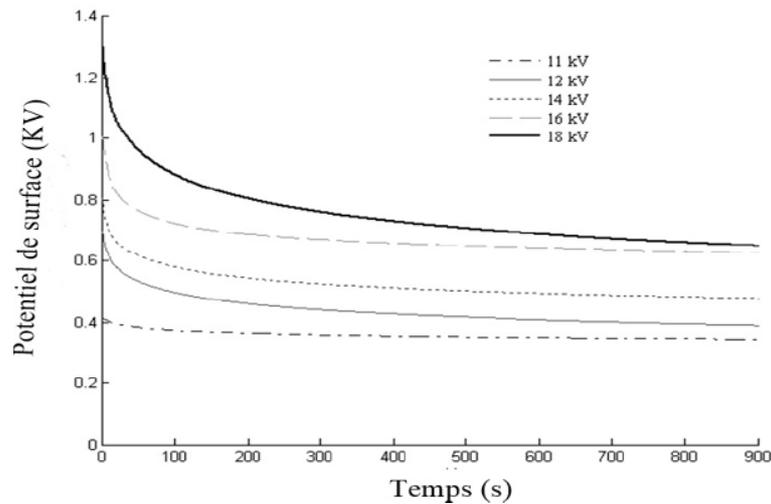


Figure I.21. Courbes de DPS obtenues pour plusieurs valeurs de tension de décharge positive [76].

Une autre étude de déclin de potentiel de surface des films de PET a été réalisée par *Herous et al* [79], ils ont montré l'importance et le rôle de la température et de l'humidité sur l'évolution du processus de chargement du PET, et ils ont constaté que le taux de déclin initial augmente avec la température (voir la **Figure 22**). *Lovera et Molinié* [80] ont également réalisé une étude sur le déclin du potentiel de surface sur le polypropylène (PE) soumis à un intervalle de température de 10 °C jusqu'à 80 °C, une représentation $t dV/dt$ en fonction de $\log(t)$ a été utilisée pour représenter les courbes de déclin, ils ont trouvés que le mécanisme d'injection de charge à la surface de l'échantillon suivi par une conduction ionique activé par la température est le mécanisme responsable de la dynamique des charges de surface.

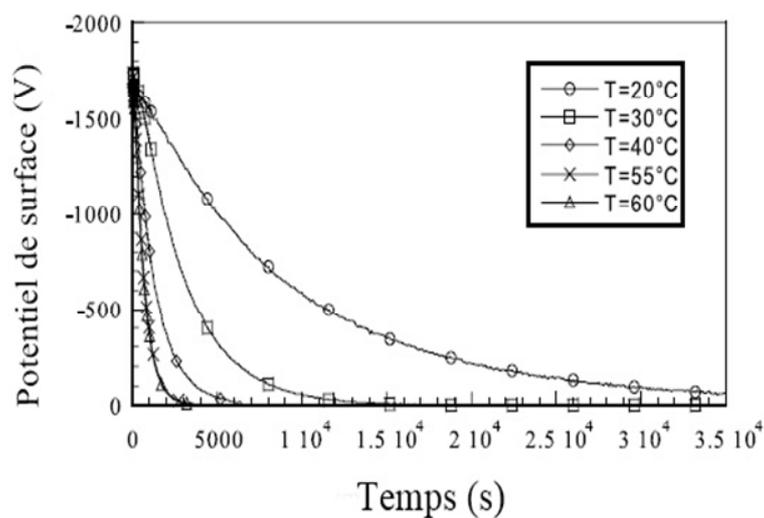


Figure I.22. Déclin du potentiel de surface pour différentes valeurs de température [79].

I.8 Traitement et modification des surfaces

Diverses techniques physiques et chimiques ont été développées ces dernières années pour la modification des surfaces des matériaux. Le traitement par plasma à basse pression est fréquemment utilisé pour modifier les propriétés de surface des polymères. Ainsi, traiter une surface consiste à modifier les propriétés mécaniques, électriques, optiques et tribologiques sans altérer les propriétés de volume. La surface subie à un traitement sera également différente par rapport au matériau de base. Un polymère exposé à un plasma subit des réactions chimiques qui sont la conséquence, directe ou indirecte des interactions de la surface du matériau avec les espèces plasmagènes [81]. Les radicaux, les ions et les photons jouent un rôle important dans le transfert d'énergie du plasma à la surface du matériau (**Figure 1.23**). L'interaction plasma-surface permet de couper les liaisons des chaînes de polymères et activer la surface pour donner lieu au greffage des groupes fonctionnels. Tous ces phénomènes ont lieu simultanément au cours d'un traitement, l'importance de chacun dépendant fortement de la nature du gaz plasmagène et de celle du matériau [82, 84]. Le traitement de surface d'un matériau a plusieurs rôles :

- La création des fonctions chimiques pour favoriser les interactions chimiques à l'interface.
- La modification de l'énergie de surface afin d'augmenter ou de diminuer l'hydrophilie.
- La modification de la morphologie et la réticulation de surface.
- Amélioration de l'inertie chimique.
- Augmentation de la conductivité électrique de surface [85, 86].

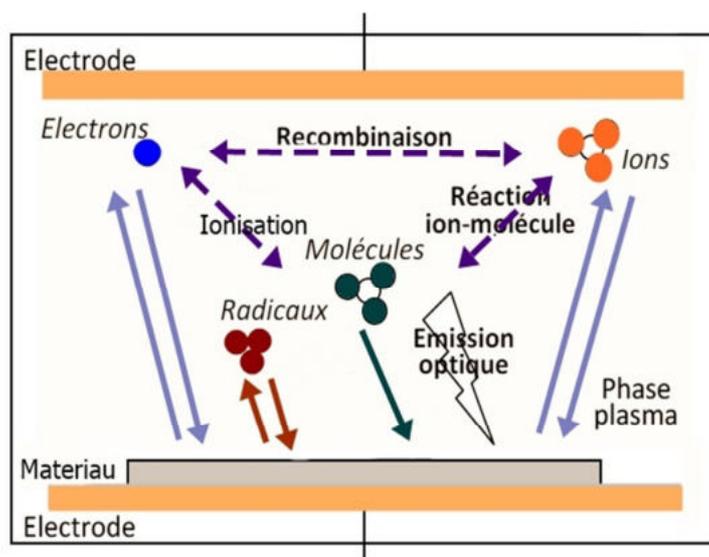


Figure I.23. Espèces mises en jeu dans les réactions plasma-surface [87].

I.8.1 Décharge à barrière diélectrique(DBD)

La décharge couronne dans l'air est considérée comme l'une des méthodes les plus simples pour la génération des plasmas froids. En effet, la formation d'importantes charges d'espace peuvent transformer la décharge en arcs électriques. Si ces arcs sont suffisamment énergétiques, ils peuvent devenir dangereux pour le matériau. Ainsi, pour limiter l'apparition de tels phénomènes, une solution simple consiste à disposer entre les deux électrodes un matériau diélectrique (**Figure I.24**). Le diélectrique permet de limiter l'énergie de la décharge et d'éviter ainsi le passage à l'arc. Les Décharges à Barrière Diélectrique (DBD) sont de plus en plus utilisées dans des applications industrielles diverses telles que le contrôle d'écoulement, la dépollution, la génération d'ozone et le traitement de surface [88].

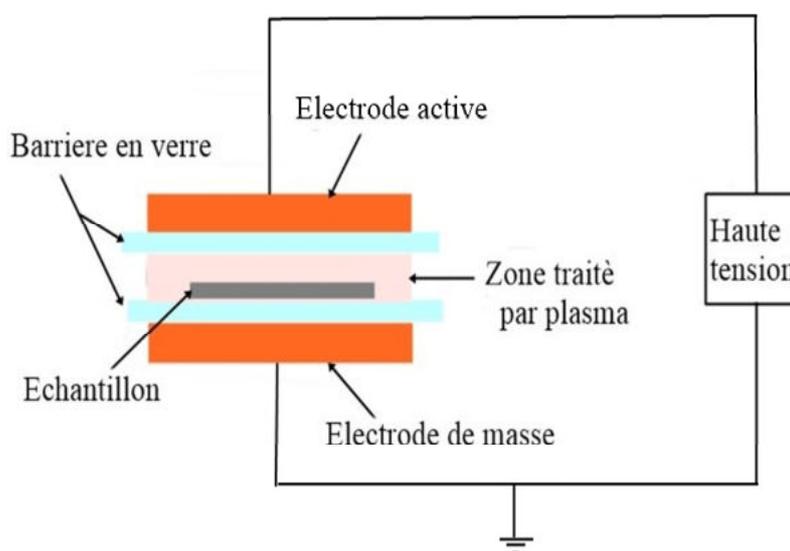


Figure I.24. Configuration classique d'une décharge à barrière diélectrique (DBD).

I.8.1.1 Principe de fonctionnement

Lorsqu'on applique une tension suffisamment élevée entre les électrodes, le claquage du gaz conduit à la formation d'une micro-décharge (**Figure I.25 (a)**). Le schéma équivalent de la **Figure I.25 (d)** montre une représentation de cette micro-décharge. Le diélectrique placé entre les deux électrodes se comporte comme un isolant d'un condensateur C_d . Prenant en considération le fait que la tension appliquée à la cellule de décharge (V_{app}), la tension aux bornes du matériau diélectrique solide (V_d) et la tension aux bornes du gaz (V_g). Le passage du courant induit une accumulation de charges sur la surface du diélectrique en vis-à-vis du canal de décharge, conduisant à une augmentation de la tension V_d , ce qui entraîne une chute de la tension V_g appliquée sur le gaz, 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. Lorsque la tension appliquée augmente, des micro-décharges s'initient à de nouvelles positions comme le montre la **Figure I.25 (b)**, car la présence des charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées. Au changement de polarité, les charges précédemment déposées à la surface du diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la première phase (**Figure I.25 (c)**) [89, 90].

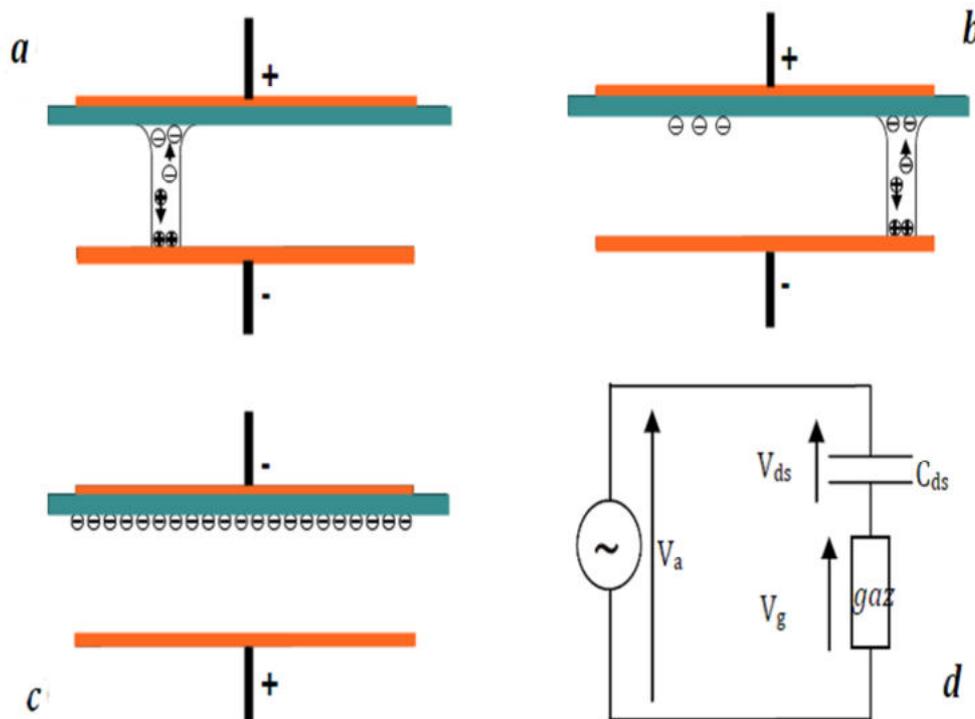


Figure I.25. Principe de fonctionnement d'une décharge à barrière diélectrique [89].

Il existe plusieurs configurations de DBD, les configurations classiques de DBD sont schématisées sur la **Figure I.26**. Le choix de configuration dépend de type de matériau à traiter et l'application visée, pour le traitement de surfaces des matériaux solides, les configurations planaires sont utilisées, l'arrangement plan-plan de la **Figure I.26 (a)** présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, tandis que les cylindriques sont plus adaptées aux traitements de gaz (**Figure I.26 (b)**). Les diélectriques de la barrière couramment utilisés sont le verre, le quartz, la céramique et les polymères [91].

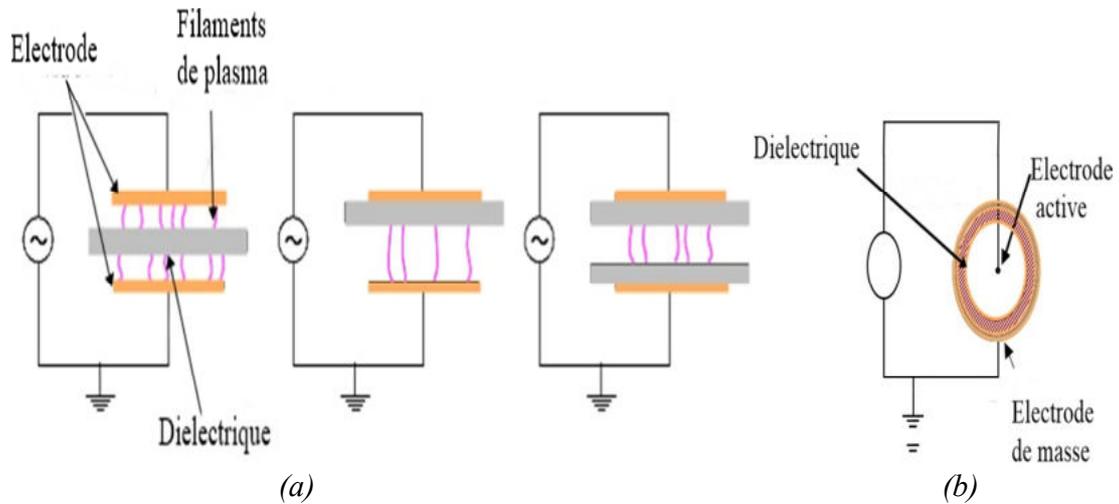


Figure I.26. Types de configurations de décharge à barrière diélectrique.

I.8.1.2 Régimes de décharge et propriétés électriques

Suivant les différents paramètres de la DBD (géométriques et électriques). On distingue deux régimes de décharge à pression atmosphérique sont le régime filamentaire de type Streamer et le régime homogène (de Townsend ou luminescente). Le régime filamentaire est caractérisé par la création d'une multitude de streamers se développant indépendamment et conduisant à la formation de micro-décharges. Chacune d'elles induit une impulsion de courant d'une durée moyenne de quelques dizaines de nanosecondes. La **Figure I.27** montre un exemple de la forme d'onde du courant et de la tension dans le cas d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale.

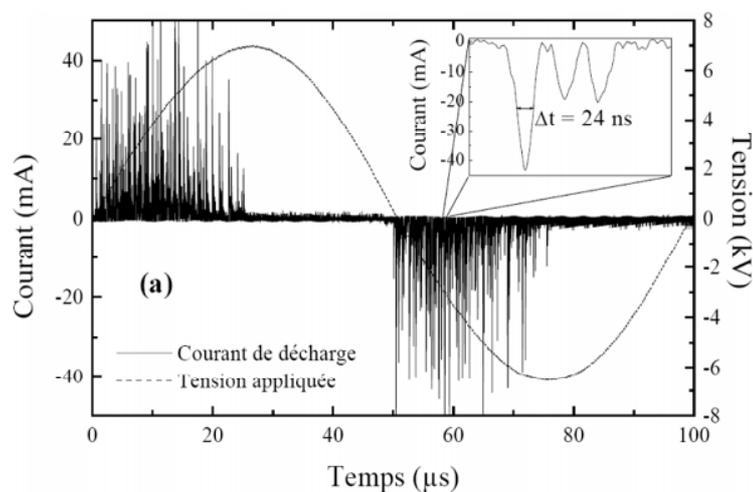


Figure I.27. Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire [91].

Le régime homogène n'est possible que sous certaines conditions et peut être de type Glow (électroluminescent) ou de type Townsend. La DBD homogène de type Glow est caractérisé par un seul pic de courant par demi-période en AC. Ceci suggère un développement unique de la décharge dans tout l'espace inter électrodes (**Figure I.28 (a)**). La caractéristique tension - courant d'une décharge luminescente 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. La DBD homogène de type *Townsend* ou décharge de type Townsend est aussi caractérisée par un seul pic par demi-période en AC. Dans ce cas, le pic de courant est plus étendu (**Figure I.28 (b)**). De plus, la tension dans le gaz reste sensiblement constante durant toute la phase de la décharge [92].

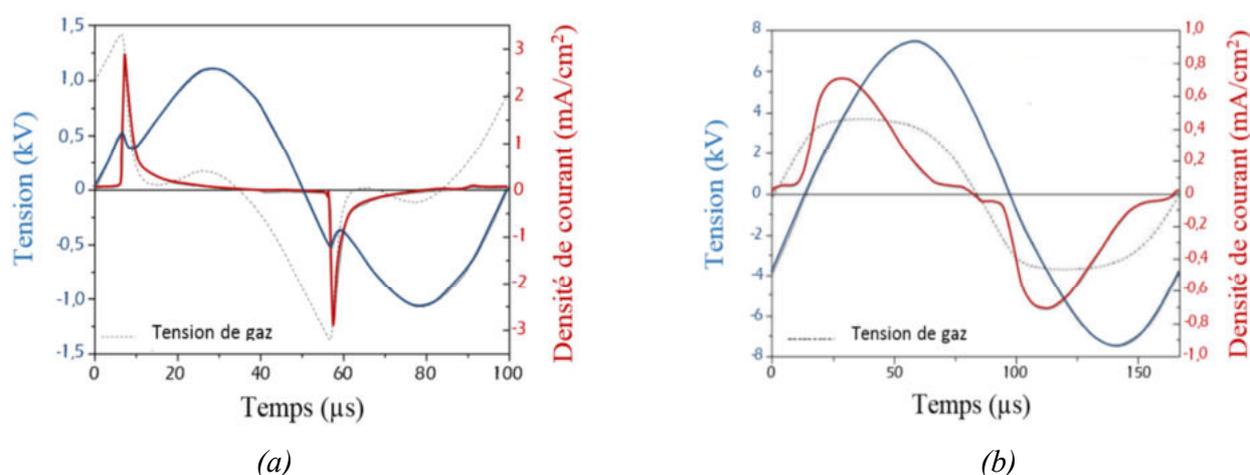


Figure I.28. Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Glow (a), type Townsend (b) [92].

I.8.2 Comportement de frottement des polymères traités par la DBD

De nombreuses études expérimentales indiquent que la microstructure de surface des polymères et leur composition chimique ont changé régulièrement avec le traitement par le plasma [93, 89]. Ces études ont montré les effets de la modification de la surface par le plasma sur le comportement tribologique et électrostatique des polymères. Zheng et al ont étudié les propriétés mécaniques des films multicouches TiN / TiCN modifiés par plasma d'argon, ils ont trouvés qu'un film modifié par plasma présentait un faible comportement au frottement et une bonne résistance à l'usure [93]. Wolthuizen et al ont examiné les performances de frottement de plusieurs caoutchoucs après des traitements par plasma pulsé-DC, ils ont indiqué que le butadiène-acrylonitrile (NBR) et butadiène-acrylonitrile hydrogénés (HNBR) sont plus sensibles au traitement par plasma dans leurs conditions

appliquées [94]. L'effet du traitement par la DBD sur le comportement triboélectrique des poudres de polystyrène (PS), de films acryliques et de films de polyéthylène (PE) en utilisant un plasma d'argon, d'hélium et d'air a été étudié par *Sharma et al* [95]. Ils ont montré que le traitement par le plasma diminue la charge spécifique acquise par les polymères, ainsi que la résistivité superficielle des échantillons. *Takashima et al* ont rapporté dans leurs travaux que le traitement du polypropylène (PP) et du polyéthylène (PE) par tout type de plasma aide à éliminer les charges électrostatiques [96]. *Tekeda et al* [97] et *Kodama et al* [98] ont montré que le traitement par le plasma peut améliorer le contrôle de la charge du polymère.

I.9 Conclusions

Ce chapitre constitue une synthèse sur les processus de charge et de décharge des matériaux isolants. Nous allons concentrer sur les deux modes les plus utilisées : le chargement par effet triboélectrique et par décharge couronne. Le traitement des matériaux polymères par la technique de la décharge à barrière diélectrique (DBD) est ainsi abordé. En effet, nous pouvons en conclure les points suivants :

- L'étude de la charge électrique générée par effet tribologique pour les polymères est très importante en raison de la multiplicité des mécanismes de gouvernance, les paramètres de contrôle et leur effet sur de nombreux domaines.
- Il existe plusieurs techniques et dispositifs pour étudier le chargement triboélectrique des matériaux, chacun a ses avantages et ses inconvénients. Les différences entre les procédures expérimentales et le niveau de précision des systèmes utilisés conduit à une diversité de conclusions dont certaines sont contradictoires.
- Le traitement de surface des polymères est d'une importance considérable dans plusieurs applications industrielles. Le traitement de surface des polymères par les décharges à barrière diélectrique (DBD) a montré que cette technique peut modifier l'état de surface de ces matériaux et ainsi conduire à des changements du comportement triboélectrique.

I.10 Position du Problème :

À partir de cette synthèse bibliographique, nous constatons que les contacts polymère / polymère sont aujourd'hui importants dans la conception des machines et des appareils dans la technologie moderne, pour cela la compréhension des processus triboélectrique est très importante et très utile. Les charges statiques dues au contact ou frottement dépendent de plusieurs facteurs.

Il est difficile de prévoir le chargement triboélectrique en raison de la complexité des facteurs qui le contrôlent. De ce fait, l'objectif de notre recherche est d'obtenir une meilleure compréhension du comportement électrostatique des surfaces polymériques, et de déterminer les effets de différents paramètres de frottement sur la génération et la dissipation des charges statiques sur les surfaces des polymères couramment utilisés dans l'industrie.

De plus, une comparaison est faite entre la charge de surface déposée par décharge couronne et celle générée par effet triboélectrique, en utilisant la technique de déclin de potentiel de surface pour évaluer la dynamique des charges électriques sur les surfaces des polymères.

L'effet de l'état des surfaces après le traitement par le plasma DBD sur le comportement triboélectrique reste assez flou et devrait être étudié plus en profondeur, ce qui a été l'une des motivations pour approfondir ce sujet.

CHAPITRE II
INSTALLATIONS ET METHODES
EXPERIMENTALES

Chapitre II Installations et méthodes expérimentales

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les dispositifs expérimentaux, ainsi que les méthodes de préparation des matériaux polymères, les instruments et les méthodes de mesures électrostatiques utilisés dans la caractérisation des matériaux diélectriques. Nous exposerons aussi les objectifs de chaque mesure et le déroulement de chaque expérience. Une partie importante de notre travail consiste à caractériser le comportement électrostatique et thermique des matériaux polymères et l'étude de l'effet de différents paramètres. Toutes les expériences ainsi que l'appareillage utilisé dans nos travaux ont été réalisés dans le laboratoire à l'Institut PPRIME, CNRS (Université de Poitiers : France) dans le cadre d'une coopération sous forme d'une convention entre notre Université 8 mai 45 de Guelma et l'Université de Poitier.

Pour permettre de quantifier par mesure la génération, la distribution et la dissipation des charges électrostatiques des polymères. Nous avons utilisé des différents montages pour effectuer les procédés suivants :

- Le chargement triboélectrique des matériaux polymères.
- Le chargement par effet couronne.
- Les mesures des températures de surface après frottement.
- Les mesures de déclin de potentiel de surface (DPS).
- Le traitement des surfaces par décharge à barrière diélectrique (DBD).

II.2 Préparation et caractérisation des matériaux utilisés

Les progrès des techniques expérimentales ont un impact significatif sur les développements technologiques, d'ingénierie et de savoir-faire. Les matériaux isolants présentent beaucoup de propriétés favorables à leur utilisation, en raison de leur faible coût de fabrication et aux bonnes propriétés électriques, mécaniques, physiques et chimiques. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur le comportement électrostatique des matériaux polymères afin de comprendre les

mécanismes impliqués dans la génération et la dissipation des charges statiques, pour éviter les conséquences indésirables de ces charges sur l'efficacité des processus de production et la sécurité des biens et des personnes.

II.2.1 Préparation et dimensions des éprouvettes

La **Figure II. 1** montre les matériaux polymériques qui font l'objet de la présente étude, qui sont : le Poly-Tétra-Fluoro-Ethylène (PTFE), le Poly-Vinyl-Chloride (PVC) et l'Acrylonitrile Butadiène-Styrène (ABS). Ce choix se justifie principalement par l'étendue de l'utilisation de ces matériaux dans l'industrie, l'accessibilité et le prix d'achat.

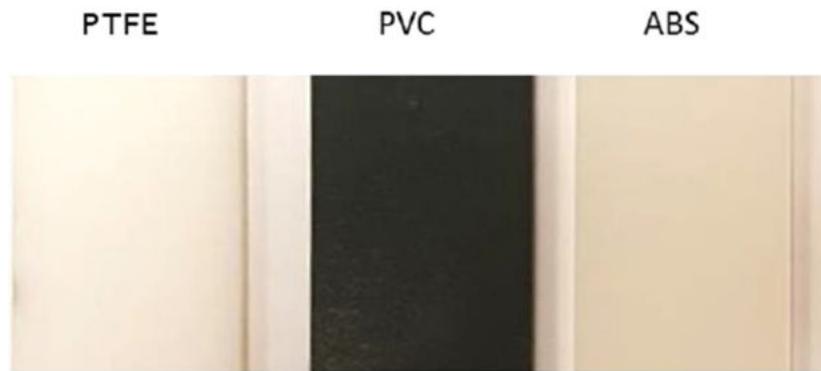


Figure II.1. Matériaux utilisées.

Le Polychlorure de vinyle (PVC) : est un polymère thermoplastique le plus largement utilisé. C'est un polymère essentiellement amorphe ou faiblement cristallin, mais le taux de cristallinité ne dépasse jamais 15%, sa structure chimique est présentée sur la **Figure II. 2**. Le PVC est un matériau reconnu pour ses multiples avantages : inaltérable, robuste, isolant et il ne nécessite aucun entretien. Ce polymère peut également être mélangé avec d'autres polymères pour élargir la gamme des propriétés [99]. C'est un matériau recyclable et écologique avec une grande espérance de vie.

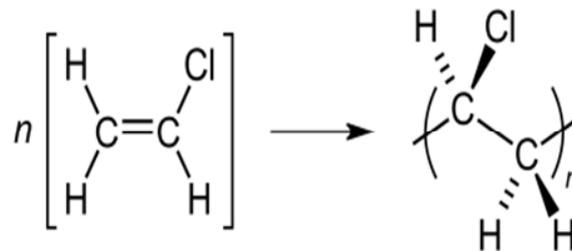


Figure II.2. Structure du Polychlorure de vinyle (PVC).

Le Poly-tétra-fluoro-éthylène (PTFE) : est un polymère vinylique fabriqué à partir du monomère tétra-fluoro-éthylène par polymérisation radicalaire. Il est plus connu sous le nom de marque Téflon et sa structure est similaire à celle du polyéthylène. On le représente souvent sous forme d'une chaîne d'atomes de carbone attachés à deux atomes de Fluor (**Figure II. 3**). Il possède des propriétés remarquables qui le distinguent des autres polymères thermoplastiques, notamment une excellente résistance thermique et chimique ainsi qu'un coefficient de frottement extrêmement faible et de bonnes caractéristiques d'isolation électrique [99].

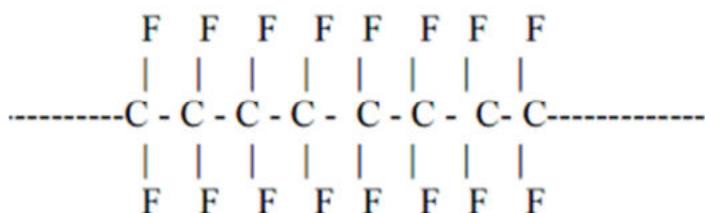


Figure II.3. Structure du polytétrafluoroéthylène (PTFE).

L'Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS) : est un polymère thermoplastique appartenant à la famille des polymères styréniques. Il est généralement défini par trois propriétés principales : fluidité, résistance thermique et résistance aux chocs. Le monomère styrène donne à l'ABS une bonne transformabilité (**Figure II. 4**), l'acrylonitrile assure la raideur ainsi que la résistance thermique et chimique, tandis que le butadiène rend le produit plus dur et plus élastique même à basse température. Le fait de modifier les proportions des composants de l'ABS et d'ajouter des additifs spécifiques permet de produire différents grades avec des propriétés spécifiques [100]. L'ABS est plus rigide que le PVC et le PTFE.

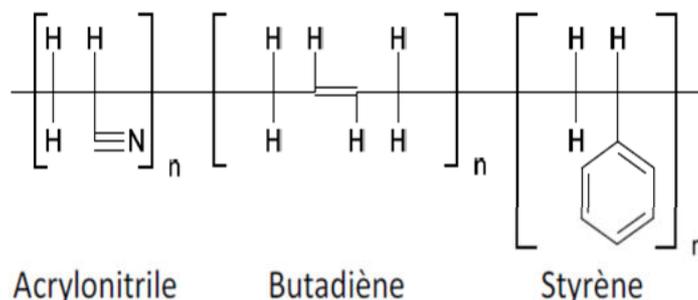


Figure II.4. Formules chimiques des monomères d'Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS).

Les propriétés mécaniques, électriques et thermiques des polymères utilisés dans les applications de tribologie peuvent affecter le comportement électrostatique de ces matériaux. La recherche présentée dans ce travail est principalement concentrée sur le comportement tribologique et électrostatique des matériaux polymères pour approfondir la compréhension des mécanismes impliqués dans la génération de charges électriques dans les contacts secs. Le **Tableau II.1** montre des caractéristiques des polymères thermoplastiques utilisés dans ce travail.

Tableau II. 1 : *Caractéristiques de quelques polymères thermoplastiques.*

Type de polymère	Masse vol (Mg/m ³)	Temp. De trans. Vitreuse. (c°)	Temp. De fusion (c°)	Condu. therm. (w/m.K)	Permit. relative
PTFE	1.4	75 à 105	160	0.15	2.7 à 3.3
PVC	1.03 à 1.08	110	>180	0.14 à 0.22	2.4 à 3,1
ABS	2.2	125	330	0.18	2,1 à 2.8

Les échantillons utilisés lors de nos essais se présentent sous forme des plaques découpées en différentes formes. L'épaisseur de PVC est de l'ordre de 5 mm, 10 mm pour le PTFE et d'environ 6 mm pour l'ABS. La rugosité des polymères utilisés était $Ra = 0,46 \pm 0,04 \mu m$ pour l'ABS, $Ra = 1,28 \pm 0,06 \mu m$ pour le PVC, $Ra = \mu m 1,46 \pm 0,05$ pour le PTFE. Toutes les expériences ont été réalisées dans une chambre où on a pu contrôler à la fois la température et l'humidité relative. Pour chaque expérience nous avons utilisé un échantillon neuf (vierge) afin d'éviter qu'une mesure influe sur l'autre.

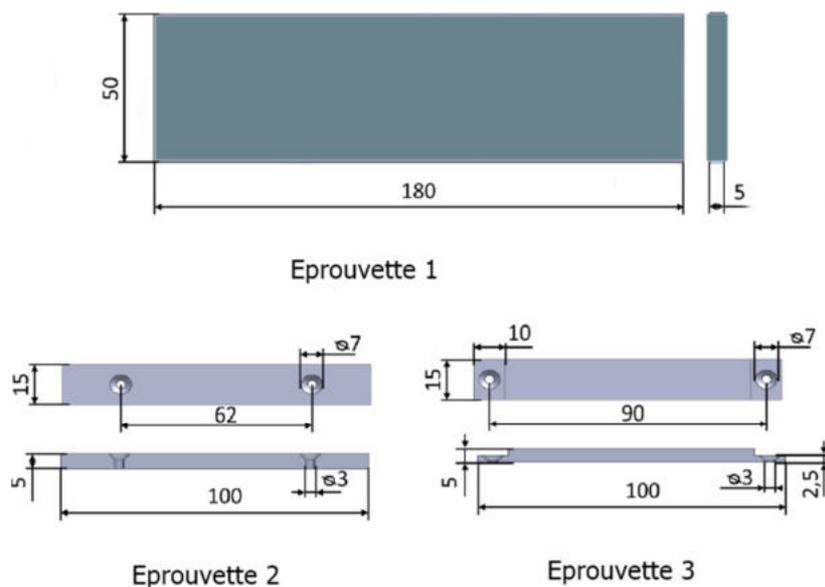


Figure II.5. Géométries et dimensions des échantillons utilisés.

II.2.2 Neutralisation des charges résiduelles

Afin d'obtenir des résultats reproductibles, il est nécessaire de retrouver les conditions initiales du matériau en terme de potentiel de surface correspondantes à une valeur sensiblement inférieure aux potentiels de surface obtenus après la phase de chargement. C'est pourquoi, nous avons neutralisé l'ensemble des charges résiduelles due à la manipulation et le transport des éprouvettes en utilisant une barre anti-statique (ELCOWA, model ECA88-BS), alimentée à partir d'une génératrice haute tension 5 KV (ELCOWA model SC04B) pendant 30 secondes (**Figure II. 6 (a)** et **Figure II.6 (b)**).

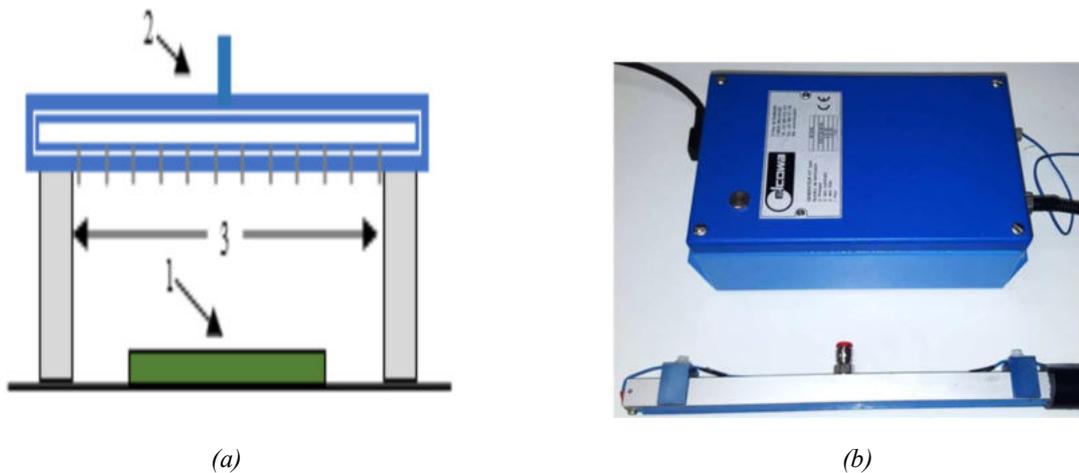


Figure II.6. Processus pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle (a) : (1) échantillon de polymère; (2) électrode ionisante; (3) support isolant. (b) générateur d'ions positifs et négatifs.

II.3 Dispositifs de charge par effet triboélectrique

II.3.1 Banc expérimental

Le banc expérimental représenté sur la **Figure II. 7** permet d'établir un contact conforme entre deux plaques de polymères. Il est constitué de deux parties qui se déplacent dans deux directions perpendiculaires assurant ainsi un chargement oblique du contact. Le guidage vertical est réalisé à l'aide de deux colonnes à billes. Un système à contrepoids articulé (1) contrôle le chargement normal du contact. L'éprouvette supérieure (6) est solidaire de ce mouvement vertical. Un capteur de force (9) mesure cette force normale. Le guidage horizontal est assuré par une glissière à billes (3). Un système bielle-manivelle à excentricité réglable (10) impose un mouvement de translation alternative permettant le chargement tangentiel du contact. Il est entraîné par un moteur à courant continu (2) qui contrôle la fréquence de ce mouvement alternatif. La force et le déplacement tangentiel sont mesurés par les

capteurs de force et de déplacement. L'éprouvette inférieure (7) est solidaire de ce mouvement horizontal. Elle repose sur une électrode métallique reliée à la terre et placée sur le porte-échantillon (5). Les expériences ont été réalisées en respectant scrupuleusement la procédure suivante :

- Tout l'équipement a été logé à l'intérieur d'une chambre environnementale, ce qui permet de contrôler la température et d'humidité relative.
- Le contact est mis en chargement normal; la force normale indiquée par le capteur est fixée à la valeur désirée par l'ajustement de la position de la masselotte du système (1).
- Le moteur (2) est mis à une tension préalablement réglée à la fréquence à imposer.
- Le support de l'éprouvette inférieure est installé sur une table XY équipée d'une sonde électrostatique (modèle 3450, TREK Inc), et reliée à un voltmètre électrostatique (modèle 341B, TREK Inc).
- La distance entre l'échantillon et la sonde était de 3 millimètres. Le signal enregistré à l'intérieur de la sonde est proportionnel à la différence de potentiel entre l'échantillon et le détecteur. Dans l'installation décrite ci-dessus, un secteur de diamètre de 8 millimètres devant la sonde a été détecté.

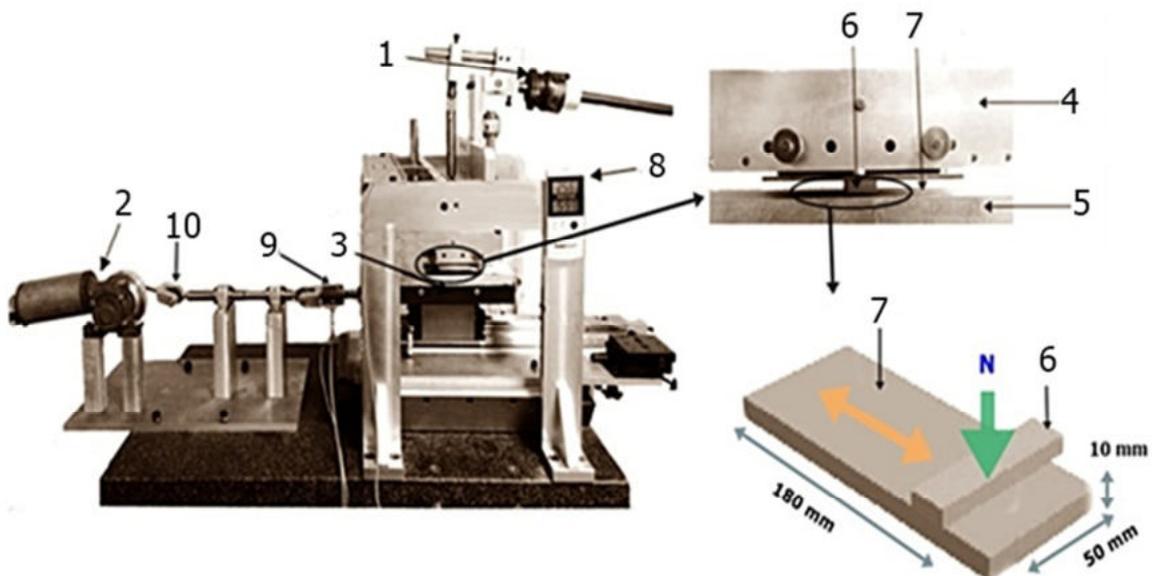


Figure II.7. Banc expérimental pour le chargement triboélectrique : (1) système de contrôle de la force normale; (2) moteur électrique; (3) glissière à billes du guidage horizontal; (4) porte-échantillon supérieur; (5) porte-échantillon inférieur; (6) éprouvette supérieure; (7) éprouvette inférieure; (8) mesure de température et d'humidité ambiante; (9) capteur de force normale; (10) système bielle-manivelle.

II.3.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle

Un système d'acquisition de données a été conçu pour simplifier le contrôle des différents facteurs qui affectent le processus de chargement triboélectrique. Cette installation permet de contrôler les variations des forces tangentielle et normale, du déplacement tangentiel et le nombre de cycles de glissement. Le pilotage de l'installation expérimentale est assuré par un poste de contrôle géré par un programme LabVIEW de National Instrument. L'interface utilisateur pour le pilotage du banc est présentée sur la **Figure II. 8**. Le programme permet de contrôler le régime de fonctionnement et de visualiser en temps réel les mesures des capteurs de force et déplacement. Les cartographies du potentiel électrique de surface sont visualisées par cette interface après le déplacement de l'éprouvette sur l'installation de mesure du potentiel.

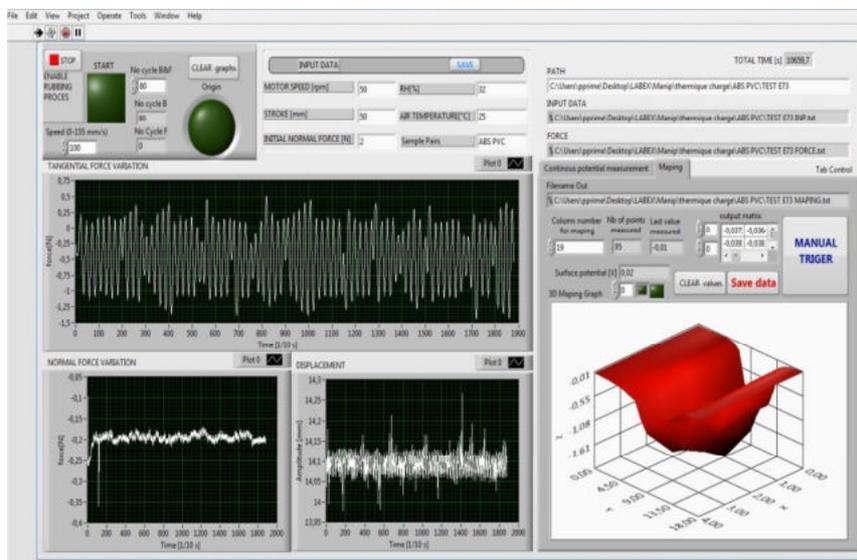


Figure II.8. Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.

II.4 Dispositifs de charge par effet couronne

Le chargement par effet couronne est réalisé avec une électrode duel de type filaire (fil de tungstène de 0,2 mm de diamètre supporté par un cylindre métallique de 26 mm de diamètre) utilisée dans une configuration triode (**Figure II. 9**), alimentée par une tension réglable en polarité négative ou positive (± 30 kV, 0,3 mA, modèle T1CP 300 304 n / p, ISEG). Les échantillons inférieurs (6) sont placés sur la plaque mise à la terre (5). La distance entre le fil de tungstène et l'échantillon est de 30 mm et la grille (4) placée entre eux. La grille reliée à la terre à travers une série de résistances (connectée à l'ampèremètre (7)) ayant une valeur totale égale à R permet de contrôler le dépôt de charge sur la

surface de l'échantillon. En effet, pour une intensité (I) constante de courant générée par la source HT, un potentiel $V_g = R.I$ est imposé entre la grille et la plaque d'électrode de terre. Le matériau se charge alors au potentiel de la grille (V_g). Une plaque mise à la terre (8) limite la zone affectée par la décharge couronne, de sorte que son extension à la surface de l'échantillon de polymère (55 mm) soit similaire à celle obtenue par chargement triboélectrique.

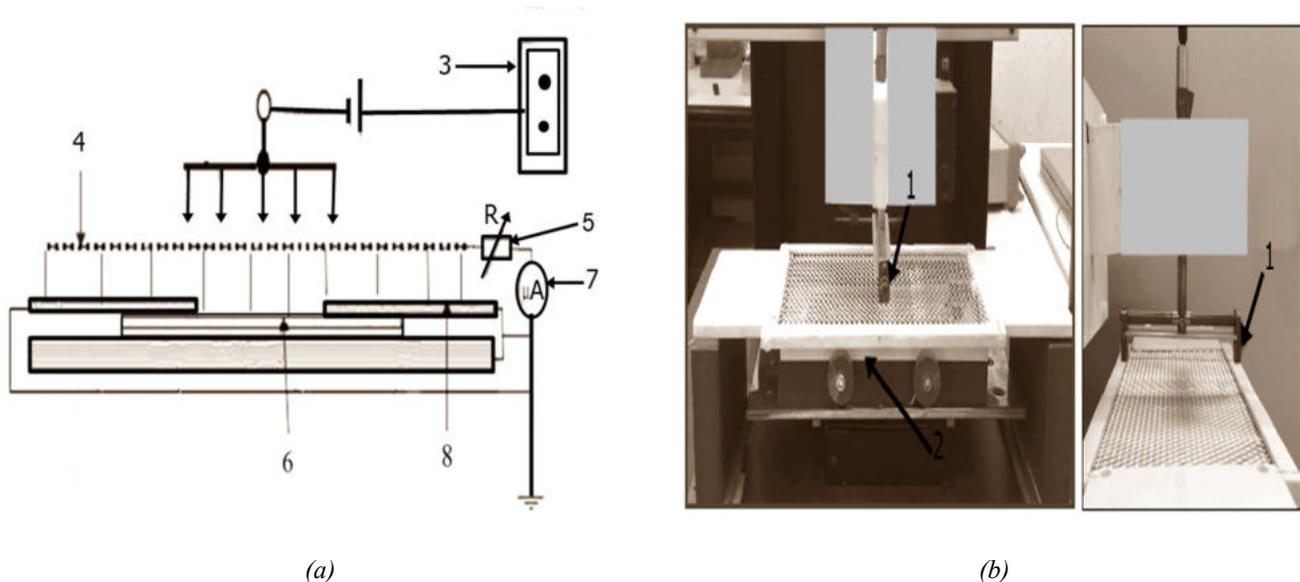


Figure II.9. Représentation schématique (a) et photographie (b) du système de charge par effet couronne: (1) fil de tungstène; (2) plan mis à la terre; (3) alimentation haute tension; (4) grille en aluminium; (5) résistance; (6) échantillon de polymère; (7) ampèremètre; (8) bouclier mis à la terre.

II.5 Installation de traitement par DBD

La Décharge à Barrière Diélectrique (DBD) est une excellente source de plasma pour le traitement de surface [101]. Dans le but d'étudier l'effet d'une décharge à barrière diélectrique (DBD) sur le comportement électrostatique des plaques de polymères après le frottement, le banc d'essai présenté sur la **Figure II. 10** a été utilisé, grâce à ce dernier on a pu analyser les grandeurs électriques relatives à la DBD et cela dans le but de ressortir l'effet des paramètres électriques et géométriques du traitement par la DBD sur la génération et la dissipation des charges triboélectriques des polymères. L'installation expérimentale de cette étude est présentée dans les **Figure II. 10** et **Figure II.11**, elle est composée d'une cellule de DBD alimentée par un amplificateur de signal haut tension, un système de mesure et un système d'acquisition. L'amplificateur haute tension (marque TREK modél 30/20 A) est utilisé pour alimenter la cellule de DBD, un générateur de signaux (marque YOKOGAWA-FG300) est utilisé pour piloter l'amplificateur. Grâce à ce dernier on a pu effectuer plusieurs réglages sur la haute tension de sortie, tel que le choix du type de signal (carré, sinus, triangle ...etc), la variation de la fréquence dans

un intervalle très large de 1 μHz à 15 MHz, réglage du rapport cyclique et de l'offset ...etc. L'amplificateur délivre une haute tension de sortie avec un rapport de multiplication de ($\times 3000$) par rapport au signal de pilotage du générateur de signaux, la tension maximale en DC est de ± 30 kV avec un courant de ± 20 mA ; la vitesse de montée du signal de sortie est de 550 V/ μs .

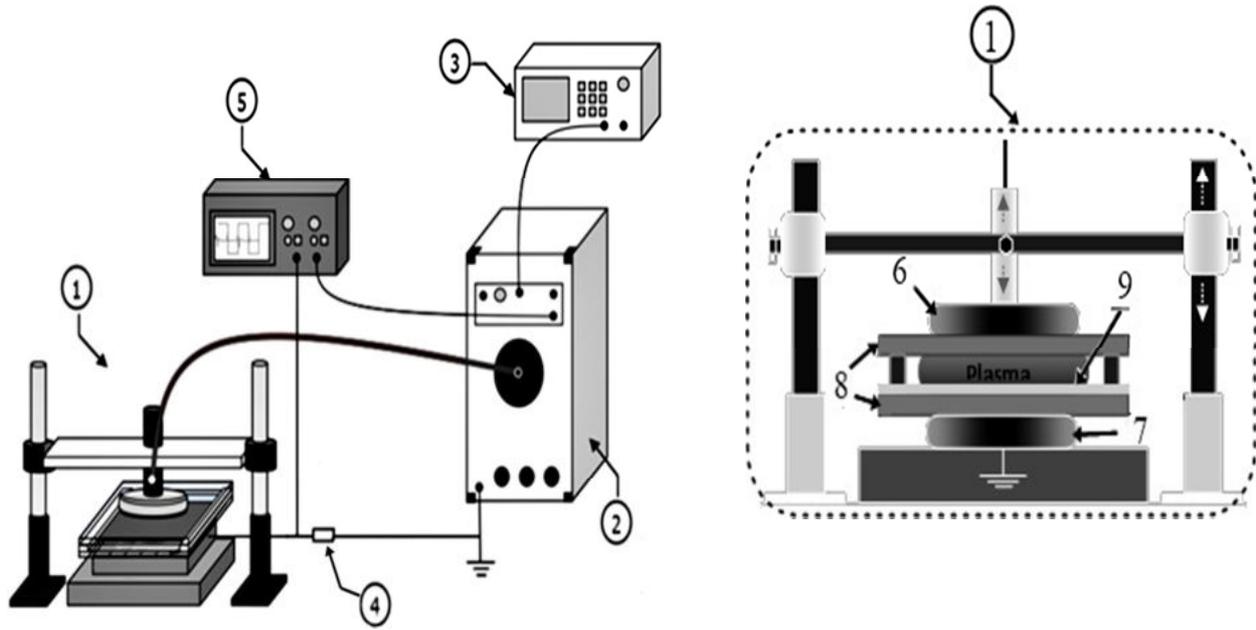


Figure II.10. Schématisation de l'installation expérimentale d'étude de la DBD : (1) cellule DBD; (2) amplificateur de puissance HT; (3) générateur de fonction; (4) résistance non inductive; (5) oscilloscope; (6) électrode active; (7) électrode mise à la terre; (8) barrière diélectrique (verre); (9) échantillon de polymère.

La cellule de DBD est composée de deux disques en aluminium arrondi qui font office d'électrodes, l'électrode de masse est fixée sur un socle isolant en PVC tandis que l'électrode active est montée sur un système coulissant permettant de régler la distance inter-électrodes et de faciliter les manœuvres. Le diélectrique est ainsi facile à manipuler. Pour notre étude, il est essentiel de relever les oscillogrammes tension – courant, pour cela nous avons utilisé un oscilloscope numérique à deux canaux pour l'acquisition des signaux, ce dernier est de marque LECROY, modèle Waveace 1001 avec un taux d'échantillonnage de 2 Giga échantillons / seconde, un temps de montée de 8.8 ns, un couple (sensibilité verticale - base de temps minimum) de 2 mV/div et 2.5 ns/div respectivement et une tension de catégorie de sécurité de 400V.

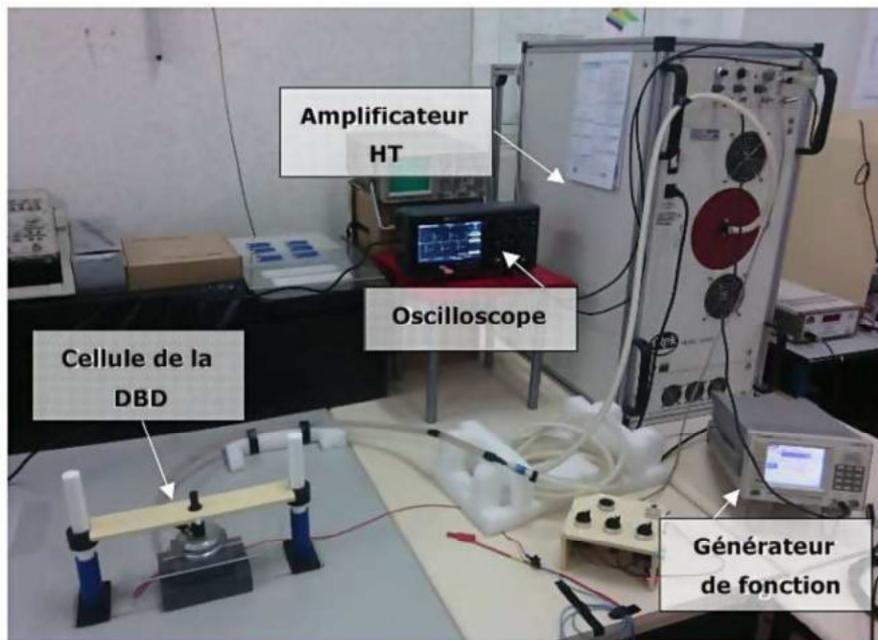


Figure II.11. Photographie de l'installation de traitement de surface par la DBD.

La tension électrique est mesurée à l'aide de la sonde intégrée de l'amplificateur haute tension, ce dernier possède une sortie du type BNC monitoring idéale pour la connexion avec la sonde de l'oscilloscope, le rapport de mesure est de 1/3000. Pour la mesure du courant électrique de la décharge, nous avons placé une résistance non inductive (référence MP820-100R-1%) entre l'électrode de masse et la terre. Cette dernière nous a permis de mesurer et de calculer le courant de la décharge en utilisant une simple sonde d'oscilloscope. La valeur de la résistance est de 100Ω , cette valeur a été choisie pour répondre à un compromis, c'est-à-dire pour ne pas altérer la valeur réelle du courant de la décharge mais aussi pour permettre la visualisation d'un signal assez élevé pour qu'il soit exploitable à l'aide de l'oscilloscope. Lors de la mesure, l'oscilloscope fournit les données sous forme de deux fichiers textes, l'un pour la tension et l'autre pour le courant. Grâce à ces deux derniers on peut tracer l'oscillogramme tension / courant en multipliant les données par les rapports de mesure à l'aide d'un simple tableur.

II.6 Les méthodes de mesure

La mesure des grandeurs électrostatiques occupe une place importante dans la caractérisation des matériaux diélectriques et la compréhension des phénomènes qui en résultent. La mesure du potentiel de surface, de la charge ou du champ électrique peut être réalisée par trois types d'instruments : sonde à induction (sonde capacitive), moulin à champ et sonde électrostatique à annulation du champ. Tous ces trois instruments sont basés sur le principe de l'induction électrostatique. Dans les paragraphes

suivants, nous présenterons les instruments et les méthodes de mesures utilisés pour la caractérisation des matériaux polymères étudiés.

II.6.1 Dispositifs de mesure de la charge électrique totale

La mesure de la charge électrique est un processus affecté par les conditions ambiantes et soumis à des nombreuses erreurs de manipulation. La cage de Faraday est le dispositif le plus utilisé pour la mesure de la charge électrique, grâce notamment à sa simplicité. Elle est constituée de deux récipients métalliques, l'un à l'intérieur de l'autre, séparé par un isolant. Le récipient extérieur est relié à la terre pour isoler le récipient intérieur des perturbations électriques présentes dans le milieu environnant. Le récipient intérieur est connecté à un électromètre et joue le rôle de capteur de charge. En effet, l'électromètre va indiquer la charge électrique des corps qui sont introduits à l'intérieur de ce deuxième récipient. Les mesures de la charge électrique globale des échantillons sont faites respectivement à l'aide d'une cage de Faraday, connecté à un électromètre de type Keithley, modèle 6514, comme montré sur la **Figure II. 12**. Cette méthode de mesure globale de la charge présente l'inconvénient de ne pas permettre la mesure de la distribution et du déclin de la charge électrique à la surface des isolants.

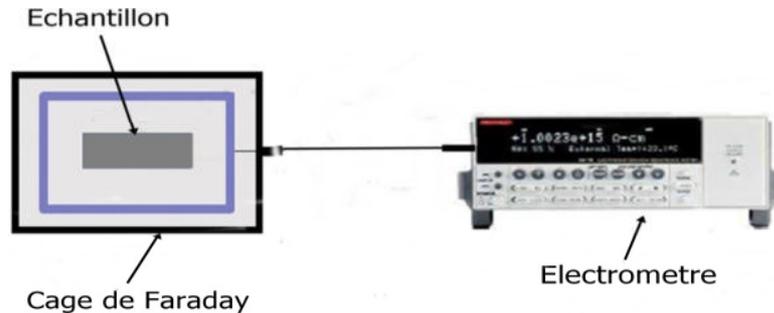


Figure II.12. Configuration expérimentale pour la mesure de charge électrique globale.

II.6.2 Mesures de déclin de potentiel de surface

Le principe de la technique de mesure de déclin de potentiel de surface consiste à déposer une charge électrique à la surface de l'isolant, soit par effet triboélectrique, par décharge couronne, ou par un faisceau d'électrons, puis on mesure l'évolution du potentiel électrique du surface chargé dans le temps par une sonde électrostatique. Les mesures de potentiel de surface sans contact sont essentielles dans le développement de la fabrication des électrets ainsi que des matériaux photosensibles utilisés dans les photocopieuses ou les imprimantes laser.

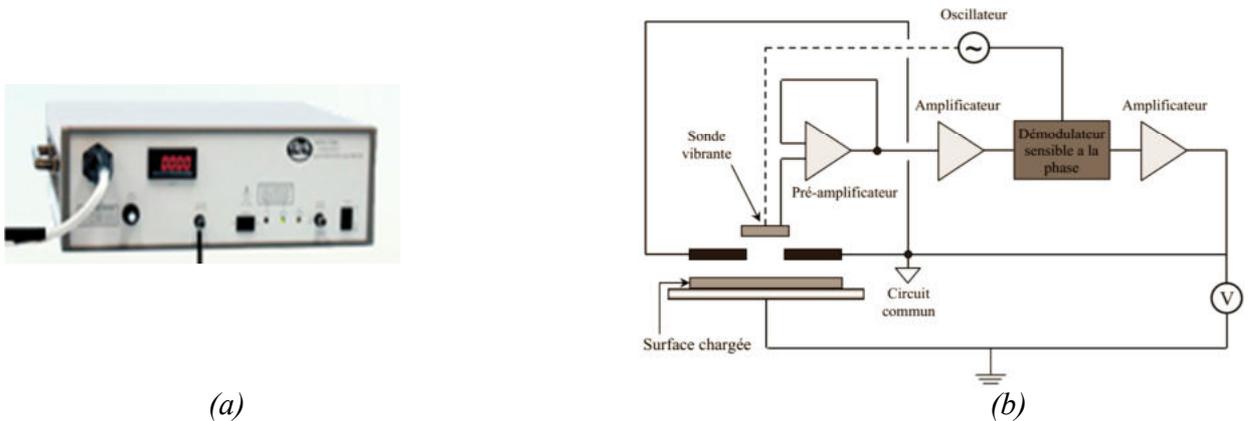


Figure II.13. Photographie (a) et principe (b) du voltmètre électrostatique [102].

La sonde reliée à un voltmètre électrostatique est l'instrument le plus populaire pour la mesure du potentiel électrique de surface. Le voltmètre électrostatique, nommé aussi « voltmètre sans contact » (**Figure II. 13.a** et **Figure II. 13.b**) a été largement utilisé pour la caractérisation des isolants chargés. Le principe de voltmètre électrostatique est basé sur l'annulation du champ électrique pour la mesure sans contact du potentiel. Cette méthode consiste à appliquer une tension externe sur la sonde ajustable jusqu'au moment où le potentiel de la sonde soit égale à celui de la surface chargée, ce qui entraîne l'annulation du champ et ainsi le courant induit. À ce moment, le potentiel de la sonde est égal au potentiel de la surface chargée. Dans notre étude le potentiel électrique de surface est mesuré sans contact avec l'échantillon en utilisant une sonde électrostatique (modèle 3450, TREK Inc.), reliée à un voltmètre électrostatique ± 10 kV (modèle 3450, TREK Inc.).

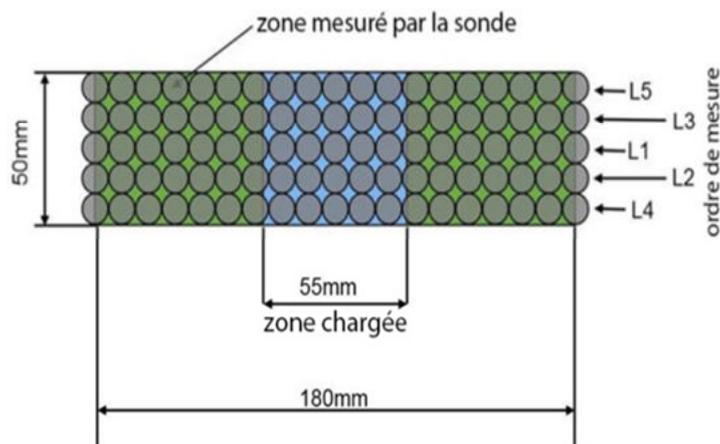


Figure II.14. Position de 95 points dans laquelle le potentiel électrique est mesuré.

À la fin du processus de chargement (triboélectrique ou par effet couronne), l'échantillon est placé sur une surface bien polie d'une électrode métallique en acier inoxydable mise à la terre; la cartographie du potentiel électrique à la surface est réalisée en effectuant des mesures en 95 points de la surface de l'échantillon, arrangés dans une matrice 5 x 19 comme illustré sur la **Figure II. 14**. La sonde électrostatique est située à une distance $h = 3$ mm au-dessus de la surface libre des échantillons. Pour les mesures de déclin de pénitentiel de surface, la sonde a réalisé des mesures à chaque point en mode stationnaire. La durée nécessaire pour effectuer une cartographie complète a été de 3 min. Chaque 5 min la sonde a effectué une nouvelle cartographie, afin de permettre l'étude du déclin dans le temps de potentiel électrique à la surface de l'éprouvette. Le mouvement relatif entre l'échantillon et la sonde pendant la mesure est fourni par un système X-Y de positionnement contrôlé par ordinateur. La lecture du potentiel est transférée à un instrument virtuel fait sur commande de LabView par la carte d'acquisition (**Figure II. 15**).

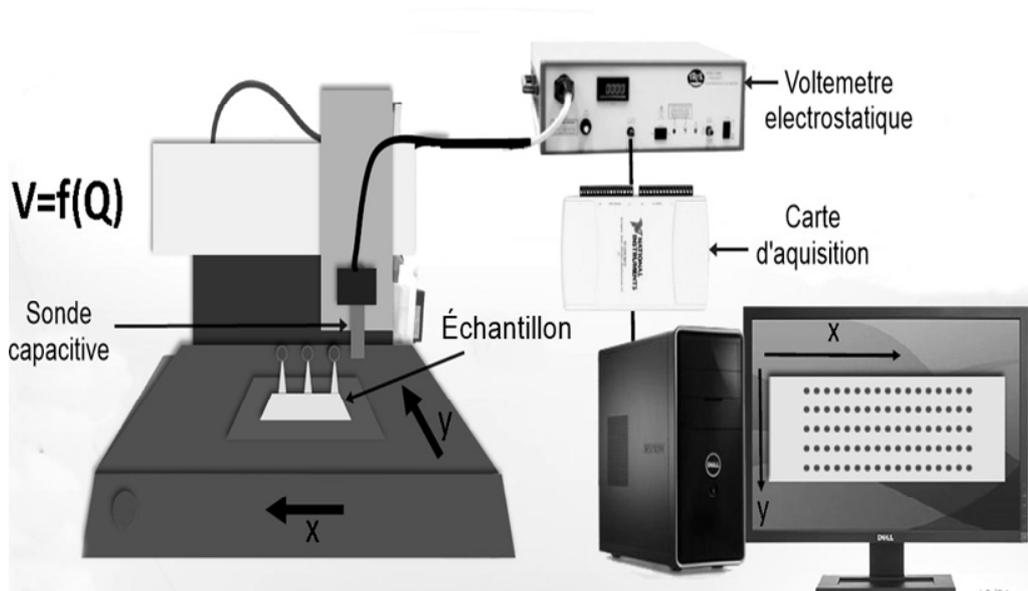


Figure II.15. Mesure de cartographie de potentiel.

II.6.3 Mesures de température de surface (thermique)

Le comportement tribologique des matériaux polymères dépend sensiblement de leur température de contact dynamique. La chaleur générée par le frottement aux surfaces de contact est partagée entre eux et détermine l'élévation de température correspondante qui doit être estimée pour fonctionner et concevoir l'engagement dans des conditions stables. Le comportement thermique sur la surface de l'éprouvette inférieure est scruté par le dispositif montré sur la **Figure II. 16.a**. Une caméra infrarouge

FLIR E60 est orientée perpendiculairement à la surface de l'éprouvette pour mesurer la température de surface des échantillons mis en contact. La plage de température va de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $650\text{ }^{\circ}\text{C}$ et la sensibilité thermique inférieure à $0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. La caméra infrarouge est fixée sur un support pour garder la même distance entre l'éprouvette et le système optique.



Figure II.16. Illustration de la mesure thermique (a) caméra infrarouge, (b) fenêtre du logiciel Flir Tools.

La **Figure II. 16.b** représente une fenêtre du logiciel Flir Tools pour les mesures thermiques, avec ce logiciel on peut tracer les cartographies de températures, il fournit plusieurs informations sur les températures après un frottement. L'instrument infrarouge est connecté à un ordinateur pour la visualisation en temps réel et l'enregistrement des données (**Figure II. 17**). Cette mesure permet d'obtenir une cartographie du champ de température. Un thermo-hygromètre est utilisé pour surveiller les conditions ambiantes pendant l'expérience.

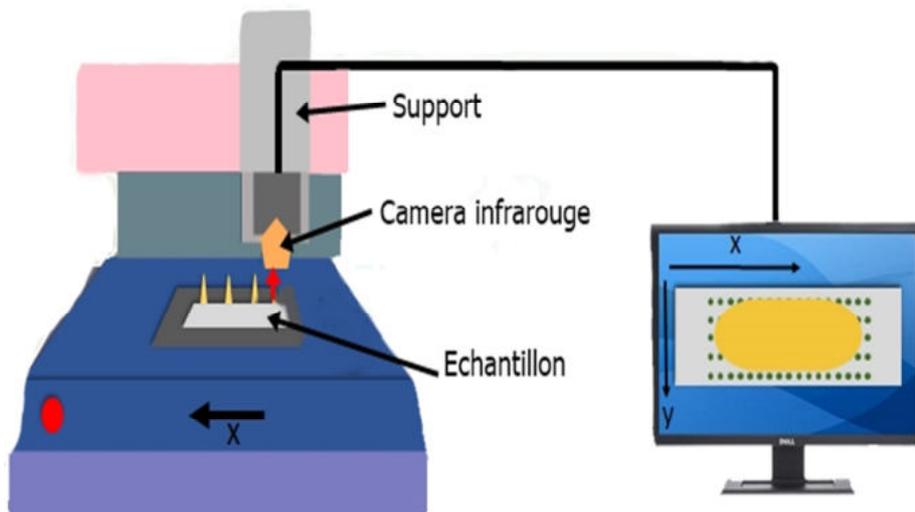


Figure II.17. Mesure de la température de surface.

II.6.4 Reproductibilité des mesures

La précision de réglage du dispositif expérimental conduit à une bonne répétabilité et à une dispersion négligeable des résultats. Afin d'évaluer la reproductibilité des mesures, nous avons effectué trois essais pour chaque expérience. Toutefois ce sont les valeurs moyennes qui ont été retenues durant nos analyses. Pour des essais réalisés avec la même méthode et dans les mêmes conditions atmosphériques, la dispersion des résultats obtenus a été donc suffisamment faible pour qu'elle n'affecte pas leur interprétation. Dans l'élaboration des échantillons lui-même il a été fait de manière soignée pour garder les mêmes surfaces techniques.

II.7 Conclusions

- Ce chapitre est consacré à la description des installations et de l'instrumentation nécessaire pour caractériser le comportement de la charge triboélectrique des plaques de polymères. Le chargement par contact glissant de divers matériaux peut être réalisé avec larges écarts des forces appliquées et des vitesses de déplacement.
- L'installation de traitement de surfaces par la décharge à barrières diélectrique (DBD) présente l'avantage de traiter sans contact les plaques de polymères.
- Plusieurs techniques de mesure ont été mises en œuvre pour évaluer les propriétés triboélectriques des plaques de polymères. La mesure du déclin de potentiel de surface (DPS) est une méthode simple et efficace pour la caractérisation des propriétés électrostatiques des matériaux isolants.

CHAPITRE III

**MODELISATION EXPERIMENTAL DU
PROCESSUS DE CHARGEMENT
TRIBOELECTRIQUE DES PLAQUES DE
POLYMERES**

Chapitre III Modélisation expérimental du processus de chargement triboélectrique des plaques de polymères

III.1 Introduction

La capacité des polymères à acquérir et à retenir des charges électrostatiques est une caractéristique importante lors de la conception des équipements tels que des séparateurs électrostatiques, des filtres à électret et des dispositifs de revêtement en poudre. La charge électrostatique générée par les matériaux polymères dépend de plusieurs paramètres tels que: la nature des matériaux, leur état de surface (rugosité), l'état chimique de surface et la température et l'humidité relative de l'air ambiant. Autres facteurs peuvent aussi influent sur la génération de charge, comme la nature du contact (charge statique ou frottement, contact ponctuel, linéique ou plan), la pression pendant le frottement, le temps de chargement et la vitesse de frottement. L'influence de certains facteurs sur le processus de charge triboélectrique des plaques polymères a fait l'objet de nombreuses études [103, 51 - 53], mais leurs effets d'interactions ont été moins étudiés. Certaines études ont été réalisées avec des dispositifs caractérisés par des contacts conformes entre les corps en mouvement de frottement [54].

III.2 Étude des facteurs influent sur le chargement triboélectrique

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux du processus de chargement triboélectrique lors de l'étude des trois classes de matériaux isolants: le PTFE (Poly-tétra-fluoro-éthylène), l'ABS (Acrylonitrile-Butadiène-Styrène) et le PVC (Poly-Vinyl-Chlorde). Les paramètres étudiés sont la nature de matériaux, la distribution de chargement mécanique, la force de contact appliquée, le nombre de cycle et la vitesse de frottement. Nous avons réalisé une modélisation du processus de chargement triboélectrique par la méthode de plan d'expériences dont le but est de quantifier les effets de certains facteurs, ainsi que les interactions entre eux par l'évaluation du potentiel électrique moyen et leur uniformité (par la mesure de l'écart-type de potentiel électrique). La **Figure III. 1** montre une représentation schématique du banc expérimental utilisé pour le chargement triboélectrique [104].

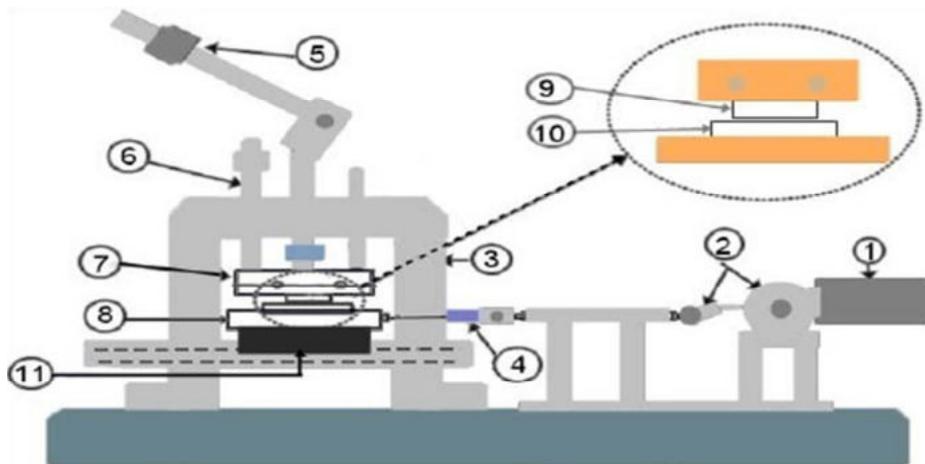


Figure III. 1. Représentation schématique du banc expérimental pour le chargement triboélectrique : (1) moteur électrique; (2) système bielle-manivelle; (3) support; (4) capteur de force normale; (5) système de contrôle de la force normale; (6) système de guidage vertical; (7) porte-échantillon supérieur; (8) porte-échantillon inférieur; (9) éprouvette supérieure; (10) éprouvette inférieure; (11) glissière à billes du guidage horizontal.

Pour évaluer l'effet des paramètres de frottement (pression de contact, nombre de cycles et la vitesse de frottement...etc.) sur le processus de chargement triboélectrique c.-à-d. la génération de la charge électrique après un frottement conforme entre deux matériaux, nous avons effectué plusieurs essais en considérant les conditions de charge. Pour minimiser les erreurs de mesure, nous avons calculé la valeur moyenne de trois mesures pour chaque point relevé. Nous avons relevé le potentiel électrique aux surfaces des plaques de polymère dans des conditions environnementales constantes, pour cela, nous avons maintenu l'humidité relative (RH) de l'atmosphère entre 40% et 48%, la température a été fixée à 25 ° C; la course du support inférieur qui porte l'échantillon a été réglée à 56 mm. Souvent, nous enregistrons sur certains échantillons une charge de surface résiduelle, pour éviter que cette charge fausse les résultats obtenus, tous les échantillons ont été nettoyés et neutralisés.

III.2.1 Effet de nature du matériau sur le chargement triboélectrique

Nous avons réalisé des essais sur la variation de la charge triboélectrique en fonction de la nature du matériau utilisé. Pour cela, nous avons utilisé trois matériaux différents : le PTFE, le PVC et l'ABS de dimensions 180 mm x 50 mm x 10 mm avec les combinaisons suivantes : PTFE/ABS, PTFE/PVC, PVC/ABS, PVC/PTFE, ABS/PTFE et ABS/PVC. Nous les avons soumis aux mêmes conditions de frottement : temps de frottement égal à 30 s, une force de contact de 6 N et une vitesse de frottement équivalente à 100 mm/s. (Les conditions ambiantes ont été assez stables : température $T = 25\text{ °C}$ et humidité relative $RH = 46\%$). Après le frottement, l'échantillon est placé dans un seau de faraday pour

mesurer la charge électrique global due au frottement. Chaque expérience a été répétée trois fois et la valeur moyenne de la charge globale est tracée dans le diagramme de la **Figure III. 2**.

Les résultats obtenus ont montré que le frottement induit une charge négative sur la surface du PTFE et le PVC, tandis que, ce frottement induit une charge positive sur l'ABS. Le niveau de charge le plus élevé est obtenu sur le PTFE en étant frotté contre l'ABS de l'ordre de -28,4 nC. De plus, l'amplitude de la charge générée après le frottement pour le PVC (contre l'ABS) et l'ABS (contre le PVC) est de l'ordre de -23,2 nC et 15,1 nC, respectivement. Nous avons relevé aussi que le niveau de la charge induite par le frottement de deux polymères est en fonction de leur position dans la série triboélectrique. Plus la distance entre les deux matériaux est longue dans la série triboélectrique, plus le niveau de la charge générée est élevé. Dans notre cas, la distance entre le PTFE et l'ABS est la plus longue, ce qui a induit la charge la plus élevée par rapport aux autres cas. On constate que le niveau de charge électrique induite dans le processus triboélectrique dépend fortement de la paire de matériaux mis en contact et leur position dans les séries triboélectriques.

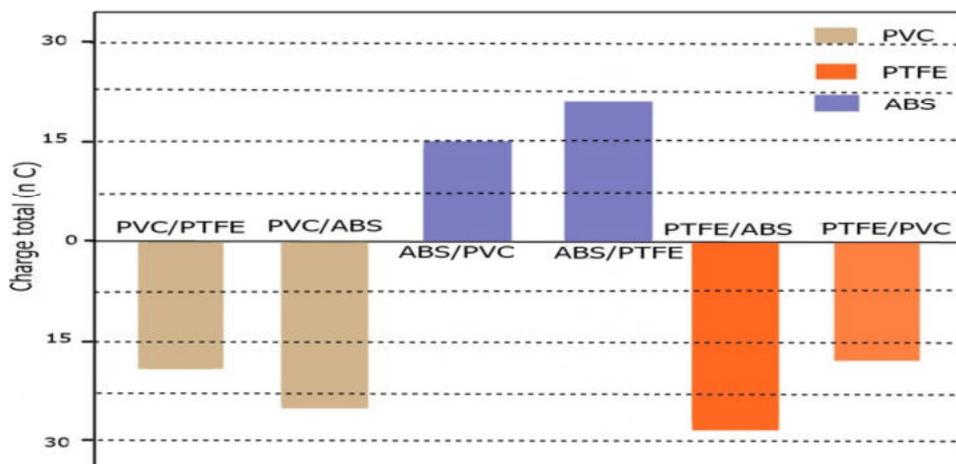


Figure III.2. Charge générée par effet triboélectrique pour divers types de matériaux.

III.2.2 Effet de la charge mécanique appliqué

Au cours de nos expériences, nous avons essayé d'étudier l'effet de la non-uniformité de la charge mécanique appliquée aux surfaces des échantillons en contact. Nous avons donc relevé la distribution de potentiel électrique sur la surface du PTFE frotté une première fois par un contact non-uniforme, et une deuxième fois par un contact uniforme. La cartographie de la **Figure III. 3 (a)** illustre la situation dans laquelle la charge est appliquée de manière non-uniforme entre deux échantillons. Il apparaît un frottement plus intense à un bord de l'échantillon de PTFE qu'à l'autre bord. Par conséquent, on peut émettre l'hypothèse que le potentiel électrique généré par la charge cumulée sur le bord plus chargé est

beaucoup plus élevé que sur l'autre bord. En cas de charge mécanique uniforme, la cartographie du potentiel électrique est également uniforme **Figure III. 3 (b)**.

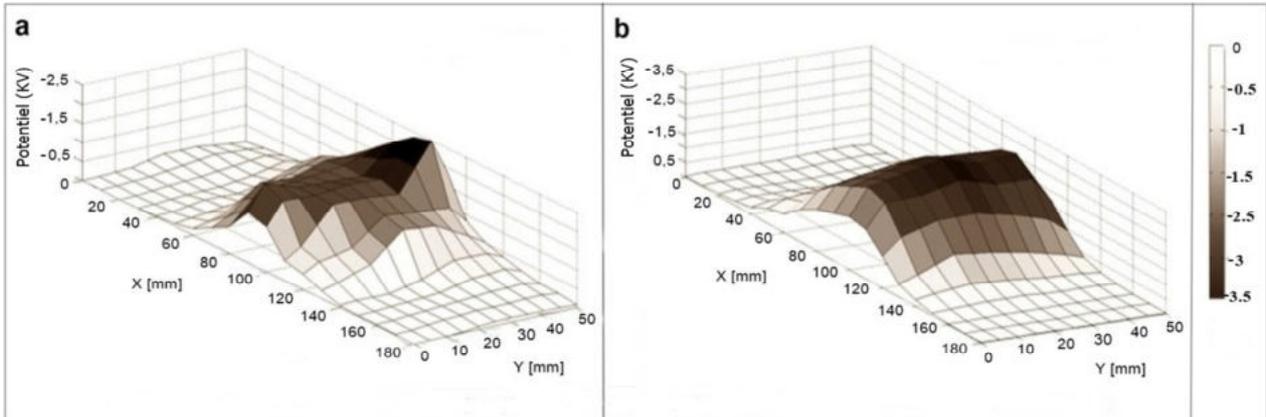


Figure III.3. Cartographie du potentiel électrique à la surface d'un échantillon de PTFE: (a) non uniforme contre ABS; (b) uniforme contre ABS: Force de contact: 4 N; vitesse de glissement: 25 mm / s; cycles de contact = 80.

III.3 Modélisation du processus de chargement triboélectrique des plaques de PTFE

Le chargement triboélectrique des plaques de polymères dépend de plusieurs paramètres tels que : la force normale, la vitesse de glissement, la rugosité des surfaces, le nombre de cycles, la température, l'humidité, la structure et la composition chimiques. Il s'agit donc d'un processus multi-factoriel avec plusieurs variables de contrôle. Lors d'études expérimentales multiparamétriques, le nombre de variables peut être élevé. Les stratégies couramment employées pour mener à bien ces expérimentations sont souvent informelles, parfois un peu inutile, et elles peuvent conduire à un nombre de résultats difficile à exploiter. Pour optimiser l'organisation des expériences et exploiter efficacement les résultats obtenus, la méthodologie de plans d'expérience a été utilisée pour étudier le processus de chargement triboélectrique. Les plans d'expériences relèvent d'une démarche qui consiste à mettre en évidence et quantifier les effets, et les interactions entre les facteurs influents d'un processus. La méthode est peu coûteuse en expériences à réaliser et permet de fixer les facteurs aux valeurs les plus favorables à la réponse ciblée. La méthode de plan d'expériences permet de prescrire le nombre d'expériences à accomplir en fonction d'un objectif bien défini, d'étudier plusieurs facteurs simultanément, de réduire la dispersion liée à la mesure et d'apprécier les effets de couplage entre facteurs [105]. Cette méthode s'appuie sur des règles statistiques et analytiques pour modéliser le procédé étudié, afin de réduire et de contrôler au maximum le temps d'expérimentation et détecter les points expérimentaux de mesure douteux.

Dans le cas du présent travail, l'objectif est de modéliser le processus de chargement triboélectrique. Le modèle mathématique du premier degré prend la forme suivante :

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots a_{i\dots k} x_i \dots x_k \quad \text{III.1}$$

Dans le cas d'un plan d'expériences à deux facteurs, la formule est la suivante :

$$Y = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_{12} x_1 x_2 \quad \text{III.2}$$

Où a_0 : est la valeur prédite de la réponse au centre de domaine expérimental, a_i : l'effet de facteur x_i , a_{ij} : l'interaction entre le facteur x_i et x_j Ces coefficients peuvent être calculés à partir des données expérimentales du plan d'expériences complet en utilisant le logiciel MODDE 8.0 (*MODeling and DEsign*) [105, 106]. Les calculs statistiques permettent de savoir si les effets sont significatifs, de calculer les intervalles de confiance et de valider la linéarité du modèle. Ils font intervenir d'une part les résidus e_i , c'est-à-dire la différence entre la valeur expérimentale et la valeur prédite par le modèle, et d'autre part un estimateur donné par :

$$s^2 = \frac{1}{n-p} \sum e_i^2 \quad \text{III.3}$$

Où n est le nombre d'expériences réalisées, p est le nombre de coefficients du modèle. La signification des effets est évaluée avec le test « t » de Student.

Pour cette étude nous avons considéré trois variables: la force de contact, le temps de charge et la fréquence des mouvements de va-et-vient. Le potentiel électrique est en fonction de ces trois variables. Les domaines de variations des trois facteurs ont été établis comme suit:

- Force de contact (F): 2 - 10 N; dans cette plage, un bon contact s'établit entre les deux surfaces, ce qui conduit à un potentiel électrique mesurable sans risque de bloquer le mouvement entre les deux échantillons.
- Temps de charge (T): 10 - 290 s, les surfaces de polymères sont soumises à une durée de frottement différente, à une courte durée ou à de longues durées, nous avons choisi deux temps de charge de 10 s et 290 s, ce qui représente un frottement simple et multiple.
- Fréquence du mouvement de glissement (f): 0,5 - 1,5 Hz, la limite inférieure étant fixée par les caractéristiques cinématiques du banc expérimental. La fréquence de 1 Hz représente la valeur centrale. Les deux autres niveaux de vitesse 0,5 Hz et 1,5 Hz ont été sélectionnés pour représenter des niveaux de fréquence faibles et élevés.

Toutes ces variables étaient facilement ajustables dans les conditions de laboratoire. Nous pouvons modifier toute gamme de paramètres de fonctionnement (force de contact, fréquence et temps de chargement) par de simples modifications. Il est nécessaire de trouver les conditions initiales en termes de réglage mécanique du dispositif expérimental pour assurer une répartition uniforme de la force à travers la zone de contact entre les deux échantillons. En outre, il est important d'éliminer toutes les charges résiduelles en utilisant le neutralisateur antistatique pour une durée de neutralisation de 30 secondes. Cette phase a été répétée jusqu'à ce que le potentiel électrique (valeur maximale) de la surface soit significativement plus petit par rapport aux potentiels de surfaces chargés par effet triboélectrique.

Pour chaque essai, nous avons utilisé un nouvel échantillon. Nous avons déterminé la moyenne et l'écart-type du potentiel électrique à partir de 25 points mesurés de la zone chargée. Une fois ces points sélectionnés et considérés comme réponse pour notre étude afin d'évaluer les potentiels générés après le frottement et leurs uniformités, nous avons réalisé une analyse avec le logiciel MODDE 8.0.

La **Figure III. 4** représente deux exemples de cartographies de potentiel électrique à la surface d'échantillons de PTFE après frottement contre l'ABS. Les résultats montrent que ce frottement génère une charge négative sur la surface de PTFE et une charge positive sur la surface d'ABS. Le PTFE est un matériau hydrophobe, sa charge négative peut être attribuée à l'électronégativité des atomes de fluor présents dans sa structure. L'affinité électronique fait que les atomes de fluor (F) sont chargés négativement et on s'attend à ce qu'ils aient des forces intramoléculaires et intermoléculaires plus élevées.

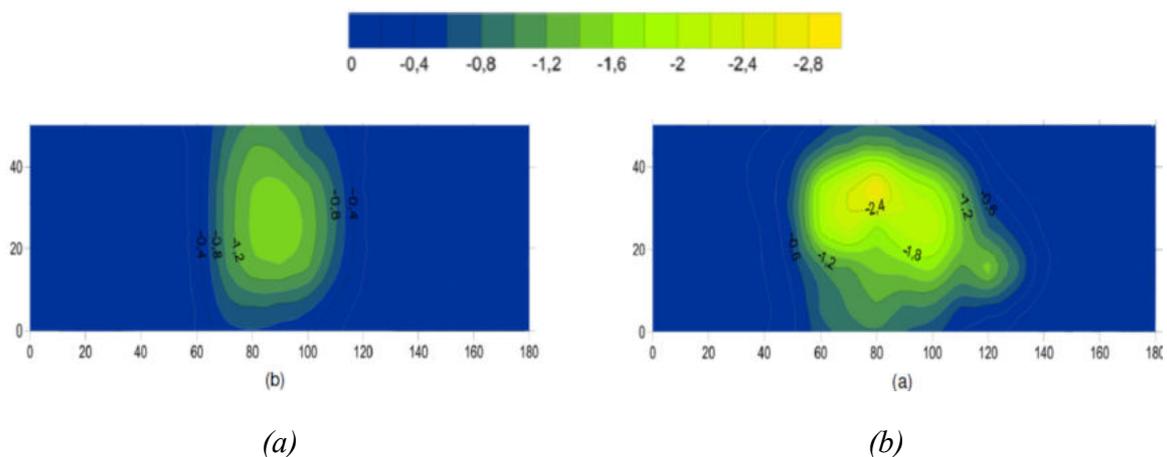


Figure III.4. Cartographie du potentiel électrique à la surface de l'échantillon de PTFE: (a): force de contact: 2 N, fréquence: 1 Hz, temps de charge: 10 s, (b): force de contact: 6 N, fréquence: 1 Hz, temps de charge: 150 s.

On s’aperçoit à partir de ces mesures, que l’état de la surface nous permet d’obtenir une bonne reproductibilité des résultats. Cette information importante est très utile pour l’étude du comportement des échantillons chargés par effet triboélectrique. Le problème de reproductibilité est d’ailleurs le principal inconvénient relaté par les normes en ce qui concerne les tests triboélectriques. Les valeurs moyennes et l'écart-type des potentiels électriques indiqués dans le **Tableau III. 1** pour les 11 essais de modélisation expérimentale par la méthode de plan d’expérience. Les valeurs des lignes 9 à 11 du **Tableau III. 1**, obtenues dans des conditions expérimentales similaires, montrent qu’il était possible d’obtenir une bonne répétabilité des résultats.

Tableau III. 1 : Les valeurs moyennes et l'écart-type des potentiels électriques pour les 11 essais de plan d’expérience.

Run N0	Facteurs			Reponses	
	Force F [N]	Temps T [s]	Fréquence f [Hz]	V (moy) [V]	V (E-type) [V]
1	2	10	0,5	-136,8	108,3
2	10	10	0,5	-1149,9	924,4
3	2	290	0,5	-676,6	523,3
4	10	290	0,5	-1857,5	823,5
5	2	10	1,5	-456,5	127,04
6	10	10	1,5	-718,9	599,4
7	2	290	1,5	-685,1	521,4
8	10	290	1,5	-1299,7	663,1
9	6	150	1	-800,1	524,05
10	6	150	1	-949,4	564,9
11	6	150	1	-868,3	595,4

Sur la base des données expérimentales de **Tableau III. 1**, les modèles linéaires proposés par le logiciel MODDE 8.0 sont :

$$V_{moy} = - 876.9 - 383.9 F - 257.1 T + 82.6 f - 65.0 FT + 164.6 Ff + 54.8 Tf \tag{III.4}$$

$$V_{E-type} = 543.2 + 216.3 F + 96.5T - 58.6 f - 105.8 FT - 62.8 Ff + 18.0 Tf \tag{III.5}$$

L'analyse statistique des données a montré que les effets de tous les facteurs sont significatifs (**Figure III. 5**), à l'exception de l'interaction temps de charge et fréquence (*Tf*). La qualité descriptive et prédictive des deux modèles est exprimée par les coefficients statistiques R² (qualité de l'ajustement) et Q² (qualité de la prédiction), respectivement. Les coefficients R² pour les deux modèles sont proches de

1 (0,992 et 0,996 respectivement). Les coefficients Q^2 qui évaluent la qualité prédictive des modèles sont également satisfaisants: 0,908, pour la valeur moyenne, et 0,690 pour l'écart-type. Par ailleurs, à partir des modèles mathématiques obtenus, on peut également déterminer l'influence de chaque facteur sur les réponses en traçant la variation des réponses en fonction des facteurs.

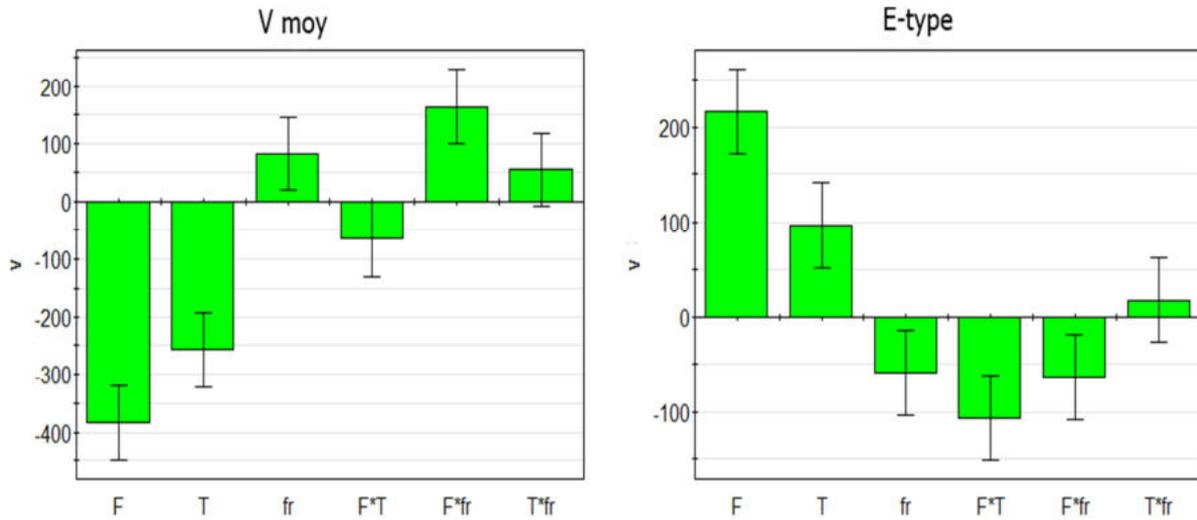


Figure III.5. Les coefficients des modèles mathématiques.

À partir des modèles mathématiques obtenus, on peut également déterminer l'influence de chaque facteur (force de contact, temps de charge et fréquence des mouvements) sur les réponses en traçant la variation des réponses en fonction des facteurs. La **Figure III. 6** montre les courbes de prédiction de potentiel moyen et l'écart-type du potentiel. Il est observé que le potentiel moyen généré augmente significativement à la fois avec la force de contact (F) et le temps de charge (T), mais il diminue avec la fréquence (f) des mouvements de va-et-vient. Les courbes de contour de réponse sur la **Figure III.7** soulignent les effets de chaque facteur et les interactions entre eux sur les réponses. La **Figure III.7.a** et la **Figure III.7.b** montrent les effets de la force normale (F) et du temps de charge (T), à une fréquence $f=1$ Hz. Il est observé que le potentiel moyen atteint un maximum après un temps de charge 290 s et une force normale de 10 N. La **Figure III.7.c** et la **Figure III.7.d** illustrent les effets de la force normale (F) et de la fréquence (f), au temps de charge $T = 150$ s. on peut voir que le potentiel moyen atteint un maximum avec une fréquence du mouvement de glissement de 0,5 Hz et une force normale de 10 N. Ces courbes montrent que le potentiel électrique moyen (V_{moy}) est proportionnel à la force de contact (F) et le temps de charge (T). La fréquence a un effet inverse sur le potentiel électrique moyen (une légère diminution de l'amplitude du potentiel de surface). L'interaction entre la force normale et le temps de charge (FT) est significatif pour les deux réponses; l'effet du temps de charge

est plus fort à des valeurs plus élevées de la force de contact, on remarque que, lorsque la pression de contact est faible, un temps de charge plus long est nécessaire pour atteindre des niveaux de charge plus élevés. L'interaction force normale et fréquence (Ff) est aussi significatif dans le cas de potentiel électrique moyen. La **Figure III. 7.c** montre une augmentation rapide du potentiel électrique sous une forte force de frottement et une faible fréquence du mouvement de glissement.

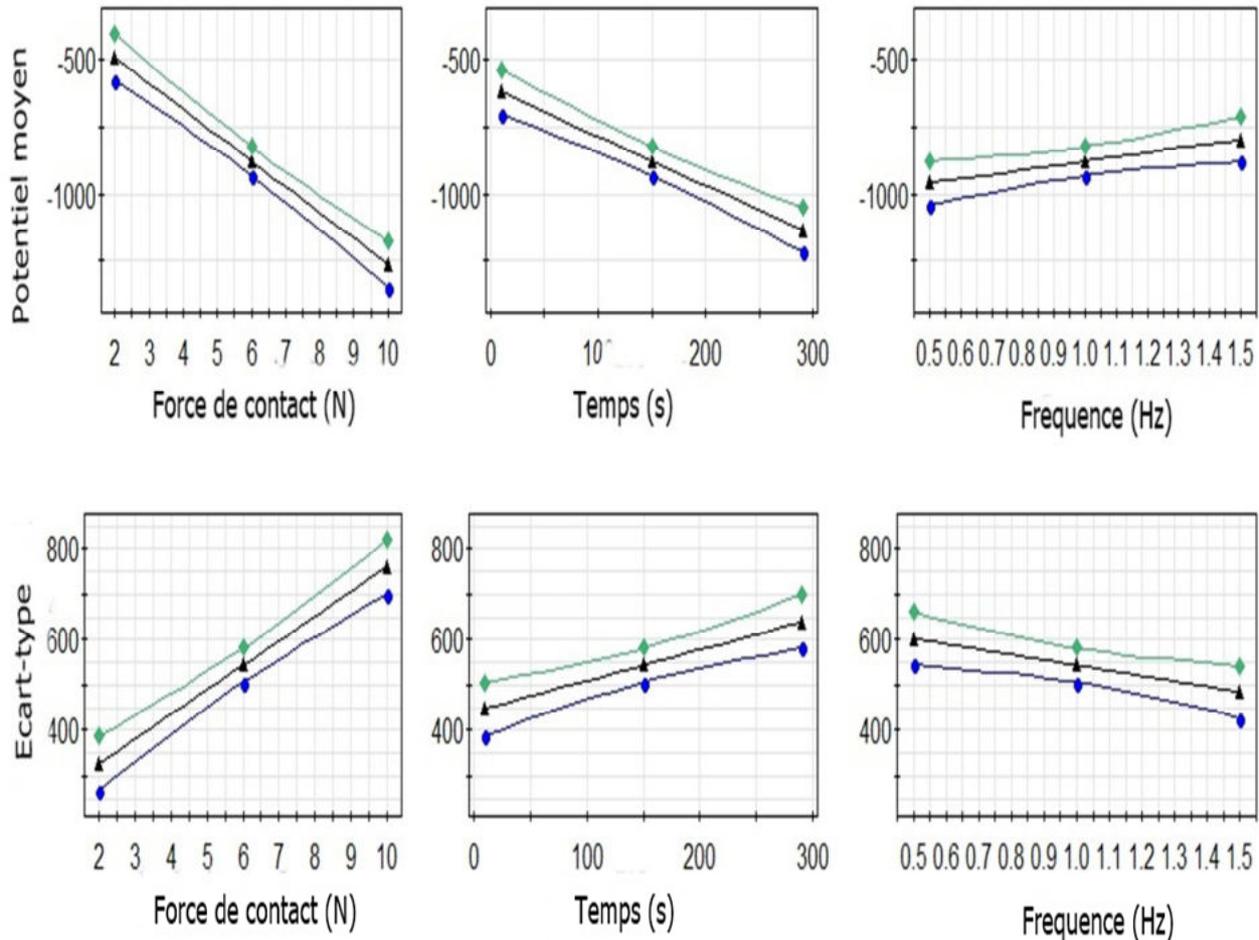


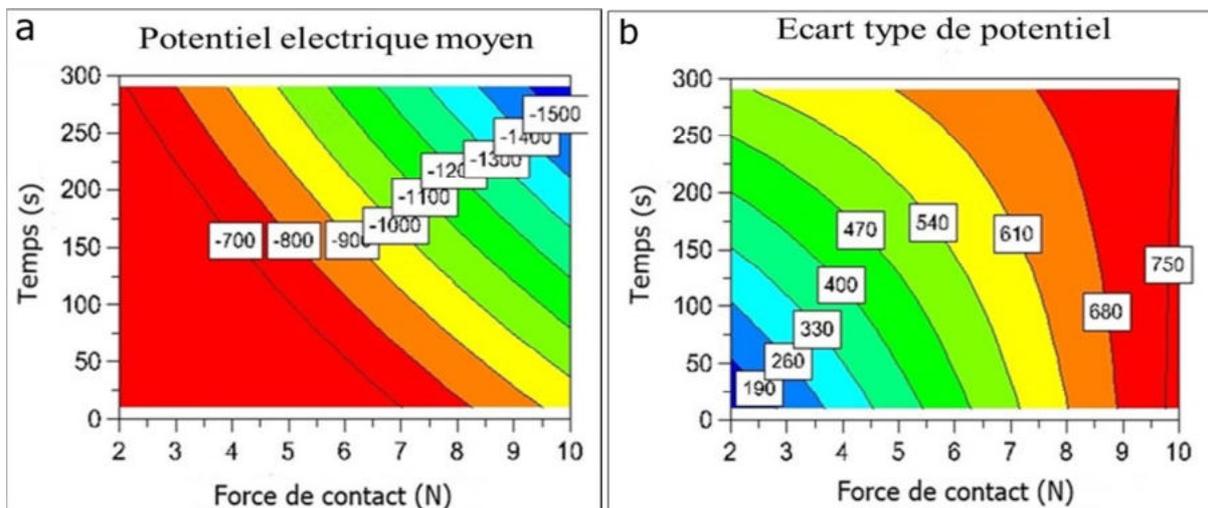
Figure III.6. Variation prévisible du potentiel triboélectrique en fonction: la force de contact (F), le temps de chargement (T) et la fréquence (f).

L'augmentation du potentiel électrique avec la force de contact peut s'expliquer par les interactions plus fortes entre les aspérités. À faibles forces de contact, l'interaction entre les aspérités est faible, et les charges générées ne sont pas élevées, d'autre part, lorsque la force de contact est plus élevée, l'interaction devient plus importante, ce qui provoque la déformation des matériaux et intensifie la dissipation de l'énergie et le transfert de charge entre les corps en contact [104, 107, 42]. L'augmentation du potentiel électrique avec le temps de contacts peut être provoquée par

l'augmentation de la surface de contact réelle, qui est liée à la déformation viscoélastique des surfaces de polymère, la surface de contact réelle peut être estimée à partir de la distribution de tension enregistrée après le frottement; cette zone dépend des conditions de charge [107, 108].

La diminution du potentiel généré à la surface du PTFE avec l'augmentation de la fréquence du mouvement de va-et-vient (de l'ordre de 0,5 à 1,5 Hz) est très probablement associée au temps plus court entre les deux surfaces en contact. La température a un effet important dans les essais tribologiques de frottement polymère-polymère, où la chaleur due au frottement développée à partir de la fréquence élevée ou de la force de contact élevée a tendance à changer les caractéristiques triboélectriques. Pour des fréquences élevées, les polymères sont rapidement chauffés, ce qui peut affecter la génération de charge triboélectrique à la surface du PTFE, comme effet de la diffusion thermique des électrons due à un gradient de température [45]. Aux basses fréquences, lorsque cet effet thermique est plus faible et que les deux surfaces sont en contact plus longtemps, l'effet de la force de contact est plus fort.

L'écart-type du potentiel de surface qui caractérise la non-uniformité de la distribution de potentiel électrique augmente avec la force de contact, mais la fréquence des mouvements de va-et-vient et le temps de charge ont un effet limité. Il est observé que l'écart-type (E_{type}) est minimal lorsque la force de contact (F) et le temps de charge (T) sont faibles. L'uniformité de potentiel électrique augmente après une fréquence supérieure à 1 Hz. L'augmentation de l'écart-type est corrélée avec celle de la valeur moyenne du potentiel de surface. En outre, le logiciel MODDE 8.0 offre la possibilité de trouver les valeurs du point de fonctionnement optimal. Ainsi, le niveau le plus élevé du potentiel généré par l'effet triboélectrique correspond aux valeurs optimales suivantes : $F= 10 \text{ N}$; $T = 290 \text{ s}$; $fr = 0,5 \text{ Hz}$.



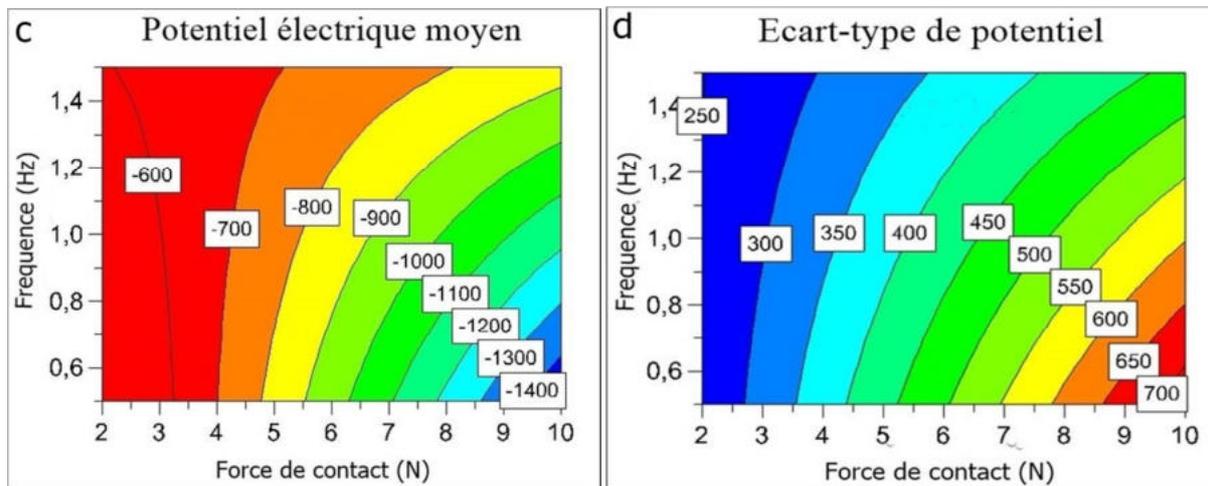


Figure III.7. Courbes d'iso-réponse prédites par MODDE 8.0, pour le potentiel triboélectrique moyen (ac) et l'écart type de potentiel (bd) en fonctions: la force de contact, le temps de charge et la fréquence.

III.4 Comparaison entre le comportement triboélectrique des polymères

Une étude comparative entre différentes combinaisons de matériaux a été réalisé pour comprendre leur comportement triboélectrique: PTFE / ABS, PVC / ABS et ABS / PVC. Les valeurs moyennes des potentiels électriques générés sur les surfaces de PTFE, PVC et ABS sous différentes nombre de cycles, forces de contact et fréquences de frottement sont représentées sur la **Figure III. 8**, **Figure III. 9** et **Figure III. 10**. Les tests ont montré que les niveaux de potentiels électriques atteints étaient fortement dépendants de la force exercée sur l'échantillon lors du frottement. Le potentiel électrique sur les surfaces PTFE, PVC et ABS augmente avec l'augmentation de la force de contact de 2 N à 14 N.

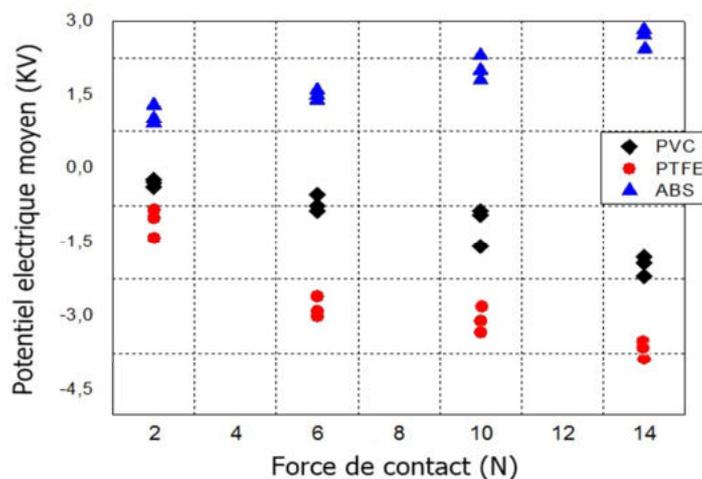


Figure III.8. Effet de la force de contact sur le potentiel électrique moyen généré sur les surfaces de polymères après 130 cycles (fréquence: 1 Hz).

L'augmentation du potentiel électrique de l'ordre de -2,8 kV pour le PTFE, -1,8 kV pour le PVC et 2 kV pour l'ABS attribué à l'activation thermique liée à l'énergie dissipée dans le frottement entre les échantillons. De plus, plus de segments chimiques pourraient être cassés sous une force de contact élevée, ce qui fournirait plus d'électrons ou d'ions pour contribuer au transfert de charge, favorisant ainsi la génération de charge. La différence de cette génération de charge peut s'expliquer au moins en partie par les propriétés de déformation de ces matériaux.

Une attention particulière devrait être accordée à l'effet de la fréquence du mouvement de glissement. Ainsi, il a été constaté que le potentiel généré à la surface de PTFE et de PVC diminue à mesure que la fréquence augmente de l'ordre de -0,65 kV pour le PTFE et -0,3 kV pour le PVC (une légère diminution pour le PVC). Cette diminution peut s'expliquer par l'effet thermique dû à la température générée après le frottement, cet effet est moins important dans le cas de l'ABS. La diminution du potentiel généré à la surface des matériaux avec l'augmentation de la fréquence du mouvement de va-et-vient (de l'ordre de 0,5 à 1,5 Hz) est probablement liée à la plus courte durée de contact entre les deux surfaces.

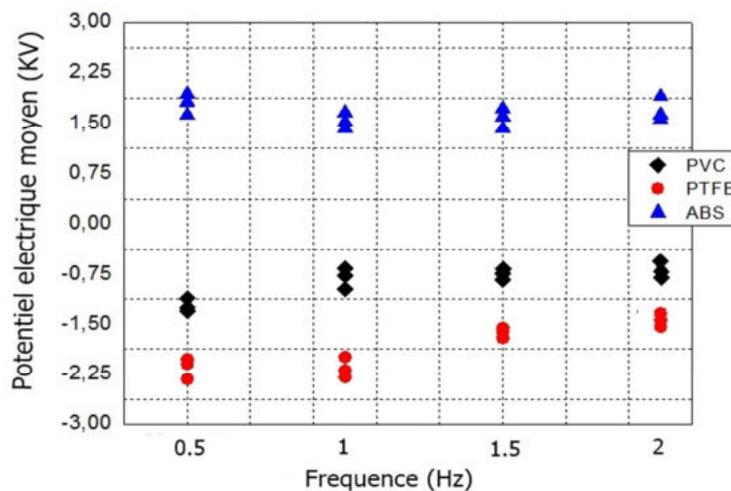


Figure III.9. Effet de la fréquence sur le potentiel électrique moyen généré sur les surfaces polymères après les 130 cycles (force de contact 10 N).

Comme ces matériaux sont viscoélastiques, leur déformation dépend fortement du temps et de la température. Sous une force constante, la zone de contact du polymère augmente progressivement avec le temps, ce qui a été défini comme le fluage des polymères [107]. Le nombre de cycles (temps de charge) a un effet significatif sur le processus de charge triboélectrique. Nous avons enregistré la variation du potentiel électrique moyen en fonction du nombre de cycles dans la plage de 10 - 130 cycles. En effet, on constate que le potentiel électrique générée à la surface de l'échantillon est plus

important pour un temps de frottement plus long pour les trois matériaux étudiés (PTFE, PVC et l'ABS). Les potentiels électriques ont tendance à atteindre la valeur saturée après un certain nombre de cycles. Les travaux de *Lowell* et *Rose-Innes* ont expliqué l'augmentation de la charge due au frottement par l'augmentation de la surface de contact réelle, qui est liée à la déformation viscoélastique des surfaces de polymère produite par des contacts répétés [35].

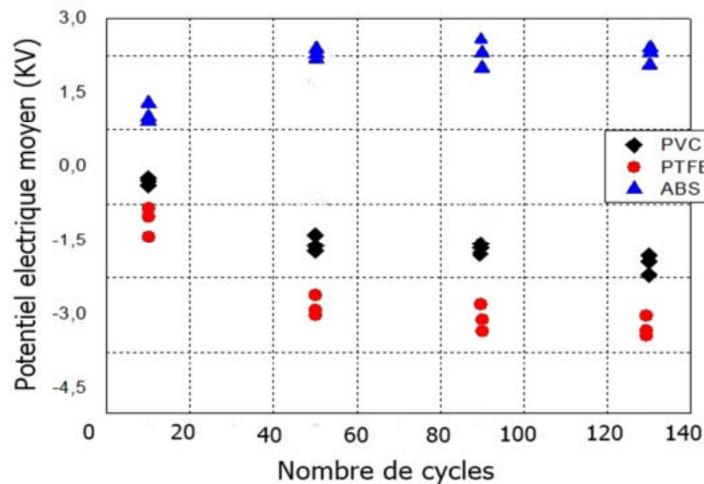


Figure III.10. Effet du nombre de cycles sur le potentiel électrique généré sur les surfaces polymères (force de contact 10 N, fréquence: 1 Hz).

III.5 Conclusion

- Le processus de chargement triboélectrique dépend de plusieurs facteurs tels que : la nature des matériaux, la force normale de contact, le temps de chargement et la fréquence du mouvement de glissement. L'utilisation de la méthode de plan d'expériences peut mieux prédire le processus de chargement triboélectrique.
- La nature de matériau et leur position dans la série tribo-électrique changent le niveau de charge électrique induite dans le processus triboélectrique des plaques de polymères.
- La force de contact a un effet important sur le chargement triboélectrique des matériaux polymères. Il est montré que le potentiel électrique dû au contact glissant augmente à mesure que la force de contact augmente. Le processus de charge triboélectrique dépend de la durée du temps de charge. Les résultats de l'effet de la fréquence du mouvement de glissement n'étaient pas évidents pour les trois matériaux dans un mouvement de frottement lent.

CHAPITRE IV

**GENERATION ET DISSIPATION DES
POTENTIELS ELECTRIQUES AUX
INTERFACES POLYMERIQUES**

Chapitre IV Génération et dissipation des potentiels électriques aux interfaces polymériques

L'objectif de ce chapitre est de caractériser la génération et l'évolution des charges électriques des plaques de polymères en termes d'uniformité et de stabilité dans le temps. Dans la première partie, une comparaison est faite entre la charge de surface générée par effet triboélectrique et celle déposée par décharge couronne, en utilisant la technique de déclin de potentiel de surface pour évaluer la dynamique de la charge électrique. L'effet de la force normale, de la vitesse de glissement et de nombre de cycles de frottement sur la répartition de potentiel électrique et le champ de température à la surface des échantillons a été étudié dans la deuxième partie.

IV.1. Comparaison entre les charges générées par effet triboélectrique et par effet couronne

Une quantité considérable d'électricité statique peut être générée chaque fois que des plaques des polymères frottent sur un autre solide. Elle constitue d'une contrainte électrique et un souci permanent chez tous les industriels. La génération (polarité et l'amplitude), la distribution et la dissipation des potentiels générés lors du chargement triboélectrique entre les matériaux polymères sont influencées par plusieurs paramètres de fonctionnements (la nature des matériaux, la rugosité de surface et la pression de contact) et aussi par les conditions ambiantes. Les charges statiques sont cumulatives dans le temps et peuvent contribuer des conséquences économiques indésirables et présenter des risques pour la vie humaine. La mesure du déclin de potentiel de surface (DPS) est une étape importante pour comprendre l'évolution des charges électrostatiques aux interfaces, qui nous informe sur le temps nécessaire d'évacuation de la charge [109, 110, 74]. Dans ce premier sous chapitre, nous nous intéressons à l'étude de l'évolution du potentiel de surface sur des plaques de polymères (PTFE, PVC et ABS) chargés par effet triboélectrique et par la décharge couronne. Nous avons réalisé une comparaison entre deux mécanismes de chargement et montré les cartographies de potentiel et les courbes de déclin. Nous avons déterminé les paramètres qui contrôlent le processus du déclin de potentiel.

IV. 1 1 Méthodologie

Deux systèmes de chargement ont été utilisés pour la génération de la charge électrique sur les plaques de PTFE, PVC et l'ABS; un tribomètre linéaire pour le chargement par effet triboélectrique (**Figure II.7**) et un système de chargement par effet couronne (**Figure II.9**). Nous avons réalisé une série d'expériences sur des plaques de polymères de dimension de 15 mm x 100 mm pour les échantillons supérieurs (**Figure II.5**, Epreuve 3) et 50 mm x 180 mm pour les échantillons inférieurs (**Figure II.5**, Epreuve 1). Les conditions de chargement par effet triboélectrique sont les suivants : une force normale $F_N = 10$ N, une vitesse de glissement relatif entre éprouvettes : $v = 50$ mm/s, une amplitude de déplacement: $s = 56$ mm, et pour plusieurs cycles de frottement. Pour les expériences de chargement par effet couronne, nous avons utilisé une configuration triode, avec différentes valeurs du potentiel électrique de l'électrode grille. Les échantillons ont été couverts par une plaque métallique pour permettre le chargement juste sur une zone équivalente à celle du chargement triboélectrique. La cartographie de potentiel de surface a été effectuée avec une sonde connectée à un voltmètre électrostatique (mesure sans contact). Pour les mesures de déclin de potentiel de surface, les échantillons ont été chargés par effet triboélectrique et par décharge couronne, comme expliqué précédemment, puis déplacés vers le poste de mesure. L'échantillon a été scanné plusieurs fois après leur chargement en vue d'obtenir la cartographie du potentiel. La **Figure IV. 1** montre la répartition des points de mesures pour réaliser la cartographie du potentiel électrique à la surface des échantillons et de son déclin. Les expériences de chargement par effet triboélectrique et par effet couronne ont été effectuées dans des conditions bien définies de température ambiante ($T = 21,7$ °C - $22,4$ °C) et d'humidité relative ($RH = 44$ % - 48 %). La charge résiduelle sur la surface des éprouvettes a été neutralisée avec le générateur d'ions bipolaires.

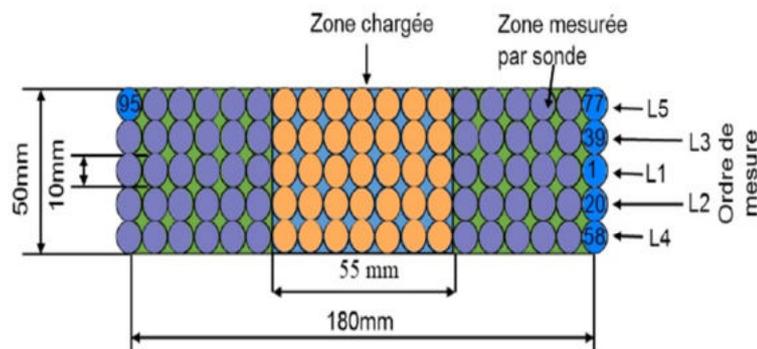


Figure IV.1. Répartition des points de mesures pour réaliser la cartographie du potentiel électrique à la surface des échantillons de PTFE, PVC et d'ABS.

IV.1 2 Résultats et Analyse

La **Figure IV. 2 (a, b et c)** représentent les cartographies de la répartition du potentiel électrique de surface généré par effet triboélectrique sur des échantillons de PTFE, PVC frottés contre l'ABS et de l'ABS frotté contre le PVC. Les résultats montrent que le chargement par effet triboélectrique est non homogène, caractérisé par une distribution aléatoire d'une cartographie à l'autre. Les valeurs les plus élevées du potentiel généré ont été obtenues dans la zone centrale des éprouvettes. Les polarités obtenues sur le PTFE, le PVC frottés contre l'ABS, et de l'ABS contre le PVC est en conformité avec la série triboélectrique (une charge positive sur la surface de l'ABS et une charge négative sur celles du PTFE et le PVC). La **Figure IV.3 (a, b et c)** illustrent les cartographies de la répartition du potentiel électrique des éprouvettes chargées par effet couronne en polarité négative (et positive pour l'ABS) immédiatement après le chargement, les échantillons sont chargés pendant un temps de 5 s. L'extension latérale de la zone chargée est d'environ 56 mm, imposée par le blindage en aluminium mis à la terre. Dans tous les cas, le potentiel de surface le plus élevé est généralement enregistré au centre des éprouvettes. Comme prévu, le potentiel en chaque point augmente généralement avec la haute tension appliquée. Selon les conditions de ces expériences, il est observé que l'augmentation de la durée de chargement n'a pratiquement aucun effet sur l'amplitude du potentiel mesuré à la surface des échantillons. Les résultats soulignent que le potentiel électrique à la surface des échantillons chargés par effet couronne est plus uniforme en comparaison avec celui des échantillons chargés par effet triboélectrique.

Le **Tableau IV. 1** représente les valeurs moyennes et l'écart-type ($E_{\text{-type}}$) du potentiel électrique (où l'écart type du potentiel de surface caractérise la non-uniformité de la distribution de potentiel) à la surface des échantillons chargés par effet triboélectrique et par effet couronne. Les résultats du **Tableau IV. 1** indiquent que, pour des échantillons chargés par effet triboélectrique, le potentiel électrique moyen d'amplitude mesuré à la surface des plaques de PTFE (-1,48 kV), PVC (-1,39 kV) et d'ABS (1,37 kV), a un l'écart-type de $E_{\text{-type PTFE}} = 0,848$, $E_{\text{-type PVC}} = 0,872$ et $E_{\text{-type ABS}} = 0,908$. Pour des échantillons chargés par effet couronne, le potentiel électrique moyen d'amplitude mesuré à la surface des plaques de PTFE (-1.482), PVC (-1.495) et d'ABS (1.400), a un écart type de $E_{\text{-type PTFE}} = 0,425$, $E_{\text{-type PVC}} = 0,541$ et $E_{\text{-type ABS}} = 0,588$. L'écart-type pour les échantillons chargés par effet triboélectrique est supérieur à celui des échantillons chargés par effet couronne, ce qui signifie que la répartition du potentiel de surface des échantillons chargés par effet triboélectrique est moins uniforme.

Tableau IV. 1: Comparaison entre les valeurs moyennes et l'écart-type du potentiel électrique à la surface des plaques de PTFE, PVC et ABS chargées par effet triboélectrique et par effet couronne.

Matériaux	Chargement-Triboélectrique		Chargement-Couronne	
	V _{moy} (kV)	E _{-type} (kV)	V _{moy} (kV)	E _{-type} (kV)
PTFE	-1,48	0,848	-1,482	0,425
PVC	-1,39	0,872	-1,495	0,541
ABS	1,37	0,908	1,400	0,588

L'analyse de déclin du potentiel de surface des trois polymères chargés par les deux techniques (effet triboélectrique et effet couronne) a été réalisée en comparant les cartographies et les courbes de déclin du potentiel électrique. La cartographie du potentiel au moment initial $t = 0$ est comparée à celle enregistrée à $t = 25$ min, afin de permettre l'évaluation de la répartition du potentiel électrique et leur déclin. La **Figure IV. 4** et La **Figure IV 5** montrent les courbes de déclin du potentiel de surface moyen des trois matériaux pour chaque méthode de chargement, ces courbes nous informent du temps nécessaire dans lequel les charges électriques ont été dissipées. Pour les deux modes de chargement, on observe, après 25 minutes, une partie des charges disparaît de la surface de l'échantillon. Les résultats des mesures de déclin de potentiel pour les échantillons chargés par effet triboélectrique montrent une différence de comportement d'un matériau à un autre. On observe que les valeurs initiales du potentiel électrique sont significativement différentes. Les points initialement chargés par un potentiel électrique élevé montrent un déclin plus rapide que ceux chargés par un potentiel faible. Le niveau de charge joue un rôle important dans la cinétique des porteurs de charge et peut avoir un effet marqué sur les caractéristiques de déclin [68]. Pour des échantillons chargés par effet couronne, le taux de déclin du potentiel de surface est le même, car l'amplitude du potentiel de surface sur la zone chargée est pratiquement la même et il n'y a pas une redistribution des charges déposées. Dans tous les cas, il est observé que le déclin de potentiel est plus important pour une tension $V_g = 2$ kV que celui pour $V_g = 1$ kV. Le taux de déclin de potentiel après 25 min pour le PVC est plus élevé par rapport au celui d'ABS. Le taux de déclin de PTFE se situe entre les deux.

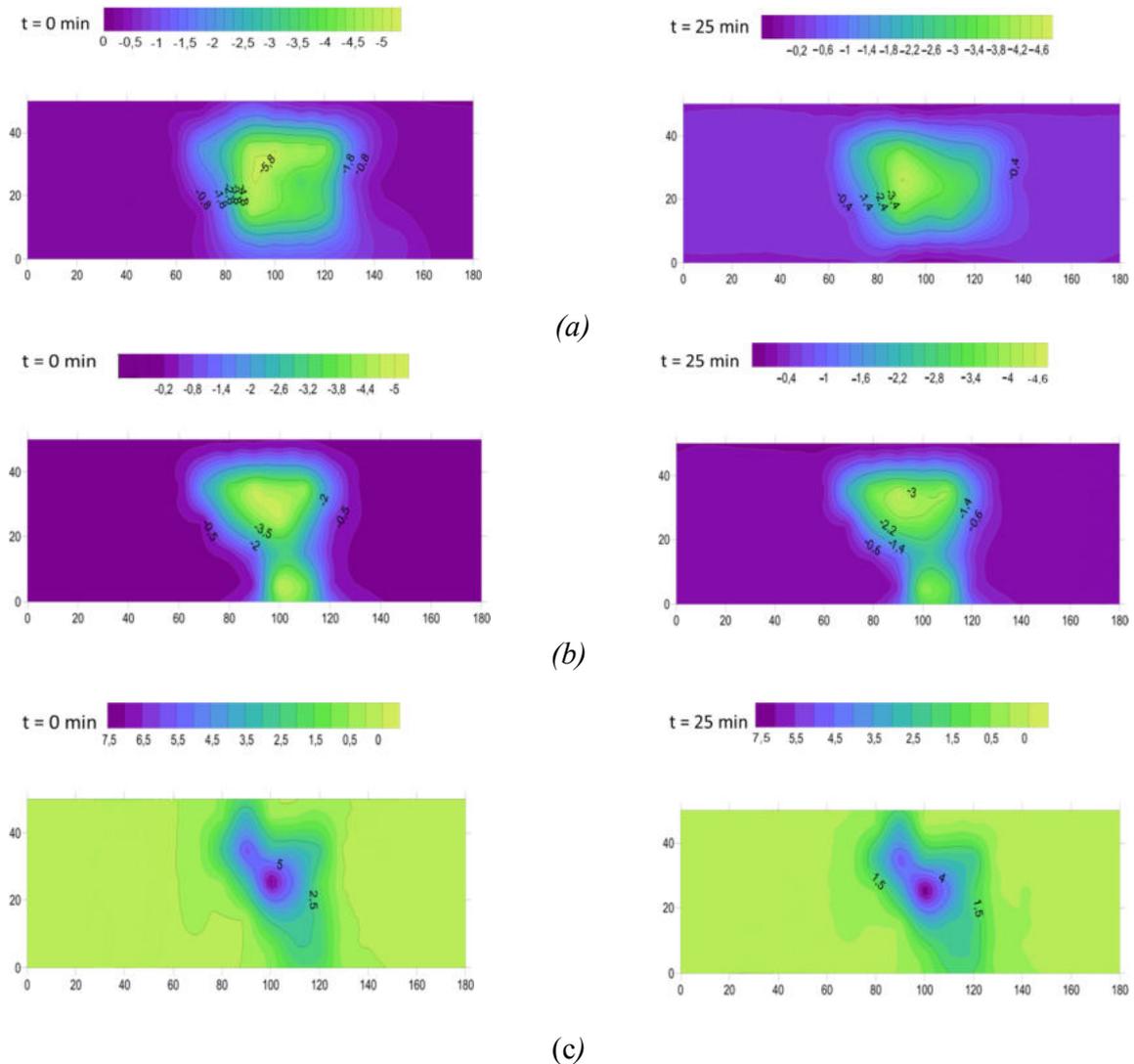
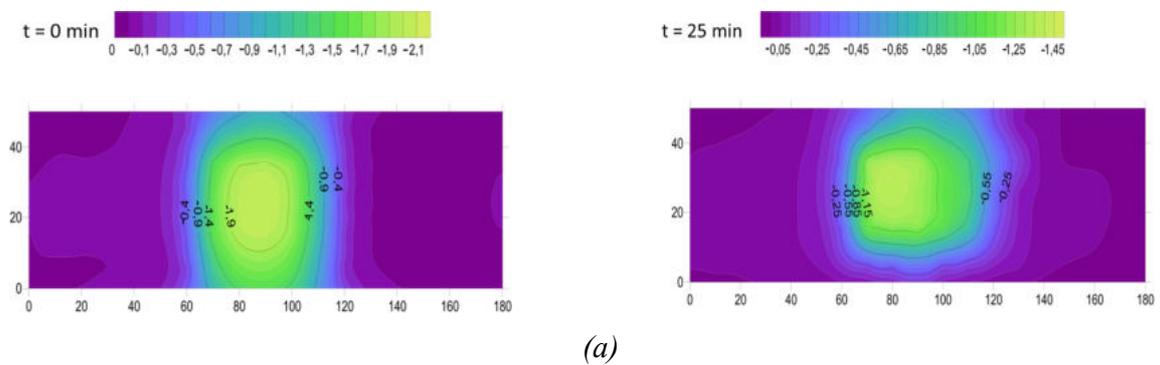


Figure IV.2. Cartographie de potentiel après un chargement par effet triboélectrique : a) PTFE-ABS; b) PVC-ABS; c) ABS- PVC.



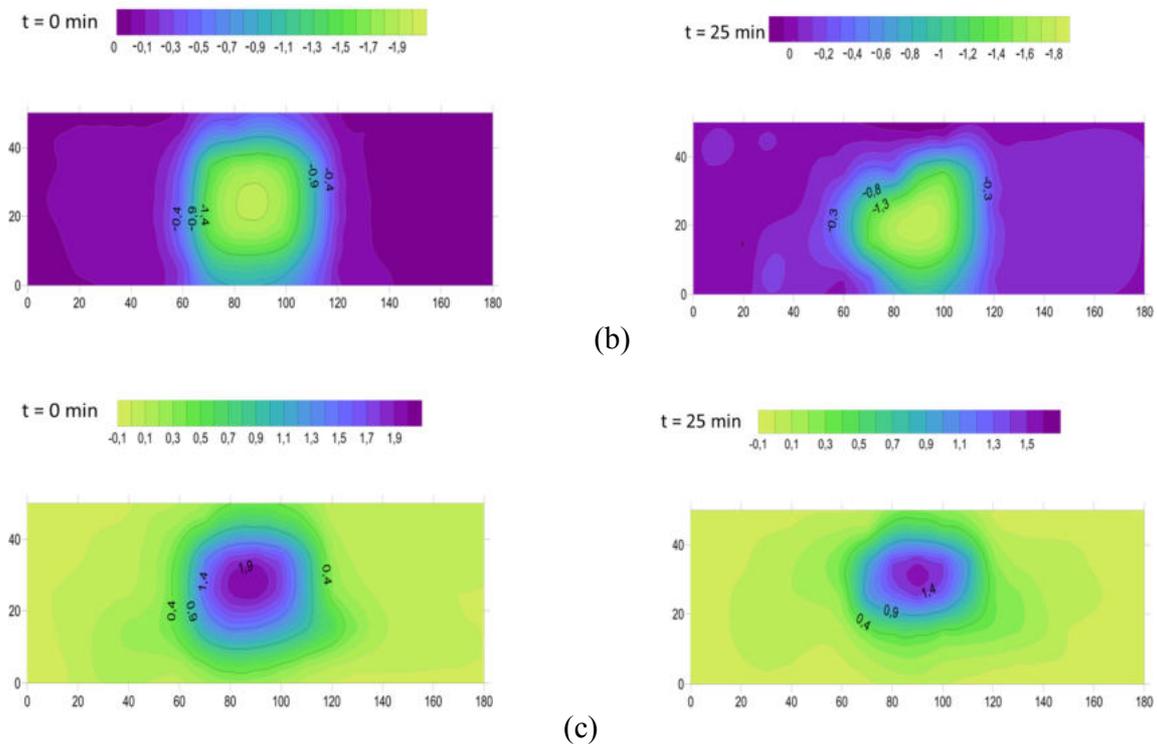
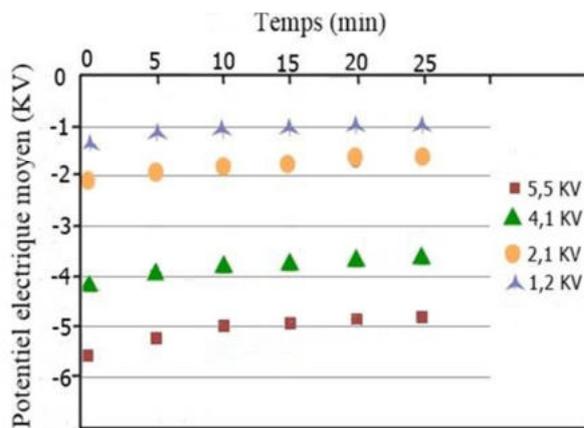


Figure IV.3. Cartographie de potentiel après un chargement par effet couronne: a) PTFE; b) PVC; c) ABS.

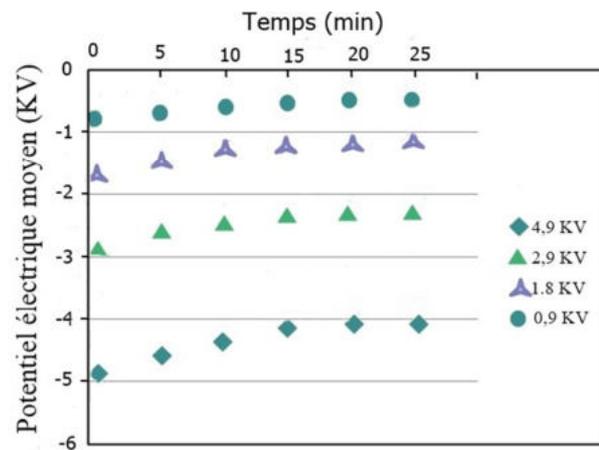
La cinétique des charges électriques générées par effet triboélectrique et déposées par effet couronne dépend de plusieurs paramètres tels que: la nature des porteurs de charge, l'effet de chaque méthode de chargement sur la chimie de surface et l'interaction des charges électriques avec l'humidité présente dans l'environnement extérieur [111]. Dans les conditions de nos expériences, la répartition du potentiel électrique acquise par effet triboélectrique est moins uniforme que celle déposée par décharge couronne et le taux de déclin pour un chargement triboélectrique est moindre que celui pour un chargement par effet couronne, cela peut s'expliquer par la différence de la nature des porteurs de charge. Le chargement triboélectrique s'accompagne d'une fracture structurelle des chaînes de polymères aux surfaces en contact, il peut impliquer simultanément un transfert d'électrons, d'ions et de matières entre les deux matériaux [35]. Le chargement par effet couronne est produit par les différentes espèces d'ions générées dans la décharge électrique dans l'air atmosphérique.

Plusieurs mécanismes peuvent introduire durant le processus de déclin de potentiel à la surface des plaques de polymères. Parmi ces mécanismes, l'injection de charge et la conduction surfacique qui peuvent être considérés dans le cas des plaques comme dominants. Dans le cas de chargement par effet couronne, une partie de la charge étendue à travers le volume de polymère vers le plan mis à la terre. La charge est déposée comme des ions de surface, et son injection dans le volume nécessite une

certaines quantités d'énergie d'activation, l'injection de charge dans le volume de la plaque ne peut être activée que lorsque le champ appliqué est élevé [71]. L'épaisseur de l'échantillon et le champ électrique sont également des paramètres qui peuvent identifier la nature du flux de charges déposé sur la surface des matériaux. Dans notre étude, les échantillons utilisés (PTFE, PVC, ABS) sont épais et le champ électrique généré est relativement faible pour les deux modes de chargement, de sorte que la vitesse de l'injection de charges dans l'isolant est faible et le temps de rétention de ces charges sur la surface du matériau est long. Avec un potentiel de surface (maximal) inférieur à 7 kV, pour les trois matériaux, la valeur moyenne du champ appliqué à la surface de la plaque est inférieure à 2 kV/mm, ce qui représente une valeur nettement inférieure au seuil d'activation indiqué dans la littérature [112]. Dans ce cas, le phénomène d'injection peut être moins important. En outre, étant donné que les dimensions des plaques de polymères (180 x 50 mm) sont supérieures à la zone chargée (55 x 50 mm), la charge pourrait se déplacer le long de la surface de la zone chargée vers les zones environnantes de la plaque sous l'effet du champ initial, ce qui a contribué à la diminution du potentiel électrique surveillé (une partie de la charge peut se déplacer latéralement à la surface de la plaque en s'éloignant de la sonde). D'après les cartographies de la **Figure IV. 2** et la **Figure IV. 3** on observe après quelques minutes une diffusion latérale des charges déposées, montrant qu'elle a une conduction superficielle lors de mesure de déclin du potentiel. Donc, le déclin de potentiel électrique est dû à l'action combinée de la conduction de surface et de l'injection de charge [113, 114, 79, 80].



(a)



(b)

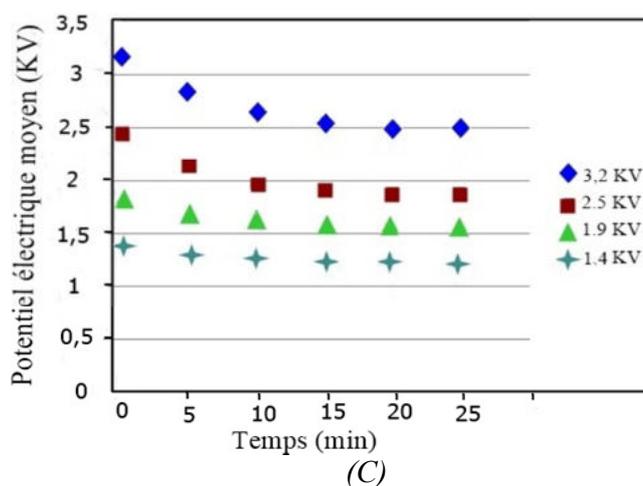
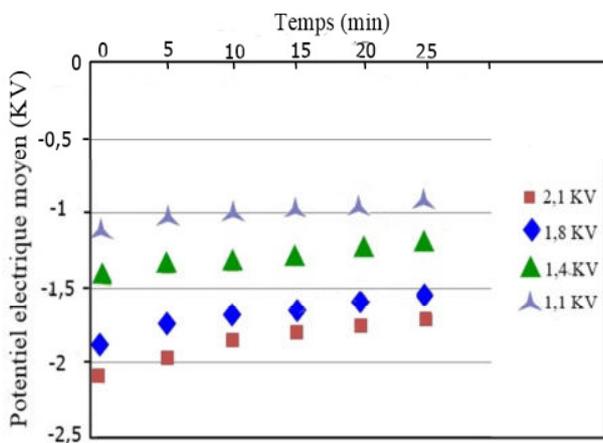
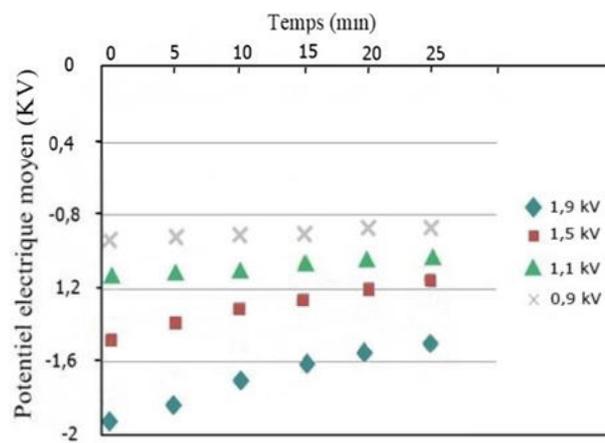


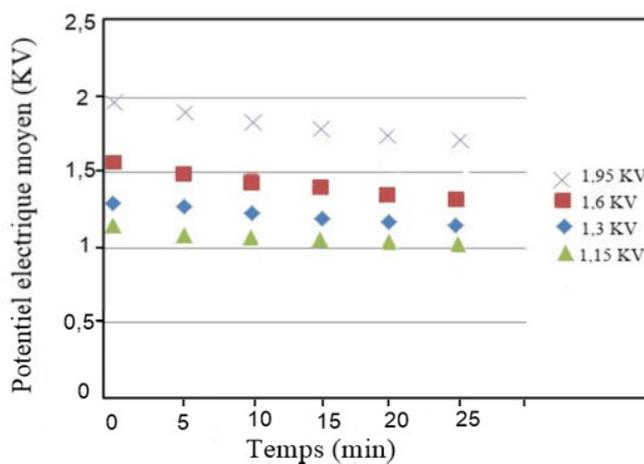
Figure IV.4. Courbe de déclin de la valeur moyenne de potentiel après chargement par effet triboélectrique: a) PTFE-ABS; b) PVC-ABS et c) ABS- PVC.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5. Courbe de déclin de la valeur moyenne de potentiel après chargement par effet couronne positif: a) PTFE; b) PVC et c) ABS.

IV.2. Comparaison entre la charge électrique et la température produite par frottement

Lorsque deux surfaces sont frottées l'une contre l'autre, une chaleur est générée et la température à l'interface de matériaux frottés augmente en fonction des conditions de test et des propriétés des matériaux en contact. La pression locale élevée et le frottement peuvent donner lieu à des températures locales très élevées. L'augmentation de la température due au frottement des deux polymères peut affecter les propriétés de surface des matériaux, ce qui entraîne des changements physicochimiques et microstructuraux dans la zone de contact [115]. L'amplitude réelle de température d'interface est importante pour une description précise des phénomènes triboélectriques des polymères. Les polymères sont généralement de bons isolants. Ainsi, la chaleur ne peut pas être évacuée facilement et la température d'interface peut être suffisamment élevée pour influencer les propriétés électrostatiques du polymère. Dans cette étude, des expériences ont été effectuées avec des plaques d'ABS sur le PVC pour observer les effets de la charge normale, de la vitesse de glissement et le nombre de cycle de frottement sur l'élévation et la répartition de température moyenne de l'interface et le potentiel triboélectrique après un contact glissant sec.

IV.2.1 Méthodologie

Les expériences sont réalisées avec des échantillons inférieurs d'ABS de dimension (50 mm x 180 mm) et des échantillons supérieurs de PVC de dimension de (100 mm x 15 mm). Le tribomètre utilisé est décrit dans la **Figure II.7**. Nous avons utilisé une sonde connectée à un voltmètre électrostatique (mesure sans contact) pour mesurer le potentiel électrique. La température de la surface des polymères (pour ABS-PVC) frottés a été examinée avec une caméra infrarouge FLIR E60. Les essais ont été réalisés à une température ambiante : $T = 25\text{ °C} - 26\text{ °C}$ et une humidité relative : $RH = 35\%$. Plusieurs séries de paramètres ont été utilisées pour cette étude, en les faisant varier un à la fois (force normale, vitesse de frottement et nombre de cycles).

- $F_N = 2\text{ N}, 6\text{ N}, 10\text{ N}, 14\text{ N}$; $v = 100\text{ mm/s}$; $Cy = 5\text{ cycles}$;
- $F_N = 2\text{ N}$; $v = 25\text{ mm/s}$; $Cy = 5, 20, 40, 80\text{ cycles}$;
- $F_N = 4\text{ N}$; $v = 25\text{ mm/s}, 50\text{ mm/s}, 75\text{ mm/s}, 100\text{ mm/s}$; $Cy = 80\text{ cycles}$;
- $F_N = 4\text{ N}$; $v = 25\text{ mm/s}, 50\text{ mm/s}, 75\text{ mm/s}, 100\text{ mm/s}$; $Cy = 5\text{ cycles}$;

IV.2 2 Résultats et analyse

Dans cette partie, nous avons étudié la relation entre la distribution de potentiel électrique et la température de surface après frottement des échantillons d'ABS chargés par un contact glissant contre le PVC. Les résultats de la **Figure IV.6** montrent l'évolution du potentiel électrique moyen et la température moyenne de surface d'ABS en fonction de la force normale de contact, à un nombre de cycles et une vitesse de frottement constants ($v = 25$ mm/s; $Cy = 5$ cycles). Pour des forces de contact entre 2 N et 14 N, il est observé que le potentiel électrique et la température augmentent de l'ordre de 0,6 kV et 4 °C, respectivement. Ce résultats peut être justifié par le fait que plus de segments chimiques pourrait être rompus sous une force de contact élevée, ce qui fournirait plus d'électrons ou d'ions pour contribuer au transfert de charge, favorisant ainsi la génération de charge. D'autre part une température élevée augmente la conductivité des surfaces en contact, ce qui limite la génération de potentiel triboélectrique. La **Figure IV.7** présente l'évolution de la température moyenne et le potentiel électrique moyen en fonction du nombre de cycles. La force normale et la vitesse ont été fixées à 2 N et 25 mm/s, respectivement, pour réduire l'effet de la température qui pourrait se produire par ce contact glissant. Avec un nombre de cycles croissant de 5 à 80 cycles, il est observé que le potentiel électrique et la température augmentent de l'ordre d'un potentiel de 0,5 kV à 0,9 kV et d'une température de 25 °C à 30 °C. Cette augmentation est limitée à une certaine valeur, liée aux caractéristiques du matériau et affectée par les conditions environnementales. Après avoir atteint ce potentiel de saturation, un frottement supplémentaire ne générera pas beaucoup plus de charge.

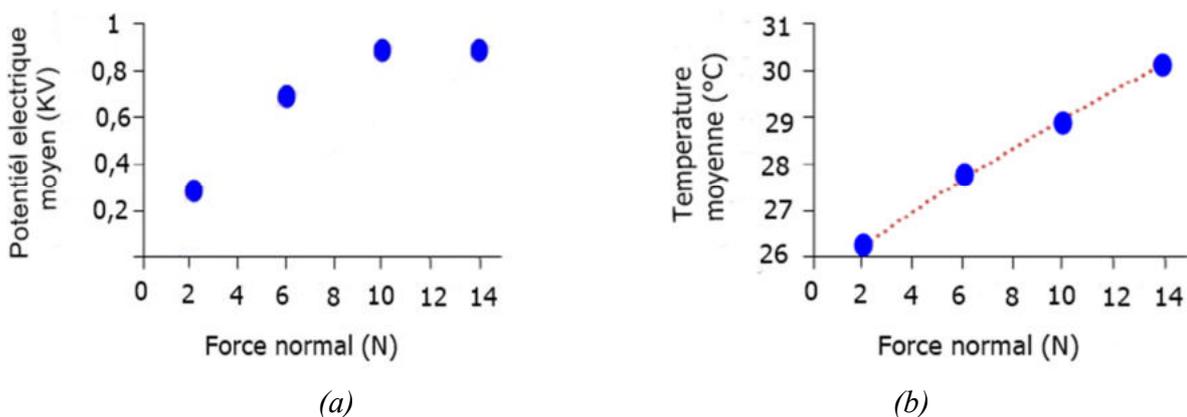


Figure IV.6. Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne b) en fonction de la force normale de contact. $v = 25$ mm/s; $Cy = 5$ cycles.

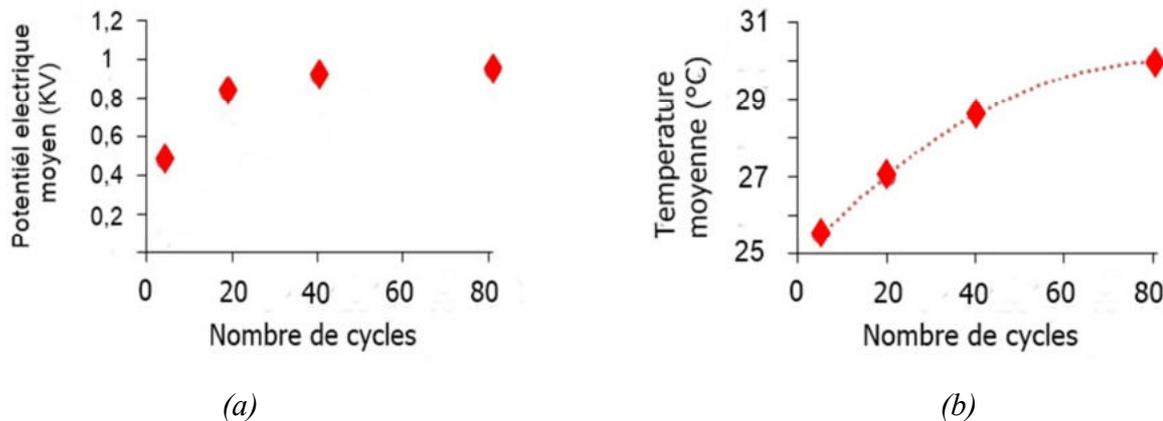


Figure IV.7. Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne en fonction du nombre de cycles. $F_N = 2 \text{ N}$; $v = 25 \text{ mm/s}$.

La **Figure IV.8** illustre l'effet de la vitesse de frottement sur la génération du potentiel électrique moyen et la température moyenne sur la surface de l'ABS après un contact glissant contre de PVC, à une force normale appliquée constante et pour 5 et 80 cycles de frottement.

- Pour 5 cycles de frottement : avec la variation de la vitesse de frottement entre 25 mm/s et 100 mm/s, nous avons enregistré une légère diminution de potentiel électrique (1,5 kV à faible vitesse et diminuait à 1,25 kV à 100 mm/s) et une faible augmentation de température moyenne de surface (de l'ordre de 1 °C),
- Pour 80 cycles de frottement, les valeurs de potentiel électrique moyen pour une vitesse de 25 mm/s; sont proches des celles obtenues pour une vitesse de 100 mm/s; nous avons enregistré un potentiel électrique moyen de 2 kV pour une vitesse de 25 mm/s et un potentiel de l'ordre de 2,25 kV pour une vitesse de 100 mm/s. La variation de la vitesse de glissement de 25 à 100 mm/s montre une variation du niveau de potentiel avec une augmentation de la température résultant du frottement. Pour des vitesses de glissement élevées et un nombre de cycles longs, la température de surface augmente, suivie d'une usure et de modification de l'état de surface ce qui peut influencer la génération de potentiel triboélectrique. En effet la vitesse de glissement (dans l'intervalle 25 mm/s – 100 mm/s) est un paramètre qui a une influence limitée sur la valeur moyenne de potentiel mais peut affecter l'uniformité du potentiel. En conséquence, une répartition inégale de la charge se produit et des valeurs de potentiel élevées sont enregistrées sur une petite région, tandis que les autres zones environnantes affichent un potentiel relativement faible.

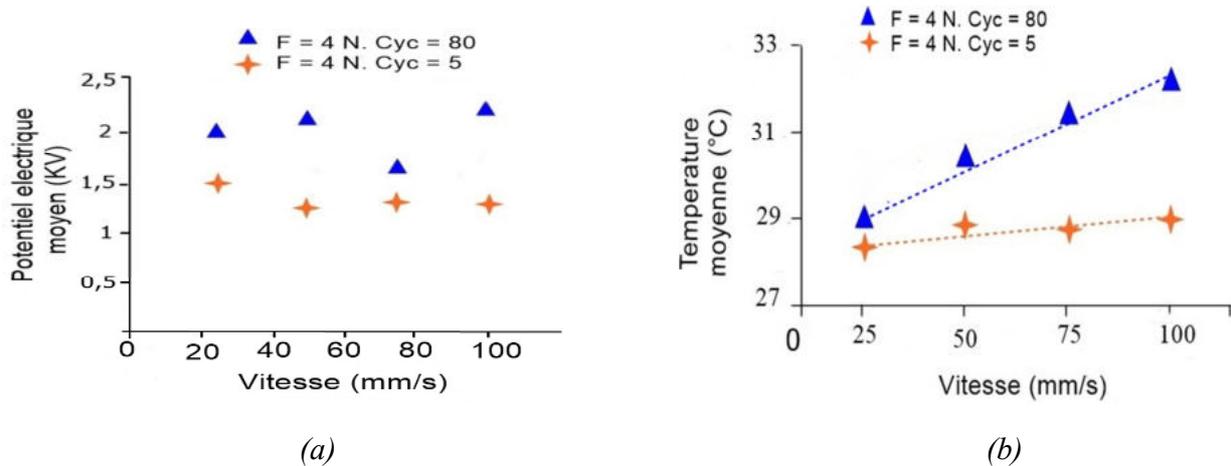


Figure IV.8. Variation du potentiel électrique moyen a) et de la température moyenne b) en fonction de la vitesse de glissement. $F_N = 4\text{ N}$; $Cy = 80\text{ cycles} / F_N = 4\text{ N}$; $Cy = 5\text{ cycles}$.

La **Figure IV.9** représente une comparaison entre les cartographies de la répartition du potentiel électrique et de la température sur la surface de l'ABS après un frottement contre le PVC. Nous avons enregistré un potentiel maximal de 10 kV. Une zone chaude distincte a été établie et la température atteint un maximum de 40 °C (**Figure IV.9.b**). Il est observé que le potentiel électrique et la température générés par la charge accumulée sur le bord le plus chargé sont beaucoup plus élevés que sur l'autre bord. L'uniformité du potentielle de surface et le champ de température pour le chargement triboélectrique dépend de la qualité de la surface de contact conforme et du matériau lui-même.. Dans le cas d'une charge mécanique uniforme, la distribution du potentiel électrique et de la température est uniforme. D'après la **Figure IV.9**, on peut voir que le potentiel de surface suit le diagramme de température. En supposant que la zone de contact réelle correspond aux sections les plus chaudes des cartes de température.

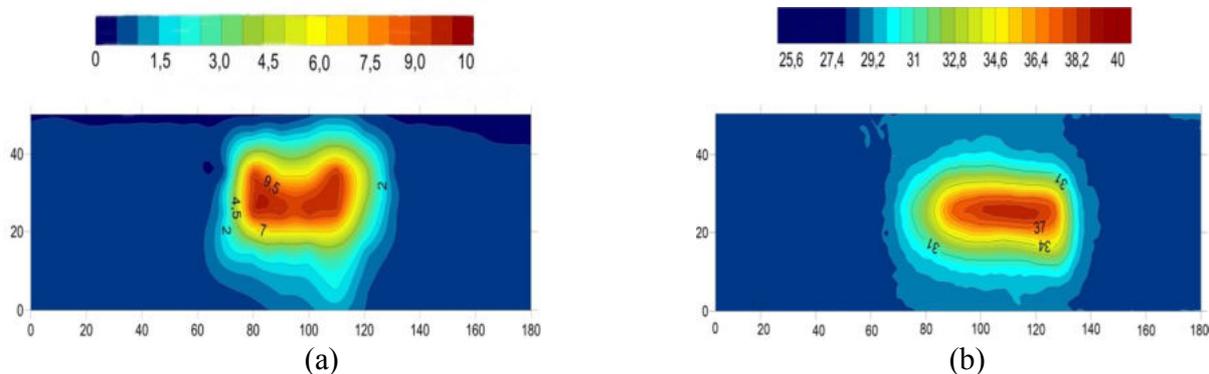


Figure IV.9. Comparaison des cartographies : (a) potentiel électrique générée par frottement ; (b) température générée par frottement : force de contact = 14 N, nombre de cycles = 80, vitesse de frottement = 100 mm/s.

IV.3. Conclusions

L'objectif de cette étude est de caractériser la génération et la dissipation des potentiels électriques des plaques de polymères chargés par un contact glissant. Les principales conclusions sont :

- La distribution de potentiel électrique des matériaux chargés par effet triboélectrique, qui caractérise l'homogénéité de la charge est moins uniforme que celle des matériaux chargés par effet couronne.
- Les caractéristiques de déclin du potentiel de surface des plaques de polymères chargés par effet triboélectrique et par décharge couronne montrent que l'injection de charge et la conduction surfacique peuvent être considérées dans notre étude comme des processus dominants du déclin du potentiel de surface.
- Les résultats obtenus à partir de la comparaison entre le potentiel électrique et la température produite par frottement entre deux polymères montrent une élévation de température de contact, s'accompagner avec des niveaux de charge élevés.
- La température et le potentiel électrique sont des outils permettant d'identifier l'empreinte de contact entre deux matériaux. On peut également estimer la zone de contact avec les mesures électriques et thermiques.

CHAPITRE V

**CHARGE TRIBOELECTRIQUE DES
POLYMERES TRAITES PAR
DECHARGE À BARRIERE
DIELECTRIQUE (DBD)**

Chapitre V Charge triboélectrique des polymères traités par décharge à barrière diélectrique (DBD)

V.1 Introduction

Au cours de la dernière décennie, la technologie plasma a été consacrée à la modification de surface des polymères afin d'améliorer les propriétés de mouillabilité et d'adhésion. Ce processus n'affecte pas les dimensions des composants et les propriétés des matériaux en volume [89]. Il remplace certaines applications chimiques en tant que procédé respectueux de l'environnement. Le chargement triboélectrique des polymères est un processus dépend de la nature et des propriétés de surface des matériaux entrant en contact. La nature de la chimie de surface est l'un des facteurs les plus importants qui déterminent le comportement électrostatique, par conséquent, le changement des propriétés de surface des polymères peut influencer sur leurs propriétés triboélectriques. L'introduction de certains groupes fonctionnels par le plasma sur la surface peut changer le comportement triboélectrique du matériau [116, 89, 95]. Dans ce chapitre, nous étudions l'effet du traitement par la décharge à barrière diélectrique (DBD) sur le comportement triboélectrique des plaques de polymères, afin de déterminer les effets des paramètres électriques et géométriques de la DBD tels que: la tension de décharge, la nature des matériaux, le temps de traitement, les signaux d'excitation, la fréquence et la distance inter-électrode sur le comportement triboélectrique des plaques de polymères.

V.2 Méthodologie

Lors de ces travaux, nous avons réalisé une série d'expériences sur des plaques de polymères en forme carré 50 cm x 50 cm (voir **Figure V.1(a)** et **Figure V.1(b)**). Tous les échantillons ont été nettoyés avant d'être exposés au plasma DBD. Les paramètres étudiés sont : la tension de décharge (carrée, sinusoïdal et triangulaire), la fréquence et la distance inter-électrodes. Durant ce travail toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions ambiantes (la température entre 19,1° C et 22 ° C et l'humidité relative entre 40 % et 49 %). Les matériaux utilisés sont : le PVC, PP et PE. Le potentiel électrique moyen de surface des matériaux a été mesuré juste après le traitement par la DBD et le chargement par le contact glissant. Pour déterminer l'effet du traitement sur le comportement de frottement des matériaux étudiés. La génération et la dissipation du potentiel électrique des polymères

traités par le plasma ont été mesurées et comparées à celles non traitées. Le coefficient de frottement des échantillons traités par la DBD a été comparé aussi par celui des échantillons non traités,

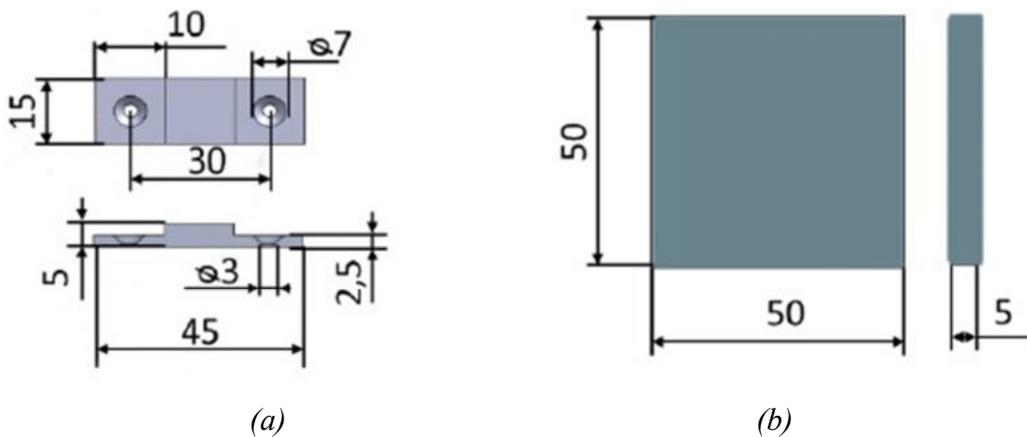


Figure V.1. Géométries et dimensions des éprouvettes utilisées, (a) échantillon supérieur, (b) échantillon inférieur.

V.3 Résultats et Analyse

V.3.1 Mesures du potentiel de surface

Les densités et les énergies des espèces plasmagènes bombardant la surface du matériau sont contrôlées par plusieurs paramètres électriques et géométriques comme la tension de décharge, le temps d'exposition, la puissance, la fréquence et la distance inter-électrodes, ils ont un effet direct sur les propriétés de surface et par conséquent indirect sur les propriétés électrostatiques. La génération et le déclin de la charge peuvent influencer par le processus plasma appliqué et les paramètres qui contrôlent ce dernier. Dans les paragraphes ci-dessous on va présenter l'étude de l'effet de plusieurs paramètres de décharge sur le comportement triboélectrique (la génération de charge après un contact glissant) des matériaux polymères traités par le plasma DBD. Les conditions de frottement sont fixes : la force appliquée 10 N, la vitesse de frottement 20 mm / s, le nombre de cycle 50, la course de glissement 56 mm. La **Figure V.2** montre un exemple typique de formes d'onde de tension et de courant de décharge enregistrées pendant le traitement d'une plaque de polymère. De ces oscillogrammes, on peut voir que le courant de décharge est constitué par de nombreuses impulsions de courant (amplitude jusqu'à 75 mA) se produisant pendant les transitions positive et négative de la tension appliquée. Cela indique que la DBD fonctionne dans un régime filamentaire.

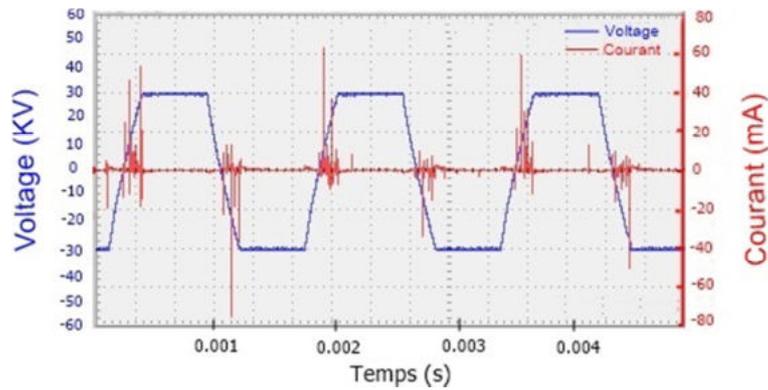


Figure V. 2. Oscillogramme tension – courant d'une DBD. Conditions : Signal : Carré, Tension = 30 kV, Fréquence = 0,8 kHz.

La **Figure V.3** montre la distribution du potentiel de surface sur l'échantillon de PVC frotté avec l'ABS pour deux cas : traité et non traité. Les résultats montrent que le frottement génère une charge positive sur la surface de l'ABS et une charge négative sur le PVC pour les deux cas (le PVC garde leur polarité). De plus, le potentiel maximum sur la surface du PVC était de l'ordre de -4,4 kV. Cependant, après le traitement de surface par DBD, il est trouvé que le potentiel triboélectrique générée après le frottement diminue et le potentiel éteint un niveau de -1,25 KV.

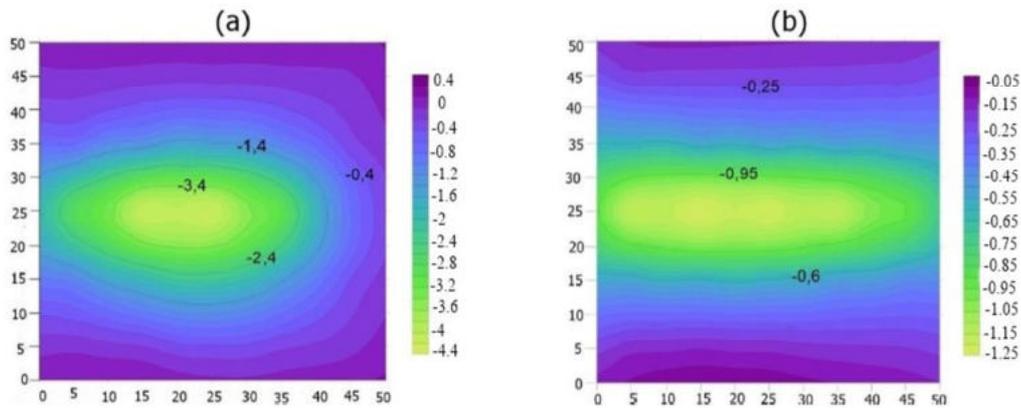


Figure V.3. Cartographie du potentiel électrique à la surface d'un échantillon de PVC après un frottement contre l'ABS. Non traité (a), traité par DBD (b).

V.3.1.1 Effet de la tension de décharge

Pour déterminer l'effet de la tension de décharge sur le potentiel après le frottement entre le PVC et l'ABS, nous avons tracé la tension moyenne générée à la surface du PVC en fonction de trois niveaux de tension DBD : 20 kV, 25 kV et 30 kV. La durée d'exposition au plasma DBD a été fixée à 30 s. La **Figure V.4** montre la décharge pour plusieurs amplitudes de tension appliquée. La décharge se

caractérise par un grand nombre de micro-décharges. Le nombre de micro-décharges dépend principalement de la haute tension appliquée aux électrodes. L'effet de la tension appliquée sur les caractéristiques de décharge a été étudié par Gadkari et Gu, ils ont constaté que les pics de courant sont plus élevés pendant la phase de montée en tension [117].

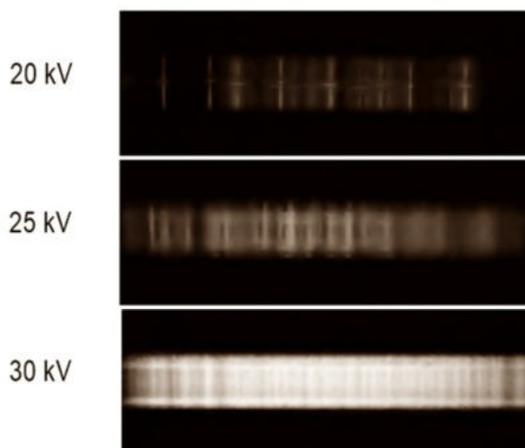


Figure V.4. Effet de la tension appliquée sur l'allure de la décharge à barrière diélectrique.

Conditions expérimentales : Signal carré; $f = 0,8$ kHz.

La **Figure V.5** illustre l'effet de la tension de décharge sur le potentiel électrique moyen, il a été observé que les surfaces en PVC étaient toujours chargées négativement et que le potentiel électrique moyen généré sur une surface non traitée en PVC était d'environ $-0,83$ kV après 50 cycles de frottement. Il est observé que le traitement conduit à une réduction importante du potentiel triboélectrique généré par rapport aux échantillons non traités, nous avons enregistré un potentiel de l'ordre de $-0,48$ kV, $-0,35$ kV et $-0,30$ kV pour des niveaux de tension de décharge de 20 kV, 25 kV et 30 kV, respectivement. Après le traitement par la DBD, le potentiel généré est diminué en fonction de la tension de décharge par rapport au cas non traité de l'ordre 43 %, 60 % et 68 %, pour des tensions de 20 kV, 25 kV et 30 kV, respectivement. L'augmentation de la tension de décharge de 20 à 30 kV conduit à une diminution du potentiel triboélectrique généré, cela peut être expliqué par le caractère énergétique le plus élevé pour des tensions élevées : 25 kV et 30 kV. Lorsque la tension augmente, la décharge devient plus diffuse, ce qui permet de couvrir une grande partie de la surface du matériau. L'exposition de la surface du polymère au plasma DBD avec des tensions élevées fournit une énergie suffisante pour détruire les liaisons chimiques dans les matériaux traités, ce qui réduit la génération de charge entre les deux matériaux frottés. [118, 119].

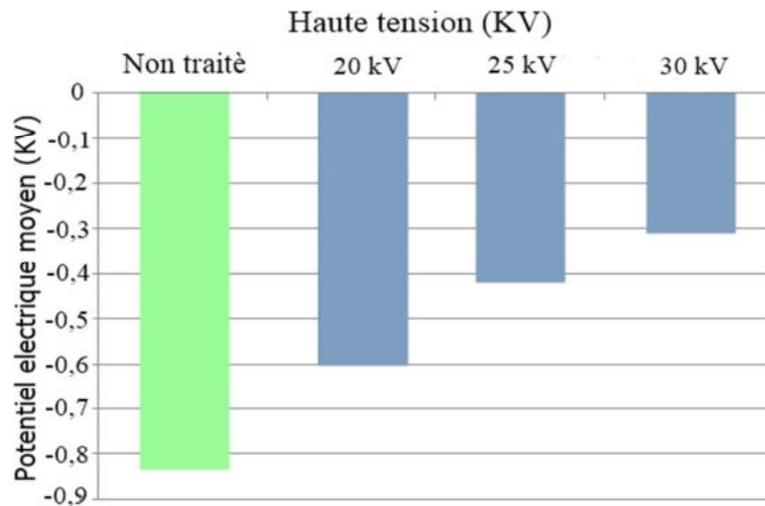


Figure V.5. Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction du niveau du traitement.

V.3.1.2 Effet de la fréquence

Afin de ressortir l'effet de la fréquence de la décharge sur le potentiel électrique des matériaux traités par le plasma et chargés par effet triboélectrique (frottement entre le PVC et l'ABS), nous avons tracé le potentiel moyen généré sur la surface de PVC en fonction de la fréquence de décharge. Le temps d'exposition au plasma DBD a été fixé à 30 s. Quatre niveaux de fréquences ont été choisis: 0,5 kHz, 0,8 kHz, 1,2 kHz et 1,5 kHz. Nous avons fait des prises de photo de décharge. Les formes d'onde du courant de décharge pour diverses fréquences de la tension appliquée sont illustrées sur la **Figure V.6**.

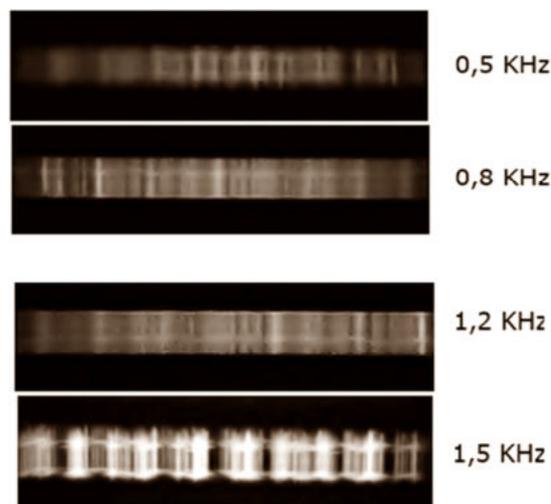


Figure V.6. Effet de la fréquence sur l'allure de la décharge à barrière diélectrique (tension carré).

La **Figure V.7** montre l'évolution du potentiel électrique de surface moyen en fonction de la fréquence de DBD. On remarque que le potentiel varie avec la fréquence et tend à diminuer quand la fréquence augmente. Pour toutes les valeurs de la fréquence, le potentiel de surface est négatif. Il atteint une valeur de l'ordre de -0,420 kV à une fréquence de 0,5 kHz. À mesure que la fréquence augmente, le potentiel électrique généré (après le frottement) à la surface du PVC diminue. À une fréquence de 1,2 kHz, on a enregistré le potentiel le plus faible de l'ordre de -0,21 kV. Cela est peut-être dû à la variation de la permittivité du diélectrique en fonction de la fréquence [89]. En effet dans la plupart des polymères la permittivité diminue avec l'augmentation de la fréquence. Dans le cas d'une fréquence de 1,5 kHz, on remarque que la fréquence a un effet considérable sur la morphologie de la décharge car au fur et à mesure que cette dernière augmente, la décharge devient moins diffuse et le canal ionisé devient de plus en plus droit et épais. La décharge est localisée sur un emplacement fixe dans le gap d'air. Ce cas n'est pas recommandé pour le traitement de surface en raison de la non-homogénéité qu'il peut causer au matériau une grande dispersion lors des mesures. C'est la raison pour laquelle il est recommandé d'effectuer des expériences à une fréquence de référence intermédiaire de 0,8 kHz.

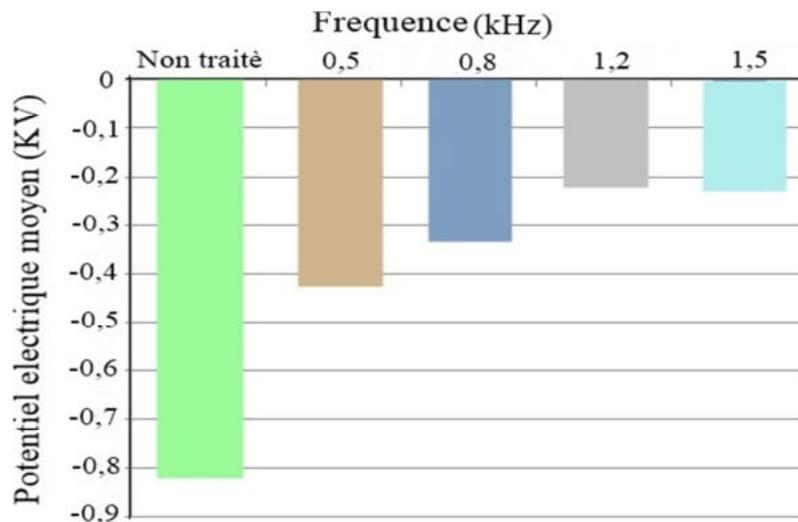


Figure V.7. Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées en fonction de la fréquence de la DBD.

V.3.1.3 Effet des signaux d'excitation

La génération de potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction du type de signal a été étudiée. Trois types de signaux hauts tension ont été utilisés: le carré, le sinusoïdal et le triangulaire. Notre objectif est d'étudier l'influence du signal sur la génération de potentiel électrique moyen. La **Figure V.8** montre un exemple typique de formes d'onde de tension et

du courant enregistrées pendant le traitement d'une plaque de PVC. À partir de ces oscillogrammes, on peut voir que le courant de décharge est constitué de nombreuses impulsions se produisant pendant les transitions positives et négatives de la tension appliquée. Cela indique que la DBD opère dans un régime filamentaire; l'amplitude et le nombre de pics, ainsi que la durée de l'activité de la décharge varient selon le type de signal utilisé. De plus, pour la même tension appliquée, la valeur efficace diffère d'un signal à l'autre.

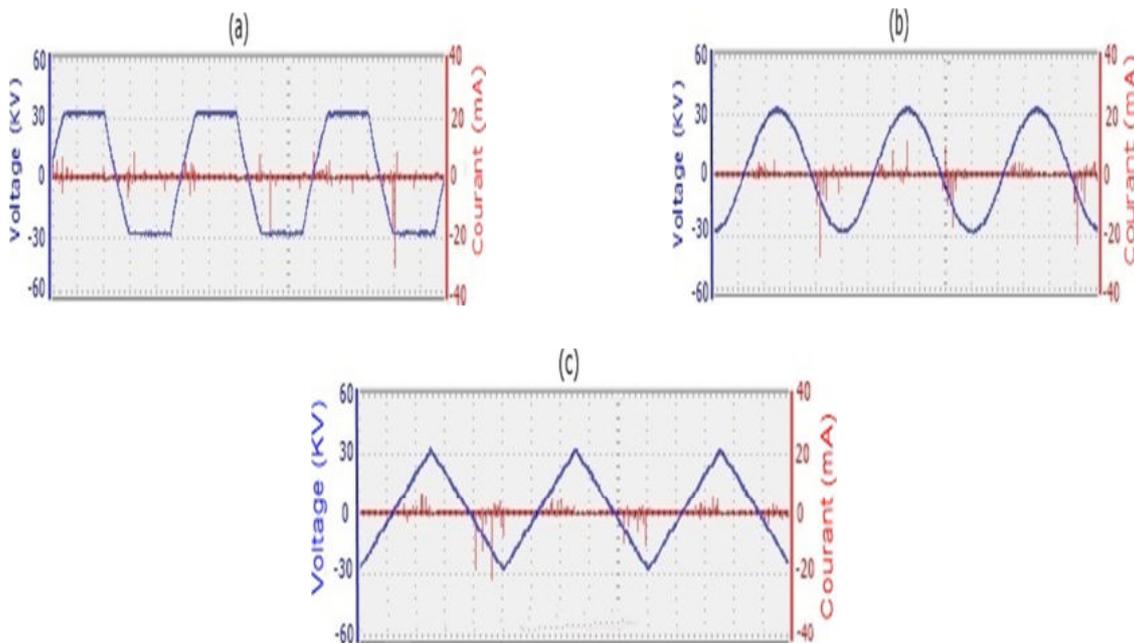


Figure V.8. Oscillogrammes courant / tension pour différents types de signaux haute tensions $U_{dbd} = 30 \text{ kV}$. $f = 0,8 \text{ kHz}$.

La **Figure V. 9** représente l'effet du signal sur le potentiel électrique enregistré sur la surface de PVC après 50 cycles de frottement contre l'ABS. Pour les trois types de signaux, il est observé une réduction de génération du potentiel électrique moyen sur les surfaces des échantillons exposés au DBD par rapport à celle des échantillons non traités. Cette réduction peut s'expliquer par la modification de l'état physique et chimique de surface du au traitement [120]. D'après ces résultats, l'effet de la DBD était plus important que pour le signal carré que pour le signal sinusoïdal et triangulaire. Cela peut s'expliquer par le fait que le courant de décharge diminue avec la diminution de la tension efficace. L'énergie du plasma qui interagit avec les surfaces des plaques est liée à l'intensité du courant de décharge, qui dépend naturellement de la forme d'onde du signal de la tension appliquée. On peut voir que les valeurs moyennes du potentiel généré pour un traitement avec un signal triangulaire sont les plus élevées par rapport aux autres signaux. Après le signal triangulaire, ce sont les

signaux sinusoïdaux et carré. Cela peut s'expliquer par le caractère énergétique le plus élevé dans le cas du signal carré. Les signaux triangulaires et sinusoïdaux fournissent une énergie d'une quantité proche.

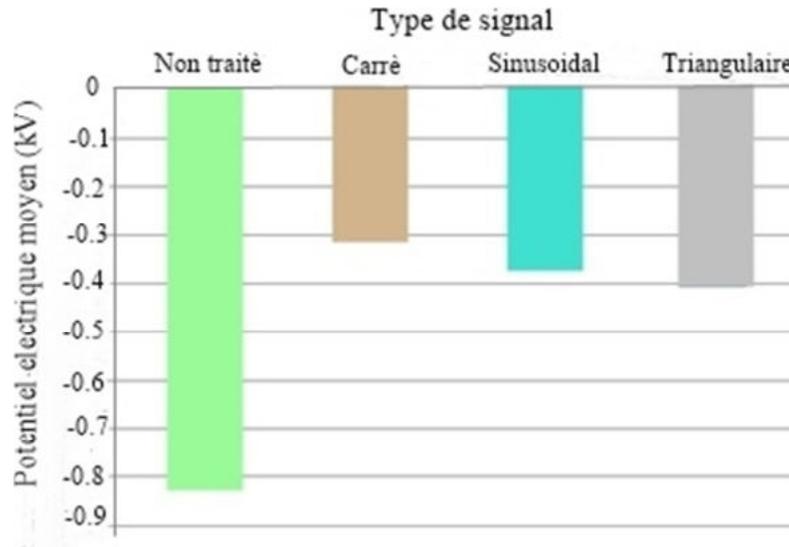


Figure V.9. Évolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction de la nature du signal de DBD.

V.3.1.4 Effet de la distance inter-électrodes

Dans cette partie, nous présentons l'influence de la variation de la distance inter-électrodes sur le potentiel moyen généré sur la surface du PVC traité par la DBD et chargé par effet triboélectrique contre l'ABS. Tous les paramètres électriques ont été fixés lors de notre étude (paramètres de référence) : $U_{dbd} = 30 \text{ kV}$, $f = 0,8 \text{ kHz}$, un signal carré et un temps d'exposition au plasma de 30 s. La **Figure V. 10** montre la variation du potentiel moyen en fonction de la distance inter-électrodes, cette distance a été variée de $d = 11 \text{ mm}$ jusqu'à $d = 17 \text{ mm}$. Il est trouvé que le potentiel électrique sur les plaques de PVC traitées par la DBD et chargées par effet triboélectrique a atteint un minimum pour une distance inter-électrodes de 13 mm. Lorsqu'on augmente la distance inter-électrodes jusqu'à 17 mm, la valeur du potentiel électrique généré est presque similaire à celle des échantillons non traités, cela signifie que le plasma de DBD n'a pas un effet sur le comportement triboélectrique des échantillons traités. La génération de potentiel électrique de la surface traitée est liée au niveau d'énergie produite par le plasma, cette dernière dépend de la distance inter électrodes. Bekkara a étudié l'effet de la distance inter-électrodes sur l'énergie moyenne fournie par la DBD. Il a trouvé que l'énergie est faible pour les petites distances inter-électrodes, ceci est dû au fait que la zone d'air entre l'électrode active et le diélectrique est très petite et insuffisante pour initier la décharge; l'énergie commence à augmenter lorsque la distance inter-électrodes augmente et que l'air dans le gap s'ionise, puis passe au maximum,

à ce stade, l'énergie commence à diminuer, ceci est dû au fait qu'en augmentant la distance entre les électrodes, le champ électrique devient très faible pour ioniser tout l'espace inter-électrodes [89].

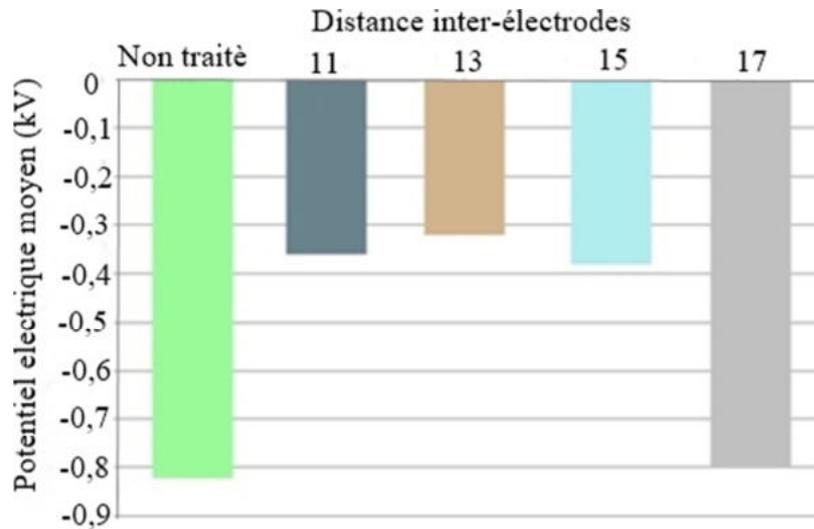


Figure V.10. Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de PVC traitées par la DBD en fonction de la distance inter-électrodes.

V.3.1.5 Effet de la nature des matériaux

L'influence de la nature du diélectrique sur l'évolution du potentiel électrique moyen due au frottement des plaques de polymères traitées par la DBD a été étudiée. Au cours de cet essai, trois types de diélectrique ont été utilisés: PVC, PP et PE. Le temps d'exposition au plasma DBD a été fixé à 30 s, le niveau de tension de décharge était 30 kV. La **Figure V. 11** illustre l'effet de la nature du matériau sur la génération de potentiel électrique moyen pour le cas traité et non traité. Les résultats obtenus montrent que ce contact glissant génère une charge négative sur les surfaces des trois matériaux (surfaces non-traitées et traitées par la DBD). On observe que les surfaces des matériaux non traités ont des potentiels relativement élevés par rapport aux celles des matériaux traités. Le potentiel électrique moyen des surfaces des matériaux non traités, après 50 cycles de frottement, était d'environ -0,825 kV pour le PVC, -0,501 kV pour le PP et -0,307 kV pour le PE. Il est observé que le potentiel électrique généré sur la surface des matériaux traités par la DBD et chargés par effet triboélectrique est inférieur à celui des matériaux non traité et chargés. Le potentiel électrique généré sur le PVC traité au DBD est inférieur à celui non traité de 62%, de 53% pour le PP et de 36% pour le PE. La nature du matériau traité par DBD s'est avéré être un facteur important peut influencer sur le comportement triboélectrique. Le traitement des polymères par la DBD dépend non seulement des paramètres de l'alimentation haute tension, mais également de la nature de l'échantillon interposé entre les électrodes qui joue le rôle de

barrière diélectrique secondaire, où l'énergie fournie varie en fonction du type de polymère. Le résultat rapporté dans la réf [121] confirme que le degré de la modification de la surface par le plasma DBD et la quantité d'énergie fournie dépendent également du type de polymère à traiter.

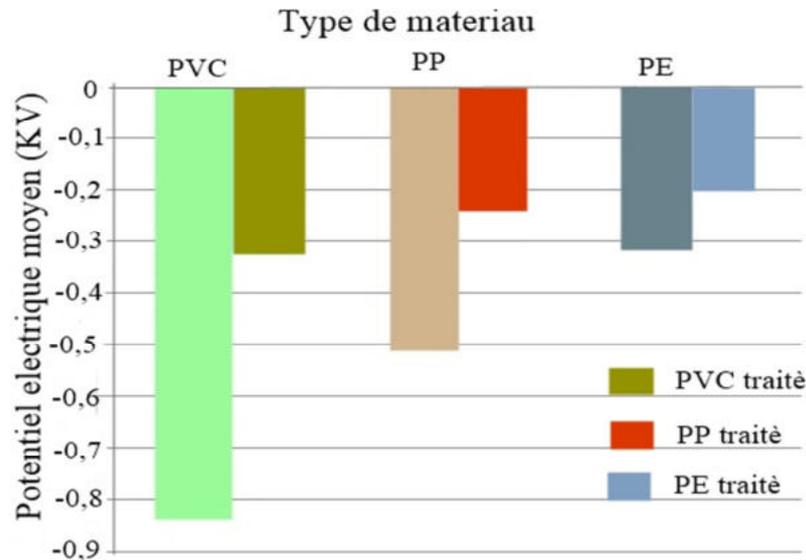


Figure V.4. Evolution du potentiel électrique moyen sur des plaques de polymères traitées par la DBD en fonction de la nature du matériau.

V.3.1.6 Effet du temps de traitement

La **Figure V. 12** montre l'effet du temps d'exposition au plasma sur le potentiel électrique moyen généré sur les surfaces des matériaux traités par la DBD et chargés par effet triboélectrique. Sans traitement, le PVC, le PP et le PE ont acquis un potentiel triboélectrique d'environ -0,825 kV et -0,501 kV et -0,307 kV, respectivement. Pour les trois matériaux étudiés, les résultats montrent que le potentiel électrique de surface moyen est réduit après le traitement par la DBD par rapport à celui des échantillons non traités. Le temps de traitement par la DBD a un effet significatif sur l'amplitude de potentiel électrique généré pour les trois polymères, on observe que le potentiel électrique moyen varie en fonction du temps d'exposition au plasma, des valeurs plus basses pour des courtes temps de traitement. Pour un court temps d'exposition, il n'y a pas un grand changement de la rugosité à cause de la faible énergie reçue par les plaques, accompagné d'une augmentation de la mouillabilité (la présence de l'humidité sur la surface des plaques peut diminuer leur résistivité et la génération de potentiel électrique) ce qui réduit la génération de charge triboélectrique [122, 89]. Avec l'augmentation du temps de traitement et sous l'effet de la force de contact, la rugosité de surface des polymères augmente donc les points de contact sont nombreux, cela traduit sur l'augmentation de la charge triboélectrique. Cette augmentation de la rugosité peut être attribuée à la gravure de la surface du polymère par le

plasma de DBD à l'air ambiant [89]. Le degré du changement de la rugosité diffère d'un polymère à un autre en raison de leurs différentes propriétés chimiques. Dans le cas de longues durées d'exposition, la surface des échantillons de PVC commençait à se déformer, cela est dû au fait que la DBD fournit plus d'énergie pour le PVC par rapport au PE et PP. Plusieurs auteurs ont observé que l'énergie fournie à la surface des polymères par le système DBD était trop élevée pour un traitement de longue durée et que la variation de l'énergie fournie par le plasma est non pas seulement en fonction de la durée du traitement, mais aussi de la nature du matériau [89, 95]. Ce double aspect du traitement peut expliquer la contradiction dans la littérature en ce qui concerne l'effet du traitement sur la charge triboélectrique. Selon les travaux de Murata et al [123], ils ont traité le polystyrène pendant une très courte durée dans leur système d'injection de poudre avant de l'envoyer au chargeur triboélectrique. En faisant cela, ils ont amélioré considérablement la charge par frottement. Au contraire, Chongqi et al [124] ont diminué la capacité de chargement triboélectrique en traitant le polystyrène pour une durée de 20 s, cela fait la différence par rapport aux travaux de Murata et al.

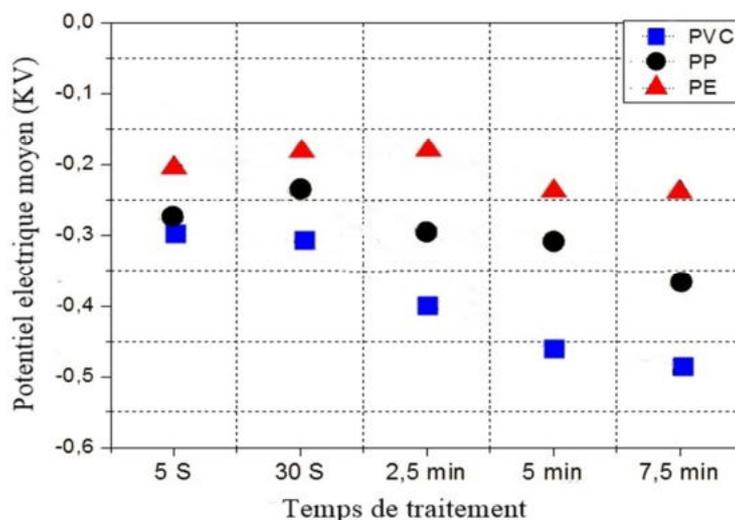


Figure V.5. Relation entre le temps de traitement au plasma et le potentiel électrique moyen généré sur le PVC, le PP et le PE.

V.3.2 Mesures du déclin de potentiel de surface (DPS)

Dans cette partie on a étudié l'effet du traitement des plaques de PVC par la DBD sur la dissipation des charges électriques dans le temps, un test de chargement et mesure de déclin de potentiel a été réalisé pour des plaques de PVC non-traitées et traitées par le plasma de DBD. La **Figure V. 13** montre le déclin du potentiel triboélectrique de surface des échantillons non traité et traités par le plasma. D'après ce résultat, il est observé que la génération de potentiel triboélectrique est moins faible sur les

surfaces des échantillons traités par rapport au celle des échantillons non traités. Après le traitement, la surface du polymère est exposée à l'énergie de décharge, ce qui donnait plus de capacité à la surface pour capter l'humidité et donc augmentait la dissipation de la charge. De plus, comme les groupes polaires contenant de l'oxygène ont été introduits par le plasma sur la surface, ceux-ci pourraient être incorporés à l'humidité par liaison hydrogène et favoriser la pénétration de l'humidité, d'où une dissipation électrostatique accrue [125]. On remarque aussi que le temps a un effet sur le niveau et le déclin de potentiel électrique généré. Lorsque le temps de traitement de DBD augmente, l'énergie fournie par la DBD augmente, ce qui pourrait entraîner une forte diminution de la résistivité du polymère à cause de l'augmentation de la mouillabilité, le matériau va se comporter dans ce cas comme un conducteur laissant la charge se disperser rapidement à sa surface, cela explique le taux élevé de déclin du potentiel triboélectrique après un traitement par plasma.

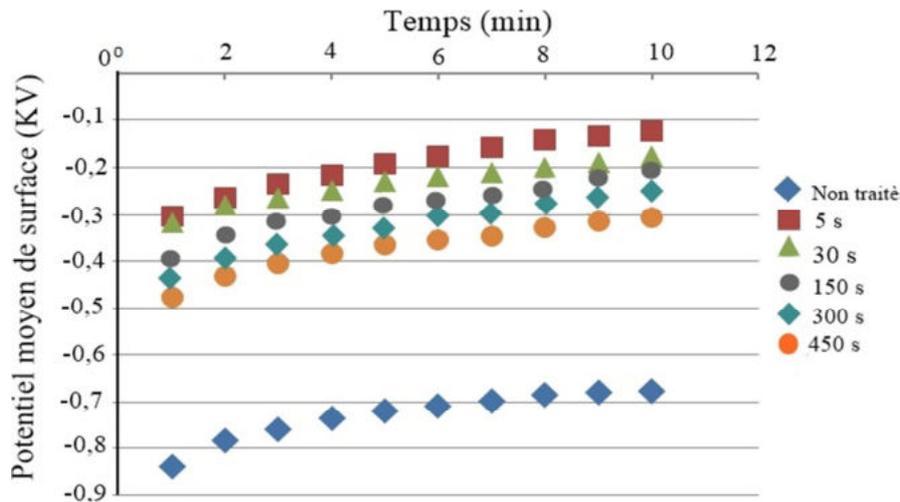


Figure V.6. Déclin de potentiel moyen du PVC non traité et traités par DBD après 50 cycles de frottement contre l'ABS. $U_{dbd} = 30 \text{ kV}$. $f = 0,8 \text{ kHz}$.

V.3.3 Coefficient de frottement

La Figure V. 14 illustre l'effet du temps de traitement de la DBD sur le coefficient du frottement moyen (COF_{moy}) des échantillons de PVC traités par la DBD et chargés par effet triboélectrique contre l'ABS. Le COF_{moy} des échantillons traités par la DBD a été augmenté en valeur absolue de 14 % pour un temps de traitement de 5 s et de 105 % pour un temps de traitement de 450 s par rapport au celui des échantillons non traités et chargés par frottement. Des modifications chimiques et physiques de la surface du PVC dues au traitement par plasma peuvent contribuer à l'augmentation du coefficient de frottement. Le temps d'exposition au plasma a un effet direct sur l'énergie fournie par la décharge, et

donc sur les propriétés de la surface traitée. Le traitement par plasma augmente la mouillabilité (traduit par la diminution de l'angle de contact) et l'adhérence des matériaux traités, ce qui augmente considérablement le coefficient de frottement moyen (COF_{moy}). L'angle de contact quantifie la mouillabilité d'une surface solide par rapport à l'eau, si l'angle de contact est faible on dit que la surface est hydrophile alors que si l'angle est élevé la surface est hydrophobe. [93, 89]. Le coefficient de frottement de la surface était plus élevé lorsque la rugosité de la surface était relativement plus élevée [126]. *Noeske et al* ont montré que le traitement par le plasma induit des changements au sein de la topographie (la rugosité de surface) des surfaces de certains matériaux thermoplastiques et un peu changements sur les surfaces des autres matériaux [127].

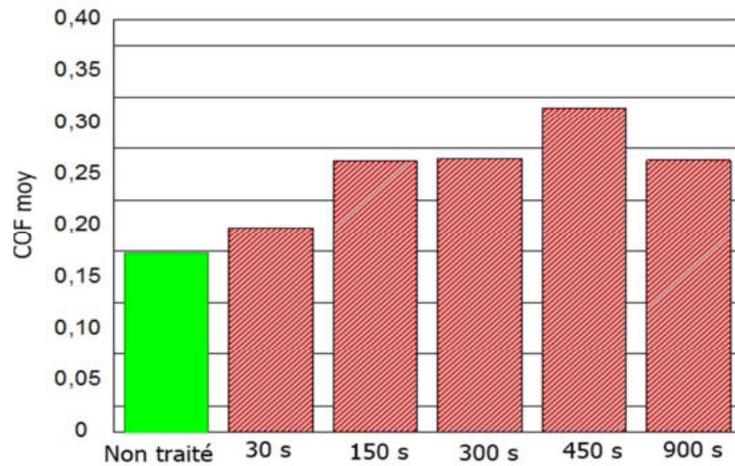


Figure V. 7. Coefficient de frottement moyen en fonction du temps du traitement.

V.4 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'effet du traitement par la décharge à barrière diélectrique (DBD) sur le comportement triboélectrique des plaques de polymères (PVC, PP et PE). L'effet des différents paramètres électriques et géométriques est présenté.

- Les potentiels triboélectriques moyens des échantillons modifiés au plasma sont inférieurs à ceux des échantillons non traités. Le temps d'exposition au plasma DBD réduit la charge triboélectrique des plaques. Il existe un intervalle de fréquence où le régime de la décharge DBD est diffus, au-delà de cet intervalle (fréquences élevées), le régime devient de plus en plus filamentaire. Les valeurs moyennes du potentiel généré par frottement après un traitement plasma par un signal triangulaire sont les plus élevées par rapport aux autres signaux (carré, sinusoïdal). Le potentiel électrique des plaques traitées en utilisant une distance inter-électrodes de (13 mm) est réduit par rapport aux autres distances.
- Les mesures de déclin de potentiel de surface montrent un taux de déclin élevé (même à un faible niveau de potentiel) pour les échantillons traités par plasma, cela peut être attribué à l'augmentation de la mouillabilité de surface.
- Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation du temps de traitement par DBD. Cela peut s'expliquer par le changement de la morphologie et de la structure chimique due au traitement DBD.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Dans ce travail, pour étudier la génération et la dissipation des charge électriques sur les surfaces des matériaux isolants, nous avons utilisé trois systèmes de test, un système de chargement triboélectrique linéaire, un système de chargement par décharge couronne et un système de traitement par décharge à barrières diélectrique. Les dispositifs avancés et les expériences contrôlées avec précision permettent une étude complète du comportement électrostatique des surfaces de polymères. Trois séries d'études ont été conçues et réalisées:

- Modélisation expérimental du processus de chargement triboélectrique des plaques de polymères.
- Génération et dissipation des potentiels électriques aux interfaces polymériques.
- Charge triboélectrique des surfaces polymères traitées par décharge à barrière diélectrique (DBD).

Les résultats de notre étude montrent que le processus de chargement triboélectrique dépend de plusieurs facteurs, à savoir : la force normale de contact, le temps de chargement et la fréquence (la vitesse du déplacement tangentiel). Ce procédé multifactoriel peut être modélisé par la méthodologie des plans d'expériences. Le chargement par contact glissant montre que le potentiel électrique augmente avec l'augmentation de la force de contact et du nombre de cycles. L'effet de la fréquence du mouvement de glissement n'était pas évident pour les trois matériaux dans un mouvement de frottement lent.

La charge par effet triboélectrique est plus compliqué que le chargement par effet couronne car le premier est difficile a contrôlé et influencée par plusieurs paramètres expérimental (force de contact et du nombre de cycles) et environnemental (température et humidité). La distribution de potentiel électrique, qui caractérise l'homogénéité de la charge triboélectrique, est moins uniforme que celle obtenue en utilisant la technique de charge couronne. L'avantage de chargement par effet couronne est qu'il est facile de contrôler les niveaux de potentiel requis en toute confiance par rapport à la charge triboélectrique. Une

comparaison entre les deux techniques a démontré que le chargement par effet couronne considéré comme une méthode utile pour étudier le comportement de charge d'un matériau en termes de contrôle des niveaux de potentiel électrique et de la cinétique de déclin des potentiels par rapport au chargement triboélectrique.

Des expériences ont été effectuées avec des plaques d'ABS pour observer les effets de la force normale, la vitesse de glissement et le nombre de cycles sur la variation et la répartition de potentiel et de la température moyenne dû au frottement. Les résultats montrent une élévation de température de contact en fonction de trois facteurs, le frottement peut s'accompagner avec des niveaux de charge élevés. La température et le potentiel électrique de surface sont des outils permettent d'identifier l'empreinte de contact entre deux matériaux polymères. À partir des cartographies électriques et thermiques on peut estimer la zone de contact après un frottement.

Les potentiels moyens triboélectriques des échantillons modifiés au plasma sont inférieurs à ceux des échantillons non traités. Une réduction du potentiel électrique après frottement est observée pour les trois matériaux. Le temps d'exposition au plasma DBD réduit le potentiel électrique des plaques après un contact glissant. Les changements observés sur le comportement triboélectrique après DBD étaient probablement dus à la modification de la morphologie de surface et l'hydrophilie accrue causés par l'énergie transférée à la surface des plaques traitées. Le traitement des plaques de polymères par décharge à barrière diélectrique (DBD), conduit à une augmentation du taux de déclin de potentiel électrique moyen. Vu que le traitement par plasma de DBD engendre des modifications à l'échelle physicochimique à la surface des polymères. Le coefficient de frottement augmente avec l'augmentation du temps de traitement par décharge à barrière diélectrique.

En conclusion, ce travail fournit une meilleure compréhension des comportements triboélectrique des matériaux polymériques couramment utilisés et identifier la génération, la distribution et la dissipation des potentiel électrique générés dans des conditions déférentes dans lesquelles se produit le mouvement relatif des matériaux en contact (force de contact, vitesse de déplacement et temps de chargement) ainsi que de leur état de surface, qui peut être modifié par l'exposition à l'action d'une décharge à barrière diélectrique. La détermination des amplitudes, les polarités, la distribution et la dissipation du potentiel électrique dû au contact glissant sec est très importante pour éviter les risques électrostatiques dans les applications industrielles et domestiques par l'élimination de ces charges par différentes

manières. Réduire la charge induite par le frottement est important dans la fabrication de produits électroniques, ainsi que dans les industries chimiques, pétrochimiques et textiles. D'autre part, ces charges triboélectriques peuvent être exploitées du côté positif comme source d'énergie électrique dans les systèmes auto-alimentés par les générateurs triboélectriques.

Perspectives

Les études réalisées dans le cadre de cette thèse ouvrent des perspectives intéressantes. Des suggestions pour de futures études peuvent être une étude de l'effet des variations du champ de température générée par un frottement polymère - polymère sur la génération de la charge électrique et leur dynamique.

Les travaux du projet relatifs à la génération de la charge électrique et au déclin de potentielle ont été réalisés sur des échantillons plats de matériaux polymères d'environ 5 mm d'épaisseur. Des études similaires peuvent être effectuées sur des échantillons de matériaux minces (dans la gamme de μm) afin d'étudier les effets possibles de l'état de surface (après traitement) sur la génération et la dissipation de la charge triboélectrique.

Modélisation expérimentale du processus triboélectrique d'autres matériaux et élargir les facteurs étudiés afin de généraliser les conclusions.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] J. A. Brydson, "Plastics Materials," 7th ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 1999.
- [2] A. Kumar, R.K. Gupta, "Fundamentals of polymer engineering," Second Edition. New York, CRC Press. 2003.
- [3] B.J. Briscoe, "Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces," Ed. K. Mittal, Plenum Press, New York 1983.
- [4] G. Wu, J. Li, & Z. Xu, "Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review," *Waste Management*, Vol. 33, pp. 585–597, 2013.
- [5] C. Oudet, "Polymères- structure et propriétés introduction," MASSON, 1994.
- [6] G. Odian, "Principles of Polymerization," Fourth Edition. ISBN 0-471-27400-3. John Wiley & Sons, Inc. 2004.
- [7] R. F. Boyer, "Glassy transitions in semicrystalline polymers," *J. POLYMER SCI: Symposium*, vol. 50, pp. 189–242, 1975.
- [8] C. Hall, "Polymer Materials," Published by Macmillan education LTD, London, pp. 1-240, 1989.
- [9] G. Jarrouse, "Adhésion des polymères semi-cristallins entre leur température de transition vitreuse et leur température de fusion," Thèse de doctorat de l'université Paris VI, 2004.
- [10] www.thaipolymer.co.th/en/engineeringplastics
- [11] J. Dubois, "Propriétés diélectriques des plastiques," *Tech. l'ingénieur*, vol. AM3140, 2001.
- [12] H. Alghamdi, "A Study on the Ageing of polymeric materials in the presence of space charge," Thèse de doctorat de l'université de southampton, 2016.
- [13] L. H. Sperling, "Introduction to physical polymer science," 4th ed.: John Willey & Sons, 2006.
- [14] DM. Taylor, T.J. Lewis, "Electrical conduction in polyethylene terephthalate and polyethylene films," *J.Phys D: Appl.Phys.* vol. 4, pp. 1346-1357, 197.
- [15] AC. Lilly, JR. Mc Dowell "High-field conduction in films of mylar and teflon," *J. Appl. Phys.* vol. 39, pp. 141-146, 1968.
- [16] D. Das-Gupta "Conduction mechanisms and high-field effects in synthetic insulating polymers," *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul.* vol. 4, pp. 149-156, 1997.
- [17] N. K. Myshkin, M. I. Petrokovets, and A. V. Kovale, "Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer," *Tribol. Int.*, vol. 38, pp. 910–921, 2005.

- [18] G. Xie, D. Guo, J. Luo, "Lubrication under charged conditions," *Tribol. Int.* vol. 84, pp. 22–35, 2015.
- [19] J.K. Lancaster, "Friction and Wear in Polymer Science," North-Holland Publishing Company, New York, p. 960, 1972.
- [20] Z. Rymuza, "Tribology of Polymers," *Arch. Civ. Mech. Eng.* vol. 7, pp. 177–184, 2007.
- [21] F. Galembeck, T.A.L. Burgo, L.B.S. Balestrin, R.F. Gouveia, C.A. Silva, A. Galembeck, "Friction, tribochemistry and triboelectricity: recent progress and perspectives," *RSC Adv.* vol 4, pp. 1166–1169, 2014.
- [22] K. C. Ludema and D. Tabor, "The friction and visco-elastic properties of polymeric solids," *Wear*, vol. 9, pp. 329–348, 1966.
- [23] M.A. Chowdhury, and M.M. Helali, "The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials," *Tribol. Int.*, vol. 41, pp.307–14, 2008.
- [24] L.-H. Lee, "Advances in polymer friction and wear," Plenum Press, New York and London, 1974.
- [25] K. Shooter, D. Tabor, "The frictional properties of plastics," *Proc R Soc*, vol. 65, pp. 661, 1952.
- [26] B. Bhushan, "Introduction to Tribology," John Wiley & Sons, 2002.
- [27] L. Dascalescu, M. Plopeanu, B. Tabti, A. Antoniu, L.M. Dumitran, P.V. Notingher, "Corona charging of composite nonwoven media for air filtration," *Proc. ESA Annual Meeting on Electrostatics*, Paper D3, pp.1-7, 2010.
- [28] G. M. Sessler, "Charge storage in dielectrics," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, vol. 24, pp. 395-402, 1989.
- [29] S. Kumara, "Electrical charges on insulator surface and their impact on withstand performance," Licentiate thesis, Department of Materials and Manufacturing Technology, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, 2009.
- [30] Matsusaka, S., Maruyama, H., Matsuyama, T., & Ghadiri, M. "Triboelectric charging of powders: A review," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 65, pp. 5781–5807, 2010.
- [31] D. K. Davies, "Charge generation on dielectric surfaces," *J. Phys. D.*, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
- [32] D.M. Taylor, P. E. Secker, "Industrial electrostatics: Fundamentals and measurements," Research Studies Press, John Wiley 1994.
- [33] J. Lowell, W. S. Truscott, "Triboelectrification of identical insulators: I. an experimental investigation," *J. Phys. D.*, vol. 19, pp. 1273-1280, 1986.
- [34] W. R. Harper, "Contact and frictional electrification," Oxford University Press. London. 1967, reprinted by M. Hill, CA: Laplacian Press, 1998.
- [35] J. Lowell and A. C. Rose-Innes, "Advances in Physics Contact electrification Contact electrification," *Adv. Phys.*, vol. 296, (6), pp. 947–1023, 1980.

- [36] G. S. P. Castle, "Contact charging between insulators," *J. Electrostat.*, vol. 40-41, pp. 13-20, 1997.
- [37] J. Lowell, W.S. Truscott, "Triboelectrification of identical insulators: II. Theory and further experiments," *J. Phys. D.*, vol. 19, pp. 1281-1298, 1986.
- [38] M. Sow, D. J. Lacks, R. M. Sankaran, "Effects of material strain on triboelectric charging: Influence of material properties," *J. Electrostat.*, vol. 71, pp. 396-399, 2013.
- [39] J. H. Anderson, "A method for quantitatively determining triboelectric series and its applications in electrophotography," *J. Imaging Sci. Technol.* vol. 44, pp. 534–543, 2000.
- [40] A. F. Diaz, R. M. Felix-Navarro, "A semi-quantitative triboelectric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties," *J. Electrostat.*, vol. 62, pp. 277–290, 2004.
- [41] X. Zhang et al., "Rationalizing the Triboelectric Series of Polymers Rationalizing the Triboelectric Series of Polymers," *Chem. Mater.* vol. 31 (5), pp 1473–1478, 2019.
- [42] M. Ando and J. Sukumaran, "Effect on Friction for Different Parameters in Roll–Slip of Polyamide–Steel Nonconformal Contacts," *Tribol. Trans.*, vol. 55, no. 1, pp. 109–116, 2012.
- [43] A. C. Rose-Innes, & K. P. Homewood, "An Accumulation of Contact Charge on Insulators Repeated Touched by Metals," *J. Phys. D., Appl. Phys.*, vol. 15, no. 2, pp. 2283, 1982.
- [44] T. S. Komatsu, M. Hashimoto, I. Arakawa, & S. Nasuno, "Static Electrification by Asymmetric Rubbing," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 235, pp. 60-64, 2004.
- [45] K. Ohara, "Relationship Between Frictional Electrification and Molecular Motion of Polymers," *J. Electrostat.*, vol. 9, no. 2, pp. 107–115, 1980.
- [46] Quaglino, V., Dubini, P., Ferroni, D., and Poggi, C, "Influence of Counterface Roughness on Friction Properties of Engineering Plastics for Bearing Applications," *Mater Des*, vol. 30, pp. 1650–1658, 2009.
- [47] W.D. Greason, "Investigation of a test methodology for triboelectrification," *J. Electrostat.* vol. 49, pp. 245–256, 2000.
- [48] N.K.K. Myshkin, M.I.I. Petrokovets, A.V. V. Kovalev, "Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer," *Tribol. Int.* vol. 38, pp. 910–921, 2005.
- [49] K. P. Homewood, & A. C. Rose-Innes, "The Effect of Contact Time on the Electrification of Polymer by Metals," 48. *Inst. Phys. Conf. Ser.* 1979.
- [50] E. Nemeth, V. Albrecht, & G. Schubert, "Polymer Tribo-electric Charging: Dependence on Thermodynamic Surface Properties and Relative Humidity," *J. Electrostat.*, vol. 3, pp. 16, 2003.
- [51] H. W. Gibson, F. C. Bailey, J. L. Mincer, & W. H. Gunther, "Chemical Modification of Polymers: XII Control of Triboelectric Charging Properties of Polymers by chemical Modification," *J. Polym. Sci. Polym. Chem. Ed.* vol. 17, pp. 2961-2974, 1979.
- [52] A. Alahmadi, "Influence of triboelectrification on friction coefficient," *Int. J. Sci. Eng*

- Res. vol, 5, pp. 22–29, 2014.
- [53] K. Hiratsuka, K. Hosotani, "Effects of friction type and humidity on triboelectrification and triboluminescence among eight kinds of polymers," *Tribol. Int.* vol, 55, pp. 87–99, 2012.
- [54] D.Y. Lee, J. Lee, J. Hwang, S.H. Choa, "Effect of relative humidity and disk acceleration on tribocharge build-up at a slider-disk interface," *Tribol. Int.* vol, 40, pp. 1253–1257, 2007.
- [55] J.A. Giacometti, O.N. Oliveira, "Corona charging of polymers," *IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul.* vol. 27, (5), pp. 924-943, 1992.
- [56] M. Kachi, M. Nemamcha, L. Herous, and L. Dascalescu, "Neutralization of charged insulating granular materials using AC corona discharge," *J. Electrostat.* vol. 69, pp. 296 - 301, 2011.
- [57] Z. Xu, L. Zhang, and G. Chen, "Decay of electric charge on corona charged polyethylene," *J. Phys.D: Appl. Phys*, vol. 40, pp. 7085-7089, 2007.
- [58] M. Goldman, A. Goldman., R.S. Sigmond, "The corona discharge, its properties and specific uses," *Pure and Appl. Chem.* vol. 57, (9), p. 1353-1362, 1985.
- [59] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, "Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators," *J. Electrostat.*, vol. 29, pp. 211-225, 1993.
- [60] A. Labergue, "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.
- [61] A. Reguig, "Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans e s différents types de configurations d'électrodes," Thèse de Doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [62] L.B. Loeb, "Electrical Coronas, Their basic physical mecanism," Univ. of Californiapress, Berkeley and Los Angeles, 1965.
- [63] M. Kachi, and L. Dascalescu, "Corona discharge in asymmetric electrode configurations," *J. Electrostat.* vol. 72, pp. 6-12, 2014.
- [64] A. Iuga, A. Samuila, M. Blajan, R. Belega, R. Morar, and L. Dascalescu, "Characterization of corona electrodes for electrostatic separation applications at small and large discharge gaps," in *Conf. Rec. IEEE IAS Annu. Meeting*, Seattle, WA, pp. 1967–1973, 2004.
- [65] M. C. Plopeanu, L. Dascalescu, B. Neagoe, A. Bendaoud, and P. V. Notingher, "Characterization of two electrode systems for corona charging of non-woven filter media," *J. Electrostat.* vol. 71, pp. 517- 523, 2013.
- [66] J. A. Giacometti, S. Fedosov, M. M. Costa, "Corona Charging of Polymers: Recent Advances on Constant Current Charging," *Brazilian J.Phys*, vol. 29, N°. 2, June 1999.
- [67] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Fatihou, A. F. Chirițescu, R. R. Rodrigues et L. Dascalescu, "Study of the Transient Regime of the Corona Discharge Generated by a

- Triode Electrode Arrangement," IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul, vol. 23, pp.692-698, 2016.
- [68] B. Tabti, "Contribution à la modélisation de dispositifs et la caractérisation de matériaux en électrotechnique," Thèse de Doctorat, Université de Béjaia, 2011.
- [69] P. Molinie, M. Goldman, J. Gattelat, "Surface Potential decay on corona-charged epoxy samples due to polarization process," J. phys. D, vol.28, pp.1601-1610, 1995.
- [70] J. Kindersberger, and C. Lederle, "Surface Charge Decay on Insulators in Air and Sulfurhexafluorid: Part II-Measurements," IEEE Trans. Dielec. Elect. Insul. vol.15, pp.948-957, 2008.
- [71] K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, and L. Dascalescu and Hamza Mellouki, "Surface potential decay of DC-corona-charged PET films on humid electrodes," J. Electrostat., vol. 78, pp. 17–21, 2015.
- [72] J. Bigarré, P. Hourquobie, L. doucet, J. Matallana, "New setup of surface potential decay," 3 rd Conf. French Society of Electrostatics, Toulouse, France, 2002.
- [73] Z. Ziari, S. Sahli and A. Bellel "Surface potential decay of low density polyethylene (LDPE) films under different corona discharge conditions," M. J. Condensed Matter., vol. 12, pp. 218–222, 2010.
- [74] P. Molinié, "Recherches en Electrostatique - Actualité d'une science ancienne et applications à la caractérisation des matériaux," Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, 2010.
- [75] E. A. Baum, T. J. Lewis, R. Toomer, "Further observations on the decay of potential corona charged polyethylene films," J. Phys. D: Appl. Phys., vol. 10, pp. 2525-2531, 1977.
- [76] B. Tabti, M. R. Mekideche, M. Plopeanu, L.M. Dumitran, L. Herous, et L. Dascalescu, "Corona charging and charge decay characteristics of nonwoven filter media," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 46, N° 2, pp.634-640, 2010.
- [77] L. Dascalescu, A. Mihalcioiu, A. Stochita, and P. V. Notingher, "Charge- Decay Characteristics of Granular Materials Forming Monolayers at the Surface of Grounded Electrodes," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 44, , pp. 20 - 24, 2008.
- [78] M. Remadnia, M. Nemamcha, L. Herous and L. Dascalescu, "Decay of the Electric Potential at the Surface of Corona-charged Uniform Layers of HIPS Granules," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 18, No. 2, 2011.
- [79] L. Herous, M. Remadnia, M. Kachi and M. Nemamcha, "Decay of Electrical Charges on Polyethylene Terephthalate Surface," J. Eng. Sci. Technol, vol.2, pp. 87-90, 2009.
- [80] P. Llovera and P. Molinie, "New methodology for surface potential decay measurements: application to study charge injection dynamics on polypropylene films," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. vol.11, pp. 1049-56, 2004.
- [81] B. Held, "Physique des plasmas froids," physique fondamentale et appliquée, Edition Masson, 1994.

- [82] N. Zouzou, K. Takashima, A. Mizuno, et G. Touchard, "Generation and application of wide area plasma," Chapter 8 of *Industrial plasma Technology: Application from Environmental to Energy Technologies*, Weinheim: Wiley-VCH, 2010.
- [83] U. Kogelschatz, "Dielectric barrier discharges: Their history, discharge physics and industrial applications," *Plasma Chem and Plasma Process*, vol. 23, No 1, pp. 1-46, 2003.
- [84] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau and G. Touchard, "Electrostatic Precipitation of Submicron Particles using a DBD in axisymmetric and planar configurations," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 16, No 2, pp. 343–351, 2009.
- [85] J.N. Lai, B. Sunderland, J.M. Xue, S. Yan, W.J. Zhao, M. Folkard, B.D. Michael, Y.G. Wang, "Study on hydrophilicity of polymer surfaces improved by plasma treatment," *Appl Surf Sci*, vol. 252, pp.3375–3379, 2006.
- [86] C.I. Butoi, N. M.Mackie, P.R. McCurdy, J.R.D. Peers, & E.R. Fisher, "Surface interactions of radicals during plasma processing of polymers," *Plasmas Polym*, vol. 4(1), p. 77-91, 1999.
- [87] C. Sarra-Bournet, "Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux," Thèse de Doctorat, Université Laval, 2007.
- [88] A.C. Aba'a Ndong, "Décharges à barrière diélectrique pulsées de volume et de surface appliquées à la précipitation électrostatique et à la régénération de surface," Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, pp.1-187, 2014.
- [89] M. F. Bekkara, "Contributions à l'étude du plasma froid. Applications au dépôt des couches minces et à la charge électrostatique des médias filtrants," Thèse de Doctorat, Université de Sidi-bel-abbes, 2017.
- [90] T. Shao, K. Long, C. Zhang, J. Wang, D. Zhang, P. Yan and S. Zhang, "Electrical characterization of dielectric barrier discharge driven by repetitive nanosecond pulses in atmospheric air," *J. Electrostat*, vol. 67, N° 2-3, pp. 215-221, 2009.
- [91] R. Gouri, "Optimisation électrique et géométrique d'un électrofiltre à barrière diélectrique en configuration fil-tube carré - application aux particules submicroniques," Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, pp.1-142, 2012.
- [92] N. Naudé, J. P. Cambronne, N. Gherardi and F. Massines, "Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure townsend discharge to a filamentary discharge," *J. Phys. D., Appl. Phys*, vol. 38, N° 4, pp. 530-538, 2005.
- [93] J. Zheng, J. Hao, X. Liu, Q. Gong, W. Liu, "TiN/TiCN multilayer films modified by argon plasma treatment," *Appl. Surf. Sci*, vol. 280, p. 764-771, 2013.
- [94] D. J. Wolthuizen and Y. T. Pei, "Influence of Plasma Treatments on the Frictional Performance of Rubbers," *Tribol. Lett.* pp. 303-311, 2012.
- [95] R. Sharma, S. Trigwell, M.K. Mazumder and R.A. Sims, "Modification of electrostatic properties of polymer powders by atmospheric pressure plasma treatment," *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, Ed. K.L. Mittal, vol. 3, pp. 25-37, 2004.
- [96] K. Takashima and T. Oda, "Antistatic Process of Dielectric Thin Films using Low

- Pressure Discharge," *J. Electrostat*, vol. 46, pp. 193, 1999.
- [97] H. Takeda and Y. Murata, "Change in Charging Characteristics of High Polymers due to Plasma Treatment," *Jpn J. Appl. Phys*, vol. 35, 4791, 1996.
- [98] J. Kodama, R. Forerch, N.S. McIntyre, and G.S.P. Castle, "Effect of plasma treatment on the triboelectric properties of polymer powders," *J. Appl. Phys.* vol. 74(6), p. 4026, 1993.
- [99] Carrega, Marc. "Aide-mémoire - Matières plastiques," Paris : Dunod, 2011.
- [100] www.metaux-detail.com
- [101] G. Richard, A. Benabderrahmane, K. Medles, A. Tilmatine, T. Zeghloul & L. Dascalescu, "Factors that affect tribocharging of PE granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD)," In *Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE* (pp. 1-4). IEEE, 2017.
- [102] M. Remadnia, "Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants," Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [103] L. Liu, W. Oxenham, A.M. Seyam, T. Theyson, "Effect of relative rubbing speed on the tribo-electrification of continuous filament yarn by stainless steel pins," *J. Text. Inst.* vol. 102, pp. 1075–1085, 2011.
- [104] H. Mellouki, L. Herous, B. Neagoe, Y. Prawatya, T. Zeghloul and L. Dascalescu, "Experimental Modeling of the Conformal-Contact Tribocharging of Polymers," *IEEE Trans. Dielect. Electr. Insul.*, vol. 25, no. 1, pp. 145–153, 2018.
- [105] W. G. Box Hunter, J. S Hunter, "Statistics for Experimenters," 2e edition, John Wiley and Sons. New-York, 2005.
- [106] L. Eriksson, E. Johansson, N. Kettaneh-Wold, C. Wikstöm, S. Wold, "Design of experiments principles and applications," Umeaa, Sweden: Umetrics, 2000.
- [107] L. Liu, A. M. Seyam, and W. Oxenham, "Electrostatic Generation And Control on Textiles," Thèse de Doctorat, Université de North Carolina State, 2013.
- [108] W. E. Morton, & J. W. Hearle "Physical Properties of Textile Fibres," 4th Edition. Woodhead Publishing, 2008.
- [109] S. V. Tewari, R. Chandra, S. K. Sharma, R. Sarathi, A. Sharma, and K. C. Mittal, "Surface potential decay of PMMA and POM in air," *Mater. Res. Express*, vol. 2, p. 45301, 2015.
- [110] H. Mellouki and L. Herous, "Tribo and Corona Charging and Charge Decay on Polymers Plates," *The 5th International Conference on Electrical Engineering*, pp. 1–5, 2017.
- [111] Y. Prawatya, B. Neagoe, T. Zeghloul, and L. Dascalescu, "Comparison between the surface-electric-potential characteristics of tribo- and corona-charged polymers," *Conf. Rec. IEEE/IAS Ann. Meet.*, Dallas, Tx., 2015.
- [112] Z. Xu, L. Zhang, G. Chen, "Decay of electric charge on corona charged poly-ethylene," *J. Phys.D : Appl. Phys*, vol. 40, pp. 7085-7089. 2007.
- [113] H,J. Wintle, "Charge Motion in Technical Insulators : Facts, Fancies and Simulations," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 10, No. 5. 2003.

- [114] A. Crisci, B. Gosse, J-P. Gosse, V. Ollier-Duréault, "Surface-potential decay due to surface conduction," *Eur. Phys. J. AP*, vol. 4, pp. 107-116, 1998.
- [115] M.B. Neagoe, "Modelisation experimentale de phenomenes electrostatiques et tribologiques aux interfaces solide/solide," Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, pp.1-145, 2017.
- [116] A. Bismarck, W. Brostow, R. Chiu, H. E. H. Lobland, and K. K. C. Ho, "Effects of Surface Plasma Treatment on Tribology of Thermoplastic Polymers," *Polym Eng Sci*, vol. 10, p. 1971–1976, 2008.
- [117] S. Gadkari, & S. Gu, "Numerical investigation of co-axial DBD: Influence of relative permittivity of the dielectric barrier, applied voltage amplitude, and frequency." *Phys. Plasmas*, vol. 24(5), p. 053517, 2017.
- [118] F. Massines, P. Ségur, N. Gherardi, C. Khamphan, et A. Ricard, "Physics and chemistry in a glow dielectric barrier discharge at atmospheric pressure: Diagnostics and modelling," *Surf. Coat. Technol*, vol. (174-175), pp. 8-14, 2003.
- [119] P. Bruggeman, & R. Brandenburg, "Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics," *J.Phys D: Appl.Phys*, vol. 46 (46), p. 464001, 2013.
- [120] A. Nadjem, M. Kachi, M.F. Bekkara, K. Medles, T. Zeghloul, L. Dascalescu. "Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment," *J. Electrostat.* vol. 86, p. 18–23, 2017.
- [121] M. F. Bekkara, L. Dascalescu, Y. Benmimoun, T. Zeghloul, A. Tilmatine, & N. Zouzou, "Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 81(1), p. 10801, 2018.
- [122] G. Richard, A. Nadjem, K. Medles, M. Kachi, T. Zeghloul, L. Dascalescu, "Tribocharging of PP granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD). Effect of exposure duration, voltage amplitude and frequency." *Proc. Electrostat. Soc. Am. Annu. Meet. ESA*, p. 8–11, 2017.
- [123] Y. Murata and Y. Hara, "Enhancement of frictional charging characteristics of polymer powder by plasma treatment," in *Proc. 36th IEEE-IAS Ann. Meeting*, 2, Rome, Italy, pp 847-850, 2000.
- [124] M. Chongqi, Z. Shulin, H. Gu, "Anti-static charge character of the plasma treated polyester filter fabric," *J. Electrostat*, vol. 68, 111, 2010.
- [125] R. Sharma, R. A. Sims and M. K. Mazumder, "Modification of Surface Properties of Polymeric Materials," *J. Arkansas Ac Sci*, vol. 56, p. 157, 2002.
- [126] Z. Zhang, "Surface Modification by Plasma Polymerization and Application of Plasma Polymers as Biomaterials," Thèse de Doctorat, Université de Mainz, pp.1-136, 2003.
- [127] M. Noeske, J. Degenhardt, S. Strudthoff, and, U. Lommatzsch, "Plasma jet treatment of five polymers at atmospheric pressure: surface modifications and the relevance for adhesion," *Int. J.Adhes. Adhes.* vol.24, pp. 171-177, 2004.

Liste des publications

Publications et communications

Articles parus dans des Revues Internationales

- **H. Mellouki**, L. Herous, B. Neagoe, Y. Prawatya, T. Zeghloul and L. Dascalescu, «Experimental Modeling of the Conformal-Contact Tribocharging of Polymers», *IEEE Trans. Diel. El. Insul.*, vol. 25, no. 1, pp. 145–153, 2018.
- K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, and L. Dascalescu and **Hamza Mellouki**, «Surface potential decay of DC-corona-charged PET films on humid electrodes», *J.Electrostat.*, vol. 78, pp. 17–21, 2015.

Communications avec actes

- **H. Mellouki** and L. Herous, «Tribo and Corona Charging and Charge Decay on Polymers Plates», pp. 1–5, 2017. *The 5th International Conference on Electrical Engineering- ICEE'17*, Boumerdes, Algeria, October 29th to 31st 2017.
- **H. Mellouki**, L. Herous, and, «Factors that influence the tribocharging of polytetrafluoroethylene (PTFE)», *3ème Conférence Internationale de Mécanique*, Annaba – Algérie, 26-27 Avril 2017.
- **H. Mellouki**, L. Herous, K. Rouagdia and M. Nemamcha, «Corona Charging and Charge Decay on Polyethylene Terephthalate Films (PET) », *La 10^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, CNHT 2016, USTHB – Algiers – Algérie*, 24-26 Mai 2016.
- **H. Mellouki**, B. Neagoe, Y. Prawatya, T. Zeghloul, L. Herous, L. Dascalescu, « Facteurs influents du processus de tribo-charge au contact conforme entre deux polymères », *Conférence SFE 2016, Société Française de l'électrostatique*, Université de Poitiers – France, 29-31 Aout 2016.
- K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, **H. Mellouki** and L. Dascalescu, «Factors that Influence the Surface Potential Decay on Polypropylene Film», *La 10^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension, CNHT 2016, USTHB – Algiers – Algérie*, 24-26 Mai 2016.