



HAL
open science

Étude des phénomènes tribologiques et électrostatiques couplés à la surface des polymères

Omar Tilmatine

► **To cite this version:**

Omar Tilmatine. Étude des phénomènes tribologiques et électrostatiques couplés à la surface des polymères. Energie électrique. Université de Poitiers, 2022. Français. NNT : 2022POIT2304 . tel-04079986

HAL Id: tel-04079986

<https://theses.hal.science/tel-04079986v1>

Submitted on 24 Apr 2023

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

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



THESE



Pour l'obtention du Grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE POITIERS
(Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées)
(Diplôme National – Arrêté du 25 mai 2016)

Ecole Doctorale : Sciences et Ingénierie en Matériaux, Mécanique, Énergétique et
Aéronautique

Présentée par :

Omar TILMATINE

ETUDES DES PHENOMENES TRIBLOGIQUES ET ELECTROSTATIQUES COUPLES A LA SURFACE DES POLYMERES

Directeurs de Thèse : **Aurélien FATU**

Thami ZEGHLOUL

Co-encadrant de Thèse : **Lucien DASCALESCU**

Soutenue le 13 / 12 / 2022 devant la Commission d'Examen

JURY

Sylvie DESCARTES	HDR	INSA Lyon, Laboratoire de Mécanique des Contacts et des Structures (LaMCoS)	Rapporteur
Laurentiu DUMITRAN	Prof	Université "Politehnica" de Bucarest, Department of Electrical Machines, Materials and Drives	Rapporteur
Sorin CANANAU	Prof	Université "Politehnica" de Bucarest	Examineur
Lucien DASCALESCU	Prof	Université de Poitiers	Examineur
Thami ZEGHLOUL	MCU HDR	Université de Poitiers	Examineur
Aurelian FATU	Prof	Université de Poitiers	Examineur



« Là où la volonté est grande, les difficultés diminuent. »

- Nicolas MACHIAVEL (1469-1527)

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce à la contribution de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma gratitude :

M. Aurélien FATU, je tiens vivement à vous remercier pour votre patience, votre disponibilité et surtout vos judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens à vous remercier pour la qualité de votre encadrement et pour toute l'aide que vous m'avez apportée et pour tout ce que vous avez fait pour moi.

Je voudrais aussi adresser toute ma reconnaissance au maître de ce mémoire, **M. Thami ZEGHLOUL** pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de ses connaissances. Grâce aussi à sa confiance j'ai pu m'accomplir totalement dans mes missions, et surtout ses précieux conseils, qui ont contribué à mener à bien ce travail. Il fut d'une aide très précieuse dans les moments les plus délicats

Également, je tiens à sincèrement remercier **M. Lucien DASCALESCU**, mon encadrant de thèse, qui m'a accompagné et guidé depuis le début des travaux. **M. DASCALESCU** a su trouver les mots justes pour m'orienter vers les bons axes de recherche, et a su trouver les mots d'encouragement, lorsque sa rédaction a requies plus de temps qu'initialement prévu.

J'exprimer mes remerciements aux membres du jury : **Mme. Sylvie DESCARTES**, **M. Laurentiu DUMITRAN** et **M. Sorin CANANU**, je vous suis très reconnaissant d'avoir évalué et examiné mes travaux.

Mes sincères remerciements vont également à **M. Karim MEDLES** et **M. Amar TILMATINE** pour leurs conseils, et tout leur soutien et toutes les aides qui m'ont apporté.

Un merci spécial pour mes chers parents et sœurs pour leurs soutiens et attentions. Ils m'ont permis de réaliser que la famille est sacrée. Ils étaient pour moi, une vraie source d'inspiration et ont été toujours à mes côtés durant les moments difficiles. Mes mots ne seraient jamais à la hauteur de l'amour et l'affection que vous m'avez témoignée tout au long de mes études.

Mes pensées vont aussi à tous mes amis à savoir **Ahlem BENABDERRAHMANE**, **Mohamed Sofiane BENDILMI**, **Imed ACHOURI**, **Mohamed MAAMMAR**, **François GRELON**, **Omar BENAÏSSA** et **Boualam AÏT MOUSSA** qui m'ont toujours motivé et encouragé. Je n'oublierais jamais nos fous rires et les bons moments passés ensemble, ces instants magiques seront gravés à jamais dans mon esprit.

Je dédie ce travail :

A ma famille ; Papa, Maman, Amel, Rahima et Sabrina.

je ne vous remercierai jamais assez, c'est grâce à vous que j'en suis arrivé là.

Je vous admire autant que je vous aime !

A tous les membres de ma famille et à tous mes amis

A vous cher lecteur

Table des matières

Introduction générale.....	9
I Chapitre I : Etat de l'art.....	13
I.1 Tribologie des polymères	13
I.1.1 Caractérisation générale des polymères	13
I.1.2 Caractéristiques tribologiques des polymères	15
I.2 Chargement triboélectrique des polymères	19
I.2.1 Mécanismes physiques	20
I.2.2 Série triboélectrique :	22
I.2.3 Facteurs influents sur la charge triboélectrique.....	24
I.2.4 Différentes applications du tribochargement électrostatique	27
I.3 Types de tribomètres utilisés.....	28
I.3.1 Dispositifs de génération de la charge triboélectrique	29
I.4 Modification de l'état de surface des polymères.....	34
I.4.1 Traitement de surfaces par plasma froid	34
I.4.2 Procédés à décharge à barrière diélectrique pour le traitement de surface des polymères.....	35
I.4.3 Avantages et inconvénients de l'utilisation des plasmas froids	36
I.5 Conclusions	37
II Chapitre II : Description des dispositifs utilisés et de la mise en œuvre expérimentale.....	42
II.1 Préparation et caractérisation des matériaux utilisés.....	42
II.1.1 Polymères utilisés.....	43
II.1.2 Caractérisation des échantillons utilisés.....	46
II.1.3 Préparation des échantillons	50
II.1.4 Dispositif de neutralisation de la charge électrique résiduelle	51
II.2 Banc expérimental de chargement par effet triboélectrique.....	52
II.2.1 Banc expérimental.....	53
II.2.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle	54
II.3 Banc pour la mesure du potentiel de surface.....	57
II.4 Dispositif de décharge à barrière diélectrique	59
II.5 Dispositif de contrôle de l'humidité et de la température ambiante	61
II.6 Conclusions	63

III	Chapitre III : Modification des propriétés surfaciques et triboélectriques des polymères par une décharge à barrière diélectrique	66
III.1	Procédure expérimentale	69
III.1.1	Cellule de traitement par DBD	69
III.1.2	Matériaux	70
III.1.3	Méthode et procédure	71
III.2	Étude de l'influence des différents paramètres du traitement DBD atmosphérique sur la rugosité de surface	73
III.2.1	Influence de la durée de traitement DBD	73
III.2.2	Influence du nombre de diélectriques	75
III.2.3	Influence de la distance inter-électrodes	77
III.2.4	Influence de la haute tension	79
III.2.5	Influence de la fréquence de la tension appliquée	80
III.2.6	Influence de l'épaisseur du diélectrique (verre)	81
III.3	Etude de l'effet du traitement par plasma froid sur le niveau du potentiel électrique généré par le tribochargement du polypropylène	83
III.3.1	Potentiel électrique obtenu par tribochargement à la surface d'un échantillon non traité	84
III.3.2	Potentiel électrique obtenu par tribochargement à la surface d'un échantillon traité par DBD	86
III.3.3	Corrélation entre la rugosité générée par DBD et le potentiel électrique généré par tribochargement	89
III.4	Conclusions	90
IV	Chapitre IV : Etude de l'influence de l'humidité relative sur le comportement triboélectrique des polymères.....	93
IV.1	Procédure expérimentale	93
IV.2	Etude de l'effet de l'humidité relative sur la génération du potentiel électrique surfacique du PP et du PVC	96
IV.2.1	Humidité basse (10 % - 30 %)	97
IV.2.2	Humidité moyenne (40 % - 60 %)	99
IV.2.3	Humidité haute (70 % - 80 %)	101
IV.3	Etude du déclin de potentiel du PP et du PVC après tribochargement sous différents taux d'humidité.....	106
IV.4	Conclusions	109
	Conclusions générales	110
	Perspectives.....	112

Tables des matières

Table des figures.....	114
Bibliographie.....	115

Titre : *Etude des phénomènes tribologiques et électrostatiques couplés à la surface des polymères.*

Résumé : Lorsque deux matériaux sont frottés l'un contre l'autre ou simplement mis en contact, ils acquièrent chacun une charge électrique de signes opposés. Ce mécanisme d'acquisition de charge, connu depuis l'antiquité et portant le nom de triboélectricité, n'est toujours pas totalement maîtrisé. Différentes explications et plusieurs théories et hypothèses contradictoires existent. C'est pour cela que les recherches sur ce sujet doivent toujours continuer et essayer d'élucider plusieurs mystères et répondre à différentes questions qui persistent autour de la triboélectrification. Le travail mené dans le cadre de cette thèse de doctorat a eu comme un de ses objectifs l'étude de l'influence sur la tribocharge de différents facteurs (temps de traitement, épaisseur du diélectrique, distance inter-électrodes...etc.) de la décharge à barrière diélectrique (DBD) sur l'évolution de la rugosité de surface de plaques de polypropylène exposées à un plasma froid. Ce travail a visé également à mettre en évidence les corrélations qui pourraient exister entre la modification de la rugosité et le potentiel électrique généré par effet triboélectrique à la surface du polypropylène traité par DBD atmosphérique. En effet, le traitement DBD a une influence directe sur la rugosité et sur le potentiel électrique de surface : l'exposition au plasma froid conduit à une surface plus rugueuse, qui se charge mieux par effet triboélectrique que la surface initiale. L'influence de l'humidité ambiante sur le comportement triboélectrique des polymères a également été étudiée, confirmant son influence sur le niveau de charge ainsi que son signe.

Mots-clés : Charge triboélectrique, potentiel électrique de surface, matériaux polymères, décharge à barrière diélectrique, humidité relative.

Title: *Study of tribological and electrostatic phenomena coupled to the surface of polymers.*

Abstract: When two materials are rubbed against each other or simply brought into contact, they each acquire an electrical charge of opposite signs. This mechanism of charge acquisition, known since antiquity and called triboelectricity, is still not completely mastered. Different explanations on this phenomenon and several theories and contradictory hypotheses exist. This is why the research on this subject must always continue and try to elucidate several mysteries and to answer different questions that revolve around the triboelectrification. The work carried out in this PhD thesis, had as one of its objectives, the study of the influence of the various factors (treatment time, dielectric thickness, inter-electrode distance...etc.) of the dielectric barrier discharge (DBD) on the evolution of the surface roughness of polypropylene plates exposed to a cold plasma. This work also aims to highlight the correlations that could exist between the roughness modification and the electric potential generated by triboelectric effect on the surface of polypropylene treated by atmospheric DBD. Indeed, the atmospheric DBD treatment of the polymer has a direct influence on the roughness and electrical potential of the surface: the exposure to cold plasma leads to a rougher surface, which charges better by triboelectric effect than the initial one. The influence of ambient humidity on the triboelectric behavior of the polymers has also, confirming its influence on the charge level as well as its sign.

Keywords: Triboelectric charge, electrical surface potential, polymer materials, dielectric barrier discharge, relative humidity.



« Sans la curiosité de l'esprit, que serions-nous ? Telle est bien la beauté et la noblesse de la science : désir sans fin de repousser les frontières du savoir, de traquer les secrets de la matière et de la vie sans idée préconçue des conséquences éventuelles. »

- Marie Curie (1867 – 1934)

Introduction générale

Aujourd'hui, le marché international offre une grande variété de matériaux isolants qui, en raison de leurs bonnes propriétés mécanique, électriques et thermiques, en plus de leurs faibles couts, sont devenus indispensables et largement utilisés dans plusieurs secteurs tels que l'industrie automobile, électrique et électronique [1-6].

Lorsque deux matériaux différents sont frottés l'un contre l'autre, ou simplement mis en contact, ils acquièrent chacun une charge électrique de signes opposés ; ce mécanisme d'acquisition de charge, connu depuis l'antiquité et portant le nom de triboélectricité, est à la base du principe de fonctionnement de plusieurs tribochargeurs et séparateurs triboélectrostatiques [7-11].

Prenant en considération que cette charge a des effets positifs mais aussi négatifs, elle peut engendrer de graves accidents au niveau des installations industrielles et entraîner des dégâts économiques importants et des pertes humaines [12,13]. Néanmoins, il existe multiple exemples d'utilisations pratiques de cette charge par exemple dans les photocopies, les imprimantes laser, la peinture par pistolet, la séparation des déchets...etc. [10,14,15]

Les charges statiques sont également une source utile d'énergie électrique et les chercheurs les ont utilisés pour développer des générateurs à frottement et des nanogénérateurs triboélectriques. Afin de contrôler leurs effets et de mieux les utiliser, il est important de comprendre et de quantifier les charges générées par l'effet triboélectrique dû au contact entre les polymères. De plus, une meilleure compréhension des mécanismes impliqués dans leur génération et dissipation est nécessaire.

La chimie de surface du polymère est l'un des facteurs les plus importants déterminant le comportement électrostatique. Les caractéristiques géométriques (les rugosités) de surface de ces polymères ont également une grande influence sur leurs propriétés triboélectriques. Le traitement de surface des polymères est d'une importance considérable dans certaines applications industrielles, car il permet de modifier les propriétés triboélectriques et géométriques de la surface traitée [16-18].

Pour mieux comprendre le comportement triboélectrique des polymères, il est également essentiel de contrôler l'humidité. En effet, les conditions de l'air ambiant jouent un rôle

Introduction générale

important dans le transfert de charge entre les matériaux [19,20], mais l'impact de ce facteur météorologique n'a pas été suffisamment étudié. Une meilleure maîtrise de ce sujet est nécessaire pour une meilleure compréhension du tribochargement des polymères.

Le travail de cette thèse fait partie du projet LABEX INTERACTIFS abordant une problématique pluridisciplinaire qui associe les domaines de la mécanique, des matériaux et de l'énergie pour maîtriser les phénomènes physiques aux interfaces fluide-solide. Il est basé sur les connaissances et la maîtrise de l'Institut PPRIME dans les domaines de la physique et de la mécanique des surfaces, de l'électro-hydrodynamique et du transfert de chaleur et de masse dans les milieux fluides et solides.

Ce travail à caractère expérimental, consiste à étudier l'influence des facteurs conditionnant le tribochargement (la dimension des échantillons, leur forme, leur configuration, ainsi que les différents états de surface) en quantifiant la charge générée aux interfaces en frottement. D'autres types de facteurs seront examinés, comme l'humidité et la température ambiante. Par ailleurs, un traitement de surface des échantillons par une décharge à barrière diélectrique (DBD) sera réalisé pour étudier son influence sur le chargement triboélectrique. La mesure du potentiel triboélectrique se fera à l'aide d'une sonde électrostatique après avoir effectué le tribochargement des échantillons.

Ce mémoire de thèse est organisé autour de quatre chapitres. Pour mieux décrire l'état actuel de la recherche dans le domaine de la triboélectricité, le premier chapitre est une synthèse bibliographique de l'état de l'art. 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 ainsi que les différents chargeurs utilisés dans ce domaine. Pour finir, quelques notions sur le traitement des surfaces par la technique de DBD ont été abordées.

Dans le deuxième 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.

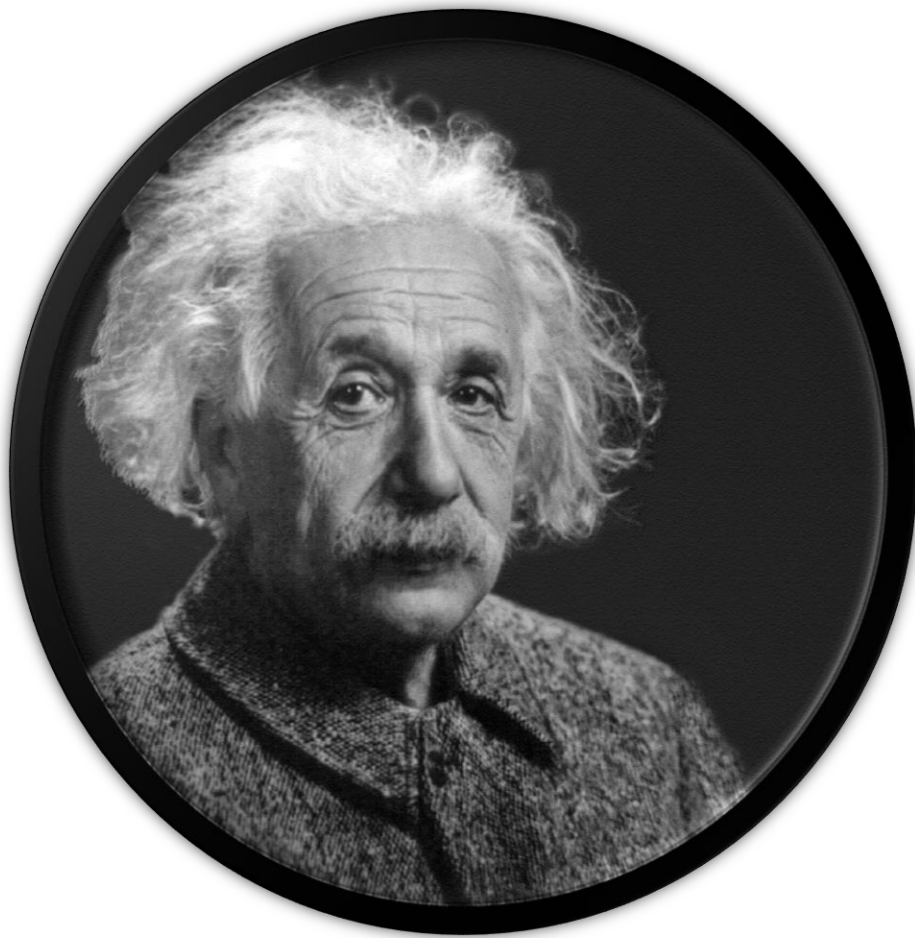
Une étude sur la modification des propriétés surfaciques et triboélectriques des polymères par une décharge à barrière diélectrique fait l'objet du troisième chapitre. Différents paramètres de la cellule de génération de plasma froid ont été modifiés pour pouvoir observer l'influence

Introduction générale

de ces derniers sur le comportement triboélectrique des polymères ainsi que sur les surfaces traitées.

Le quatrième chapitre a été dédié à l'étude de l'influence de l'humidité relative sur le comportement triboélectrique des polymères. Deux types de travaux ont été conduits. Le premier avait pour but de quantifier sous différentes humidités relatives la valeur et le comportement de la génération du potentiel électrique sur la surface des polymères après tribochargement. Le deuxième consistait à observer le comportement du déclin de potentiel sous différents pourcentages de l'humidité ambiante après tribochargement.

Une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus clôture ce mémoire. Elle contribue à l'identification des paramètres qui influent sur la génération de la charge triboélectrique. La charge tribo-électrique dépend des conditions dans lesquelles se produit le mouvement relatif des matériaux en contact et de l'état de la surface qui peut être modifiée par l'exposition à l'action des décharges de barrière diélectrique, et le comportement triboélectrique des polymères varient selon leur milieu d'utilisation. Cette conclusion générale viendra à la fin du mémoire, est accompagnée d'un résumé des principales contributions de cette thèse dans ce domaine d'étude.



« La valeur d'un homme tient dans sa capacité à donner et non dans sa capacité à recevoir. »

- Alber Einstein (1879 – 1955)

Chapitre I : Etat de l'art

Le chargement par effet triboélectrique est un phénomène de surface complexe, dont la compréhension n'est toujours pas maîtrisée. Les chercheurs qui ont étudié ce phénomène ont obtenu des résultats parfois contradictoires. Cependant, il est indéniable que l'effet triboélectrique dépend de nombreux facteurs : la nature du frottement, la température des objets en contact, l'état de surface des échantillons et l'humidité ambiante semblent avoir l'influence la plus significative sur la charge générée [21-26]. Une analyse faite par l'un des experts dans le domaine, Peter Castle [27] indique comme principale raison la complexité du processus physique [28,29], qui est fortement influencé par la variabilité des conditions de surface (type de prétraitement, présence de rugosités, de particules ou de sédiments, etc.) et des propriétés globales des échantillons (température, humidité, « historique »), ainsi que par la nature du contact (charge statique ou dynamique, contact ponctuel, linéaire ou plan) et la pression exercée entre les objets.

Dans la première partie de ce chapitre nous allons expliquer les raisons de l'intérêt porté au processus de chargement triboélectrique des polymères. Nous allons examiner et discuter ensuite les mécanismes physiques de ce processus et les solutions techniques développées pour le mettre en œuvre. Nous présenterons également le concept de traitement de surface des polymères par des procédés à plasma froid. Enfin, en s'appuyant sur l'état de l'art que nous avons fait, nous allons exposer les problèmes qui feront l'objet de nos recherches.

I.1 Tribologie des polymères

I.1.1 Caractérisation générale des polymères

Les polymères sont des substances composées de longues chaînes moléculaires appelées macromolécules [30]. La structure du polymère est produite par polymérisation. L'agencement des unités monomères et les différents types de chaînes qui peuvent être synthétisés conduisent à une classe caractéristique de matériaux.

La polymérisation est le processus qui consiste à relier des unités monomères en de longues structures en forme de chaîne. Différentes macromolécules, ou chaînes de molécules, peuvent être disposées en une structure en réseau par des enchevêtrements qui interagissent par de faibles forces de Van der Waals [31]. (Figure I.1).

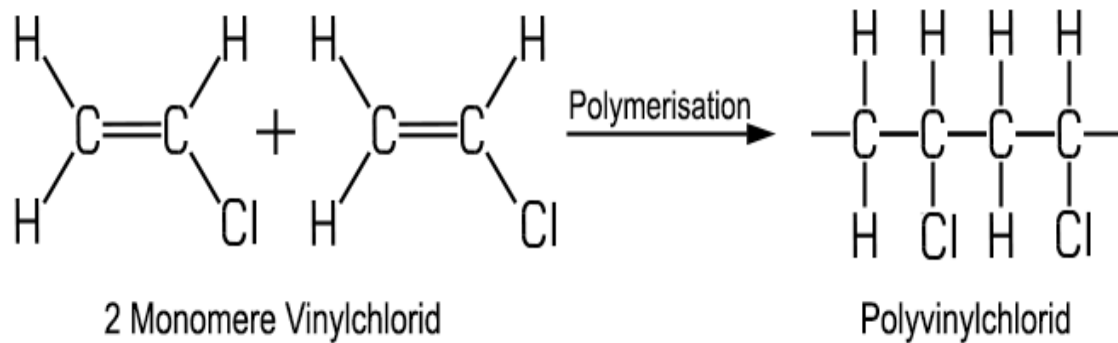


Figure I.1 Schéma de Polymérisation du PVC [32].

L'utilisation des polymères et de leurs dérivés a fortement augmenté dans l'industrie en raison de leur faible coût de fabrication et de leurs bonnes propriétés électriques (résistivité, conductibilité, permittivité), thermiques (conductivité, dilatation, diffusivité), mécaniques (élasticité, résistance aux chocs, faible frottement et forte résistance). Ils sont de plus en plus utilisés dans la conception de pièces mécaniques dotées de propriétés autolubrifiantes et d'un faible coefficient de frottement ; ils sont de préférence utilisés comme composants à glissement sec ou lubrifié [33-40].

Ces 20 dernières années, l'industrie des plastiques a connu l'une des croissances les plus rapides au monde [41-43]. En raison de l'utilisation généralisée de ces matériaux, notamment dans les industries électriques et électroniques [44,45], la construction et les travaux publics, les textiles, les transports et la fabrication des composants mécaniques [46-48], la production totale de polymères atteint désormais des centaines de millions de tonnes par an (Figure I.2).

Le remplacement de plus en plus fréquent des pièces métalliques par des pièces en polymère peut s'expliquer par leur faible densité qui entraîne une réduction de poids et parfois aussi par leur faible conductivité thermique (allant de 0.1 à 0.5 $W.m^{-1}K^{-1}$ quand, pour les métaux, elle va de 20 à 418 $W.m^{-1}K^{-1}$) [49]. Cependant, pour certaines applications, cette faible conductivité thermique peut également être pénalisante.

Les polymères, qui peuvent être amorphes ou semi-cristallins, ont des prix plus ou moins élevés essentiellement en fonction de leurs propriétés thermiques (Figure I.2).

Le marché des polymères

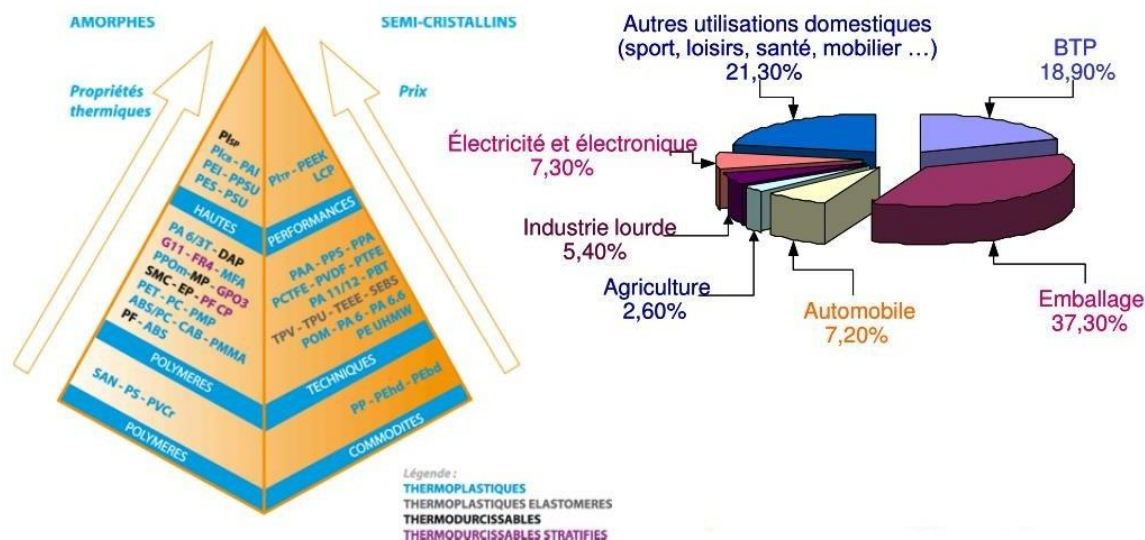


Figure I.2 Les différents groupes de thermoplastiques classés selon leurs propriétés thermiques ainsi que les différents secteurs d'utilisation des polymères [50].

I.1.2 Caractéristiques tribologiques des polymères

L'utilisation des polymères dans les contacts glissants ne doit pas ignorer l'effet triboélectrique. En raison du frottement avec un autre matériau, la surface du polymère génère des charges statiques qui peuvent s'accumuler lors des cycles de frottement continue jusqu'à ce qu'elle atteigne une certaine valeur de saturation, sans pouvoir s'échapper facilement vers le sol [51], comme c'est le cas des métaux. La répartition inégale de cette charge dépend du type de frottement et peut s'étendre au-delà de la zone de contact [52]. Cela affecte dans une certaine mesure le comportement d'usure des polymères exposés au frottement sec. Un contact continu entre polymères générera une charge électrique sur leurs surfaces, s'ajoute à cela un faible coefficient de conductivité, ce qui ne favorise pas l'évacuation de la chaleur et aura tendance à augmenter la température des polymères. La température locale à l'interface peut être sensiblement plus élevée que celle de l'environnement et peut également être augmentée au niveau des contacts d'aspérité par des « flashes » ou des « points chauds » transitoires. Par conséquent, la température exerce une influence sur l'usure des polymères. [36,53].

La tribologie des polymères est l'étude des interactions entre les surfaces de glissement, qui sont généralement en contact avec un lubrifiant. Elle a été largement étudiée depuis le milieu du 20ème siècle et continue de l'être aujourd'hui. Il est important de reconnaître la nature multidisciplinaire de la tribologie, qui fait appel à des connaissances de la science des matériaux,

de la chimie et la physique des surfaces, de la mécanique des solides et des surfaces, de la thermique, de la thermodynamique et de la thermochimie.

La tribologie est étudiée sous trois aspects : le frottement (c'est-à-dire la résistance au déplacement appliqué), l'usure qui provoque la perte de matière et la lubrification qui consiste à interposer un fluide entre les deux corps en contact [54,55]

a) Le frottement

Le frottement est une force résistive agissant sur un corps et qui arrête ou ralentit le glissement de ce dernier par rapport à un deuxième corps ou une surface. Le mouvement relatif des surfaces peut être exprimé sous la forme d'une combinaison de glissement, de roulement et de rotation. La force agit tangentiellement à la surface aux points de contact et est dirigée pour s'opposer au mouvement relatif. (Figure I.3).

Il existe différents régimes de frottement, notamment sec, lubrifié, mixte et limite. L'ampleur du frottement est généralement exprimée par un coefficient de frottement (μ ou f), qui est le rapport entre la force nécessaire pour démarrer ou maintenir un mouvement tangential et la force normale qui maintient en contact les deux surfaces [56,57].

En France, en 1699, Guillaume Amontons a formulé les règles du frottement après avoir étudié le glissement à sec entre deux surfaces planes. Ces observations ont été confirmées par Charles Augustin Coulomb, qui a formulé les trois lois du frottement : (1) la force de frottement qui résiste au glissement à une interface est directement proportionnelle à la charge normale ; (2) la quantité de force de frottement ne dépend pas de la surface de contact apparente ; (3) la force de frottement est indépendante de la vitesse une fois que le mouvement commence. En outre, il a fait une distinction claire entre le frottement statique et le frottement de glissement [58,59].

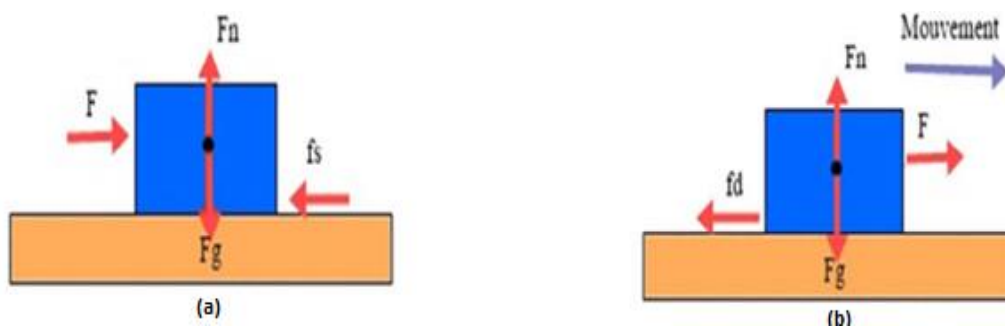


Figure I.3 Frottement statique (a) et dynamique (b)

La loi de frottement la plus fréquemment utilisée aujourd'hui est la loi d'Amontons-Coulomb, obtenue à partir des recherches expérimentales d'Amontons (1699) et de Coulomb (1781). La première loi d'Amonton dit que tant que la force tangentielle (F_T) est inférieure à une force seuil, aucun glissement ne se produit. Lorsque la force tangentielle atteint cette valeur, le corps glisse, le coefficient de frottement est alors défini comme suit :

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (1.1)$$

Le rapport F_T/F_N de chaque paire de matériaux est considéré comme constant. Cependant, sa valeur dépend d'une multitude de facteurs tels que la rugosité des surfaces de contact, la nature du contact (sec, lubrifié) et des lubrifiants. Par ailleurs, le coefficient de frottement μ est indépendant de la pression de contact et de l'aire des surfaces concernées, (cependant, contrairement au frottement sec, le frottement lubrifié dépend bien de l'aire de contact) [60,61].

Le comportement des polymères présente des caractéristiques spécifiques, dont certaines sont décrites par Briscoe [62]. Le concept se compose de trois éléments de base liés au frottement : (1) l'adhérence, la liaison d'interface, leurs types et leur résistance ; (2) le cisaillement et la rupture des matériaux de frottement dans et autour de la zone de contact ; (3) la zone de contact réelle [63].

Coulomb a observé que la force de frottement statique augmente avec le temps ; cette dépendance temporelle varie selon le matériau. [59,64]. L'indépendance du coefficient de frottement par rapport à la force normale a été confirmée pour l'acier en contact avec l'aluminium électropoli par une force normale appliquée dans la gamme de 10 mg à 10 kg. Cela signifie qu'avec un matériau métallique souple, le coefficient de frottement est resté pratiquement constant même si la charge a varié d'un facteur de près de 10^6 . Dans le cas des polymères et des élastomères, la plage des valeurs de charge pour lesquelles le coefficient de frottement est constant est encore plus grande. Par conséquent, le comportement de ces matériaux est en accord notamment avec la loi d'Amontons-Coulomb [63].

Les caractéristiques de contact et de frottement dépendent fortement de l'état de la surface : ces caractéristiques dominent les propriétés volumétriques. Sous l'action de la charge, une déformation se produit autour du point de contact pour former une zone de contact dont la taille est encore petite par rapport aux surfaces globales des corps concernés.

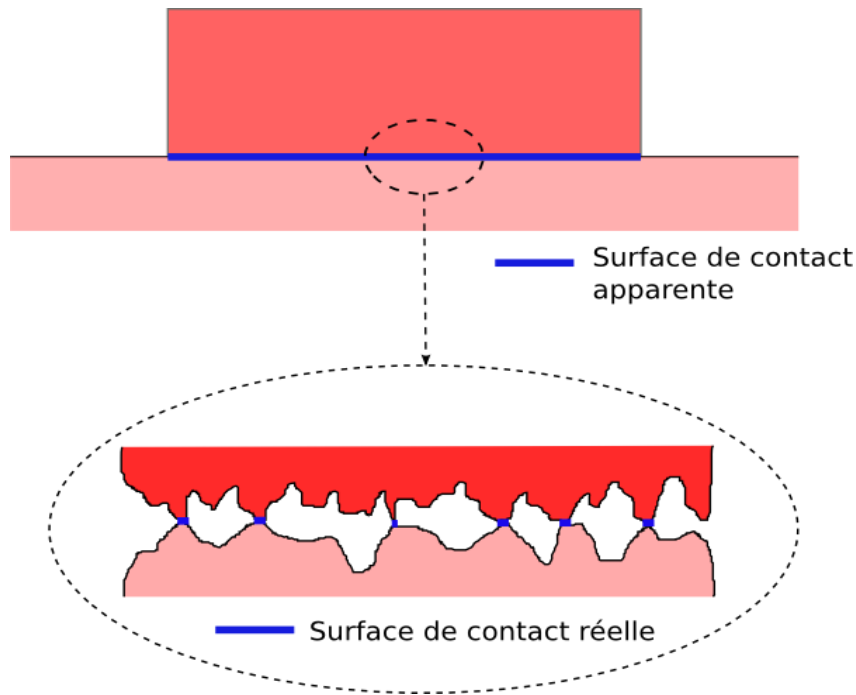


Figure I.4 Schéma de l'aire de contact apparente par rapport à l'aire de contact réelle [67].

La rugosité joue un rôle important car elle détermine l'aire réelle de contact et donc la pression sur la surface. Le contact réel ne se produit que sur les pointes des aspérités. [65,66].

La deuxième loi de Coulomb indique que la force de frottement est indépendante de l'aire de contact entre deux matériaux, puisque la surface de contact réelle n'est pas celle qui est apparente macroscopiquement. Dans un contact parfait, l'ensemble des points de la surface du premier objet touchent l'ensemble des points de la surface du deuxième objet : l'aire réelle de la surface de contact est celle que l'on voit de l'extérieur [67] (Figure I.4).

b) L'usure des polymères

L'usure des polymères peut être classée selon plusieurs critères (Figure I.5). Chaque mécanisme d'usure a ses propres lois. Il est difficile de distinguer les différents types d'usure car ils sont interdépendants et se produisent rarement individuellement. L'usure dépend de diverses propriétés du matériau, telles que le module d'élasticité, la résistance à la traction et l'allongement à la rupture (ténacité), qui varient selon le type de polymère. Généralement, la combinaison d'une résistance à la traction élevée et d'un allongement à la rupture élevé peut améliorer la résistance à l'abrasion du polymère et certains polymères thermoplastiques linéaires à microstructures partiellement cristallines présentent une meilleure résistance à l'abrasion que les thermoplastiques thermodurcissables ou amorphes [68].

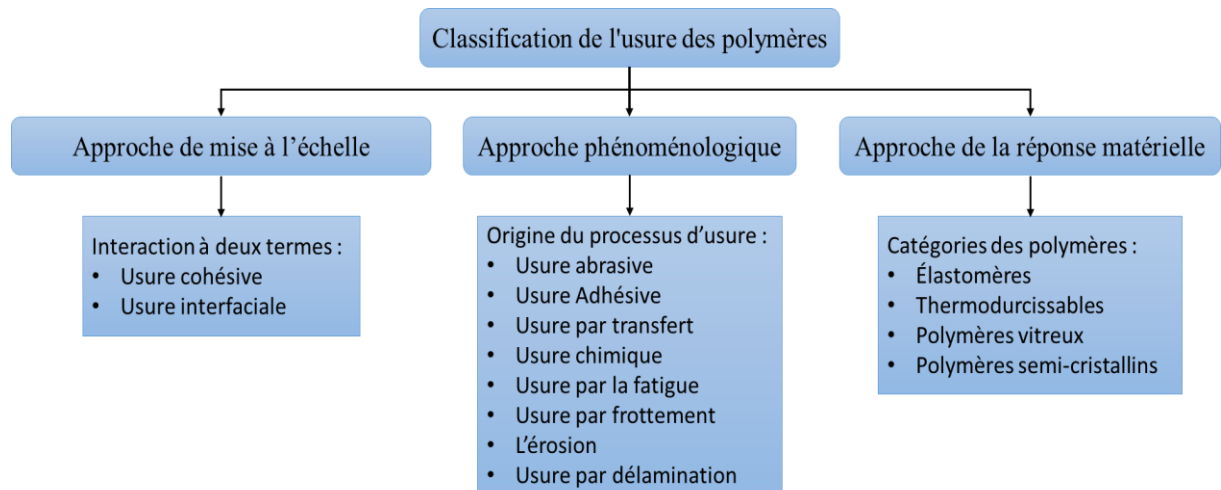


Figure I.5 Approche simplifiée de la classification de l'usure des polymères [68].

Ces observations sont en accord avec le point suivant : pour les polymères, la dureté de surface n'est pas le facteur le plus déterminant de la résistance à l'usure. En général, l'usure par abrasion, par adhésion et par fatigue sont les plus représentatives du comportement de frottement des polymères [57,60].

I.2 Chargement triboélectrique des polymères

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 [69].

Bien qu'il y ait eu une longue histoire depuis les premières expériences réalisées sur la charge électrique, l'électrostatique est toujours une discipline scientifique en évolution, car de nombreux problèmes n'ont pas été compris et résolus, ce qui conduit à des conclusions pas toujours cohérentes. Par exemple, Schein a obtenu trois résultats différents concernant la charge générée en frottant du Téflon avec de l'or [70]. Il existe donc de nombreuses controverses scientifiques dans ce domaine [71].

Ces questions sur la nature des charges dans l'isolant et le mécanisme par lequel elles sont générées par effet triboélectrique ne sont toujours pas résolues. Cependant, pour les semi-conducteurs et les métaux, le concept de base de l'électricité statique a été établi. Lorsque deux métaux avec des travaux de sorties différents entrent en contact, les électrons migrent à travers l'interface, créant une différence de potentiel entre eux.

I.2.1 Mécanismes physiques

La charge par effet triboélectrique ou par frottement est le phénomène qui décrit un transfert de charge entre deux objets électriquement neutres et qui sont frottés l'un contre l'autre ou simplement mis en contact (Figure I.6). Les deux corps auront alors des charges électriques de signes opposés. La charge résultante persiste après la séparation et un nouveau contact crée un nouveau transfert de charge. La charge triboélectrique est difficile à prévoir en raison de la complexité des facteurs qui la contrôlent tels que la nature des matériaux, leurs rugosités, la pression et la vitesse relative, la température et l'humidité de l'environnement [27,72-74]

La première référence scientifique au phénomène de triboélectrification est faite par Thalès de Milet (640-546 avant J.-C.), qui a frotté l'ambre avec plusieurs matériaux tels que des tissus de soie, de la fourrure de chat ou de la laine, puis a utilisé l'ambre chargé électrostatiquement pour attirer d'autres matériaux comme des fils légers, de la paille, du foin, des feuilles séchées, des plumes et de la charpie [75-77]

L'effet triboélectrique peut être expliqué par plusieurs mécanismes physiques découlant du transfert d'électrons, d'ions ou de matière existante lors du contact. Le concept de polarité des charges a été introduit par Du Fay en 1733 et les termes "positif" et "négatif" ont été inventés par Franklin en 1740. La loi d'interaction des charges a été formulée en 1785 par Charles Coulomb. L'ampleur du transfert de charge augmente généralement avec la rugosité du contact, la surface de contact et la vitesse de contact [68,78,79].

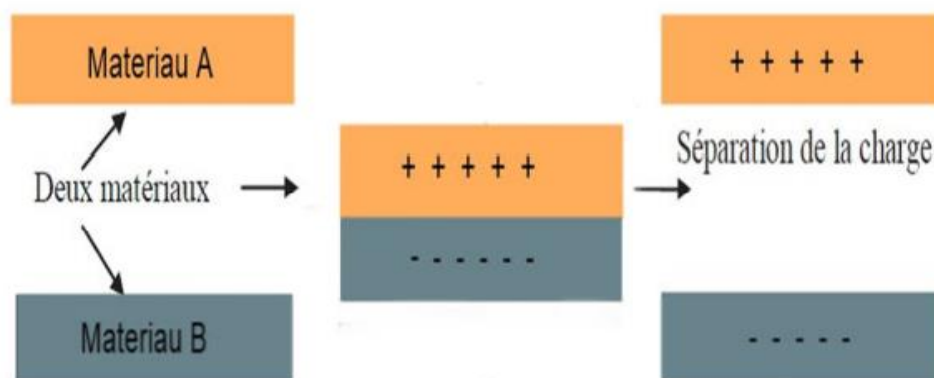


Figure I.6 Transfert de charge par effet triboélectrique entre deux matériaux [80].

Les mécanismes de génération de charges électrostatiques sont bien connus lorsqu'il y a contact entre deux métaux ou entre un métal et un isolant ; ils restent généralement inconnus pour les interfaces isolant/isolant.

Harper [81] a passé en revue divers mécanismes de transfert de charges électriques entre les matériaux. Selon lui, la charge de contact d'un isolant fait intervenir des ions plutôt que des électrons. Des chercheurs ont ensuite montré que la charge triboélectrique qui se produit par contact entre les métaux est causée par le transfert d'électrons [27], mais les porteurs de charge dans le contact entre les polymères ne sont pas entièrement identifiés. D'autres scientifiques ont prouvé que le transfert de charge entre les polymères implique aussi le transfert d'électrons. Liu et Bard ont appuyé cette hypothèse par des expériences sur la charge du téflon [82]. Cette théorie avait été aussi validée par Davies [83] et après lui par Fuhrmann [84,85] qui ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la charge et le travail de sortie du métal.

Le travail de sortie est l'énergie nécessaire pour retirer complètement un électron de la surface d'un matériau. Cette énergie est une mesure de l'attachement d'un matériau particulier à ses électrons, c'est-à-dire de la diminution de l'énergie de l'électron lorsqu'il est présent dans le matériau par rapport à celle qu'il a lorsqu'il est complètement libre.

Ceci implique que les électrons sont les principales espèces transférées lors de l'électrification par contact. Néanmoins, Akande et Lowell [86] ont remarqué que le transfert de charge n'a rien à voir avec le travail de sortie du métal pour certains polymères. De plus, le travail de sortie des polymères mesuré par différents chercheurs n'est pas le même. Whitesides et McCarthy [87] ont fourni des preuves que le transfert de charge dans les polymères est possible en raison du remplacement des ions.

Cependant, il n'y a pas de doute que le contact de deux objets provoque le transfert de matière de l'un à l'autre ; non seulement des particules de poussière, mais aussi de véritables fragments des deux objets. Castle [27] a démontré que bien que le transfert de matière entre deux corps ne soit pas le principal mécanisme de charge, cela peut y contribuer. Le transfert de matière entre les surfaces des objets en contact explique la double polarité des charges électrostatiques coexistant sur une même surface [57].

Lorsque deux matériaux isolants sont en contact, l'échange d'électrons se produit entre différents niveaux d'énergie libre sur les surfaces des deux matériaux. Dans le même matériau, la théorie suppose que les électrons dans un état de haute énergie (état occupé) ne peuvent pas tomber seuls à des niveaux d'énergie inférieurs (état vide) à travers des transitions [88].

Les travaux de Lowell et Truscott [89], basés sur l'observation que deux isolants se chargent par effets triboélectriques ont ouvert la voie à la compréhension des mécanismes impliqués. Dans le chargement entre deux matériaux, Harper (1957) a développé la théorie électrostatique,

qui a été confirmé par les expériences de Lowell et ses collègues en 1980. Lowell et Rose Innes [52] ont étudié la charge triboélectrique de divers matériaux. Ils sont arrivés à la même conclusion des recherches cités précédemment : il existe trois mécanismes pouvant être responsables de la génération de charge après un frottement entre deux matériaux.

En conclusion, la charge par contact peut être due au transfert d'électrons ou d'ions (positifs ou négatifs), ou d'une surface à l'autre, comme c'est le cas du frottement entre métal et plastique ; des particules microscopiques contenant une charge électrique peuvent se détacher de la surface du polymère et migrer vers la surface en métal, transformant ainsi le signe électrique du métal frotté. (Figure I.7). Le phénomène est compliqué lorsque l'un des matériaux est un isolant car on ne connaît pas les porteurs de charge qui peuvent être transférés entre les surfaces. Contrairement aux métaux conducteurs, les électrons dans l'isolant n'ont pas un seul niveau d'énergie, un électron dans un isolant dépend des impuretés à sa surface et de la structure chimique et atomique des matériaux.

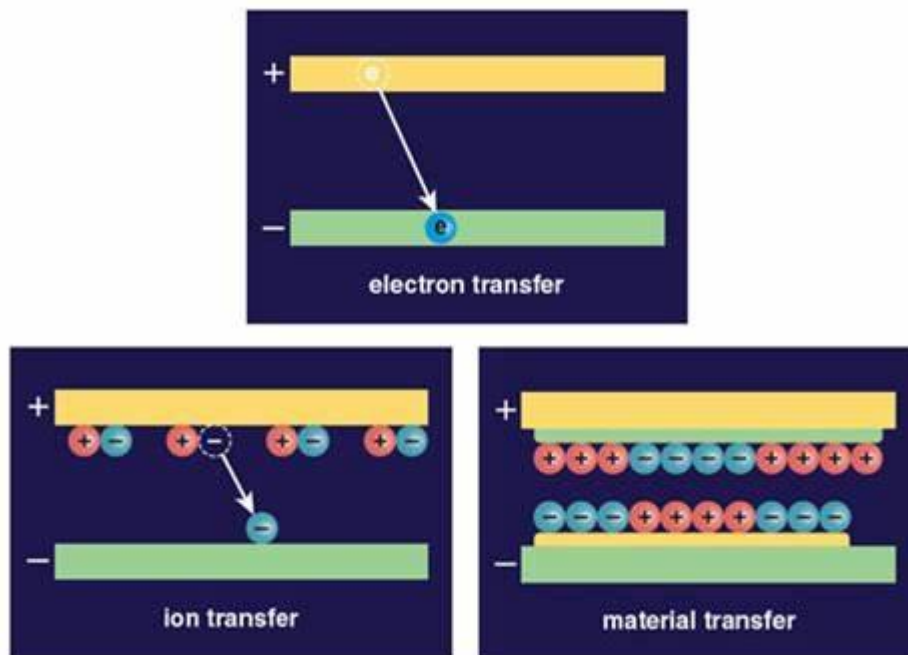


Figure I.7 Mécanismes possibles de transfert de charge [56].

I.2.2 Série triboélectrique :

Afin de prédire la polarité des matériaux chargés par contact, un classement des matériaux, appelé « série triboélectrique » a été établi. Selon les observations, il était évident que la polarité de la charge était tributaire des propriétés du matériau [90]. Shaw a réalisé la première série triboélectrique par des expériences en 1917. Il a utilisé un électroscope pour mesurer la charge

à la surface de divers matériaux chargés par frottement [91]. Cette classification permet de mettre en ordre les différents matériaux du plus chargé positivement au matériau le plus chargé négativement. Dans une série triboélectrique, plus les deux matériaux en question sont éloignés l'un de l'autre, plus le transfert de charges qu'ils génèrent est important.

Au fil des années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies. Le Tableau 1-1. montre des séries triboélectriques obtenues par différentes méthodes. Il apparaît après comparaison avec plusieurs autres tableaux qu'il n'y a pas une série triboélectrique universelle. Ceci est dû au fait que les conditions expérimentales varient d'une expérience à l'autre. En plus, les additifs en plastiques commerciaux peuvent influencer les résultats de chargement et, en conséquence, sur le classement des matériaux dans la série [92].

Wilke a proposé une série triboélectrique qui spécifie la polarité de la charge générée après contact glissant ou roulant entre deux matériaux quelconques (tableau 1-1). Le classement des matériaux dans la série peut être différent car il dépend de plusieurs facteurs tels que la rugosité de la surface, la pureté du matériau, l'humidité et l'état de surface réel/la zone de contact pendant le frottement [79,93].

Tableau 1-1 : Différentes séries triboélectriques [78].

	Series 1	Series 2	Series 3	Series 4	Series 5	Series 6	Series 7
Donor of electrons Acquires positive charge	Human hands						
	Asbestos			Lucite 2041			
	Rabbit's Fur			Dapon			Nylon 6.6
	Acetate			Lexan 105	Plexiglass		Cellulose
	Glass			Formvar	Bakelite	Rabbit's Fur	Cellulose
	Mica			Estane	Cellulose	Lucite	Acetate
	Human hair		Polyox	DuPont 49000	Acetate	Bakelite	Polymethyl Methacrylate
	Nylon	Wool	Polyethylene	Durex	Glass	Cellulose	Polyacetal
	Wool	Nylon	Amine	Ethocel 10	Quartz	Acetate	Polyethylene Terephthalate
	Fur	Viscose	Gelatin	Polystyrene 8X	Nylon	Glass	Polyacrylonitrile
Lead	Cotton	Vinac	Epolene C	Wool	Quartz	Polyvinyl Chloride	
Silk	Silk	Lucite 44	Polysulphone	Silk	Mica	Polybisphenol Carbonate	
Aluminum	Acetate	Lucite 42	P-3500	Cotton	Wool	Polychloroether Penton	
Paper	Rayon	Acryloid A101	Hypalon 30	Paper	Cat's Fur	Polyvinylidene Chloride	
Cotton	Lucite, Perspex	Zelec DX	Cyclolac H-1000	Amber	Silk	Poly2.6-Dimethyl Polyphenylene Oxide	
Steel	Polyvinyl Alcohol	Polyacrylamide	Uncoated Iron	Resins	Cotton	Polystyrene	
Wood	Acetate/Butyrate	Cellulose	Cellulose	Metals	Wood	Polyethylene	
Amber	Butyrate	Acetate/Butyrate	Cellulose Acetate Butyrate	Rubber	Amber	Polypropylene	
Hard rubber	Acysol	Acetate/Butyrate	Cellulose Acetate Butyrate	Acetate Rayon	Resins	Polytetrafluoroethylene	
Mylar	Carbopol	Acysol	Epon 828/V125	Rayon	Metals		
Nickel, Copper	Dynel	Carbopol	Polysulphone P-1700	Dacron	Polystyrene		
Silver	Velon	Polyethylene terephthalate	Polysulphone P-1700	Orlon	Polyethylene		
UV Resist	Polyethylene	Polyvinyl Butyral	Cellulose Nitrate	Polystyrene	Teflon		
Brass, Stainless Steel	Teflon	Polyethylene	Cellulose Nitrate	Teflon	Cellulose Nitrate		
Gold			Kynar	Cellulose Nitrate	Nitrate		
Polyester				PVC			
Celluloid							
Styrene							
Acrylic							
Acceptor of electrons Acquires negative charge							

I.2.3 Facteurs influents sur la charge triboélectrique

La complexité du chargement électrique par frottement des matériaux isolants peut s'expliquer par de nombreux facteurs qui affectent le processus, notamment : l'état chimique de la surface, les propriétés du matériau (cristallinité), la force de contact, la vitesse de déplacement et le temps de chargement, l'humidité et la température, l'étendue de la zone de contact, la rugosité de surface et la présence d'impuretés [94,95]. Tous ces facteurs sont le plus

souvent considérés individuellement, sans prendre en compte leurs interactions. Certains de ces facteurs seront abordés dans les sections suivantes.

a) Effet de la rugosité de surface

La rugosité de surface influe sur le comportement triboélectrique. Des études ont montré que les matériaux polymères rugueux ont tendance à accumuler plus de charge que des polymères lisses. La rugosité de la surface affecte l'aire de contact et donc le transfert de charge et sa dispersion sur la surface [94-98].

L'importance de la rugosité de surface et son influence sur le tribochargement dans un contact glissant entre les matériaux polymères a été soulignée par Neagoe et *al.* [99] ; ils ont constaté que le contact entre deux polymères se produit généralement sur un certain nombre de points liés à la rugosité de surface. Pendant le contact glissant, un point de l'une des surfaces peut effectuer plusieurs contacts avec les points de l'autre surface. Plus le nombre des points de contact est élevé, plus la charge triboélectrique acquise est grande.

Les changements dans la microstructure des matériaux affecteront également le mécanisme de transfert de charge. Wang et *al.* [100] ont montré que les différences dans la microstructure de matériaux chimiquement identiques peuvent déclencher des comportements de charge tribologiques différents. En règle générale, la direction du transfert de charge n'est pas contrôlée. Cependant, lorsqu'un des échantillons est soumis à une contrainte de traction, un transfert de charge systématique se produit, de sorte que l'échantillon déformé acquiert une charge positive et se comporte triboélectriquement comme un matériau distinct [101].

b) Effet de la force normale appliquée au contact

La charge électrique générée par le frottement entre les deux polymères augmente avec la force normale de contact appliquée et se stabilise lorsque la force de contact de chaque matériau atteint un certain niveau. Sous de faibles forces de contact, les irrégularités de surface ont des interactions faibles et présentent des comportements qui sont linéairement liés à la force appliquée. Par contre, lorsque la force est élevée, la pression de contact est élevée et donc présente un caractère de frottement différent due à la déformation du polymère [64,94].

c) Effet de l'humidité

La génération de la charge varie significativement en fonction de la teneur en humidité d'un matériau. En général, l'humidité augmente la conductivité surfacique des polymères ainsi que la libération de la charge dans l'air environnant. Greason [65] a constaté que l'augmentation de l'humidité relative de l'air ambiant (de 10 % à 70 %) provoquait une diminution de la charge nette créée entre une bille en acier inoxydable et divers isolants comme, par exemple, le verre, le PTFE, le polycarbonate et le nylon. Il a soupçonné que cette diminution pouvait être liée à une diminution de la résistivité de volume et de surface des isolants en raison de l'augmentation de l'humidité relative.

Naik et *al.* [102] ont remarqué que la charge générée sur des particules de polymères diminue avec l'augmentation de l'humidité relative ambiante. Ils ont constaté une baisse significative de la charge spécifique (rapport entre la charge électrique et la masse), avec l'augmentation de l'humidité relative qui a été varié de 20 % à 60 %, avec une température constante de 22° C.

Contrairement à Naik, Lungu [103] a constaté que la charge générée sur des particules de PE et de PS augmente significativement avec l'augmentation de l'humidité : les auteurs ont constaté que la charge électrique sur les polymères a connu une augmentation proportionnelle avec celle de l'humidité, en atteignant des valeurs de charges maximales pour une valeur d'humidité égale à 90 %. Lungu a expliqué que cette augmentation repose sur le fait que la formation et l'extension du film d'eau impliquent une augmentation du champ de contact et aussi une augmentation de la surface de contact, ce qui rend un plus grand transfert de charge possible. Par conséquent, une plus grande quantité de charge peut être transférée. De plus, lorsque la valeur de 65 % pour l'humidité est dépassée, on observe une augmentation de la densité des charges ioniques obtenues par dissociation de l'eau en raison de l'augmentation du champ de contact. D'autres auteurs ont aussi suggéré que l'humidité peut modifier la conductivité des particules et donc faciliter la neutralisation des charges [104,105].

d) Effet du temps de frottement

La génération de charge à la surface d'un matériau est plus importante à des temps de frottement plus longs ; après un certain temps, il intervient la saturation du niveau de charge, qui est différent d'un matériau à l'autre [64]. N.K.K Myshkin et *al.*[16] ont constaté que le PTFE étant un matériau viscoélastique, sa déformation dépend fortement du temps et de la température. Sous une force constante, la surface de contact du polymère augmente progressivement. Comme le temps de contact augmente, la zone réelle de contact devrait

augmenter au sein de certaines limites, par conséquent, pour le cas d'un tribochargement, plus il y a de points de contact entre les deux matériaux, plus la charge générée par frottement sera élevée.

En conclusion, la déformation des surfaces des polymères pendant le processus de frottement dépend du temps [36]. On peut trouver la même déduction dans des travaux antérieurs (Homewood et RoseInnes (1979)), qui avaient montré que la zone de contact augmente avec le temps de contact [106].

e) Effet de la structure et de la composition chimiques

La charge triboélectrique des polymères varie d'un matériau à un autre pour la simple raison que leur composition chimique est différente. La charge triboélectrique des polymères peut être influencée par les propriétés physico-chimiques des surfaces. Des études antérieures ont montré que des groupes chimiques comme NH_2 , OCH_3 , CH_3 , C_2H_5 , OH , H repoussent les électrons et causent une charge positive à la surface, certains groupes chimiques comme Br , I , COCH_3 , NO_2 , sont attractifs pour les électrons, qui provoquent la charge négative de la surface [24].

I.2.4 Différentes applications du tribochargement électrostatique

Comme mentionnée auparavant, la triboélectricité est d'une importance considérable dans l'industrie. Elle est à la base de nombreuses technologies importantes, telles que la photocopie [70], la peinture électrostatique et les électrets [107,108], l'électro-filage [109,110], la séparation de mélange de particules [111] et la filtration électrostatique [112-114]. (Figure I.8).

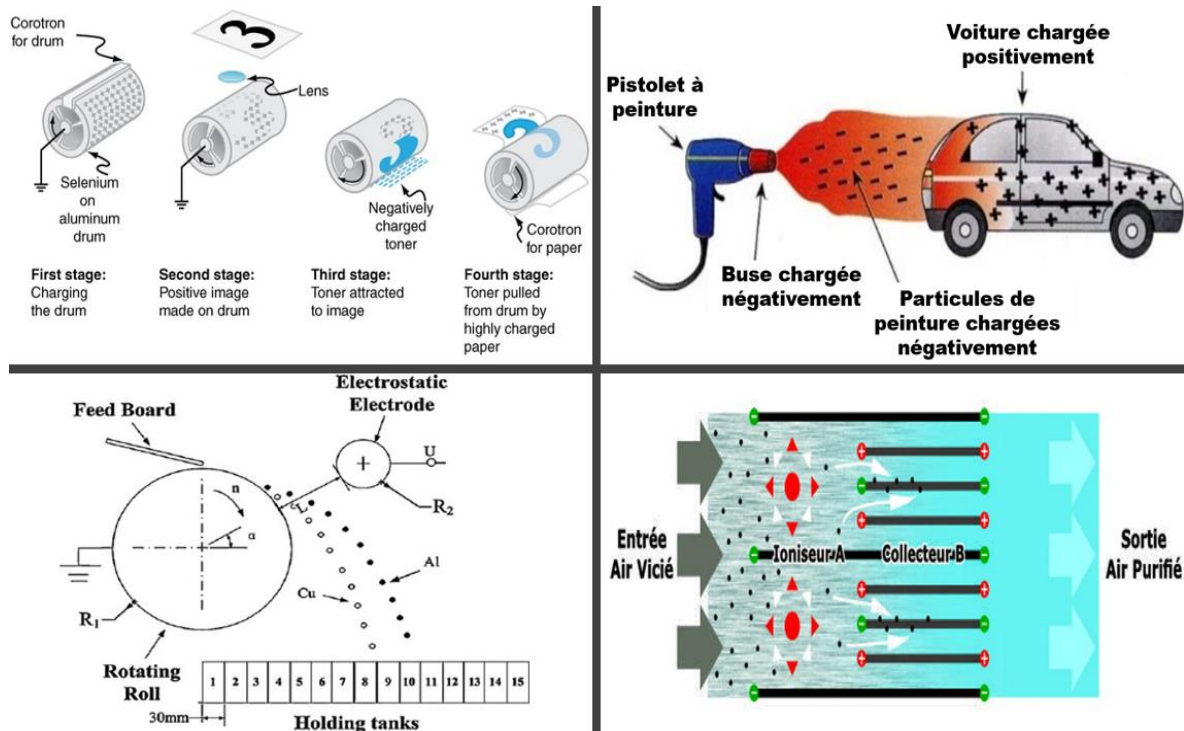


Figure I.8 Différentes applications du chargement par effet triboélectrique ; (1) La photocopie [115] ; (2) La peinture électrostatique [116] ; (3) La séparation électrostatique [117] ; (4) La filtration électrostatique [118].

I.3 Types de tribomètres utilisés

La compréhension complète des phénomènes triboélectriques qui se produisent sur la surface des polymères n'est toujours pas maîtrisée, et cela malgré les avancements récents des techniques expérimentales et de mesure. Beaucoup de recherches sont réalisées pour clarifier de nombreux points et répondre à plusieurs questions à propos du comportement triboélectrique des polymères [21,22,68,119,120].

La génération de charges par effet triboélectrique a été largement étudié en utilisant différents types de matériaux [35,68,120] et l'utilisation de différents tribomètres est indispensable pour ce type de recherches. Généralement, les tribomètres sont souvent utilisés lors du contact glissant pour étudier différents paramètres tels que le coefficient de frottement, l'usure et la corrosion de surface dans différentes conditions.

Le tribomètre est un instrument qui réalise un contact mobile entre deux matériaux choisis préalablement, la nature de ce contact pouvant être plan/plan, point/plan, point/cylindre, etc.. Cet instrument nous permet d'étudier les différents facteurs agissant sur le frottement entre ces matériaux, comme leur vitesse relative, le coefficient de frottement, et la force d'appui pour

exercer le contact. Il nous permet aussi d'étudier la lubrification et le traitement de surface, ce qui conduit par la suite à l'amélioration des propriétés mécaniques des matériaux.

Toute différence entre la méthode de préparation des échantillons, la procédure expérimentale et la précision du système utilisé entraînera des incohérences et des différences dans les résultats obtenus. Cela est causé par les différences entre les bancs d'essais utilisés pour étudier les phénomènes triboélectriques. Une classification des dispositifs expérimentaux est donnée dans les paragraphes suivants.

I.3.1 Dispositifs de génération de la charge triboélectrique

a) Tribomètre à géométrie cylindre-sphère

Une revue de la littérature indique que diverses méthodes d'essais ont été utilisées pour évaluer la charge triboélectrique accumulée par le contact et la séparation de différents matériaux. Greason a utilisé la géométrie cylindrique-sphère pour étudier les phénomènes triboélectriques [121]. Même si ce système n'est pas réellement un tribomètre, cette configuration permet d'utiliser une cage de Faraday et un électromètre pour mesurer la charge générée sur une bille en acier inoxydable qui est dans un contact roulant avec la surface interne du tube en matériau isolant. (Figure I.9).

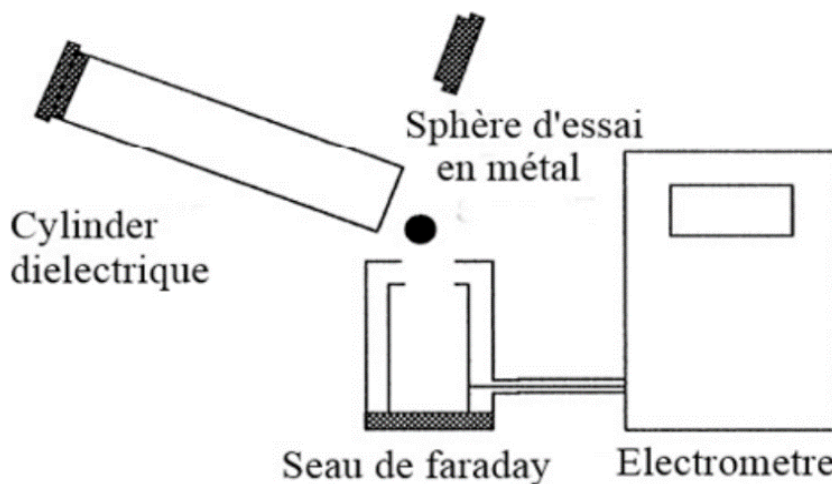


Figure I.9 Système de triboélectrification et de mesure de charge [121].

b) Tribomètre linéaire ou va-et-vient

Ce type de tribomètre se caractérise par un mouvement linéaire alternatif, similaire à l'équipement développé pour cette thèse. Le contact peut être ponctuel, linéaire ou plat. Ce type de dispositif a été utilisé, entre autres, par Zeghloul, Ohara et Chang [122-124] et permet de

mesurer la charge triboélectrique qui résulte du frottement mutuel entre différents matériaux. L'équipement et les procédures utilisées sont très complexes et peuvent compromettre la précision. En effet, pour garantir un tribochargement linéaire entre l'échantillon du bas et celui du haut, il faut s'assurer qu'un contact parfait plan/plan est réalisé avant chaque opération de tribochargement. La force d'appui (force normale) est ensuite réglée sur une valeur fixe en utilisant un capteur de force installée sur le tribomètre ; vient alors le tour de la force tangentielle qui sera mesurée lors de l'opération de tribochargement. Ces deux valeurs de forces normale et tangentielle nous permettront de mesurer le coefficient de frottement pour chaque contact plan/plan de différents matériaux. Le tribomètre linéaire donne aussi la possibilité de mesurer la charge électrique en mode continu. Mais cette mesure ne peut être réalisée que pour une seule éprouvette, compte tenu du fait que la sonde ne peut être située que dans la partie haute du tribomètre. Par conséquent, seul l'échantillon du bas peut voir sa charge générée mesurée instantanément [51,68,120] (Figure I.10).

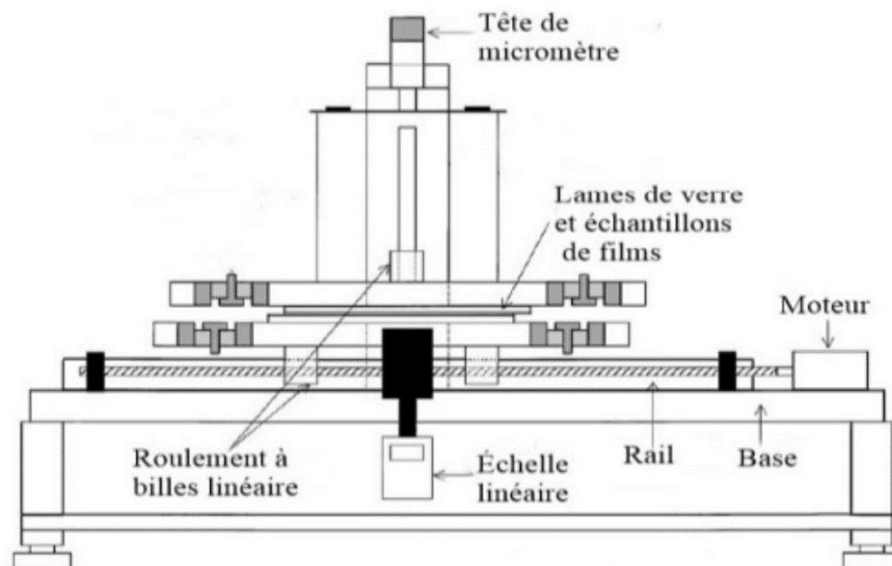


Figure I.10 Tribomètre linéaire ou va-et-vient [68].

c) Tribomètre pion-disque

Le tribomètre pion-disque établit un contact glissant en faisant tourner un disque autour d'un axe fixe. Ce tribomètre est le banc d'essai le plus utilisé pour l'étude et la mesure du frottement, de l'usure et de la lubrification. Il est constitué d'un arbre qui tourne à vitesse variable sur lequel est monté un disque qui constitue le premier matériau. Un axe affecté au second matériau du couple tribologique est monté sur une roue équipée d'un capteur d'effort normal et tangential. Une force normale est exercée sur le support de façon à presser le pion sur le disque, ensuite, le disque est mis en rotation et la force tangentielle est mesurée.

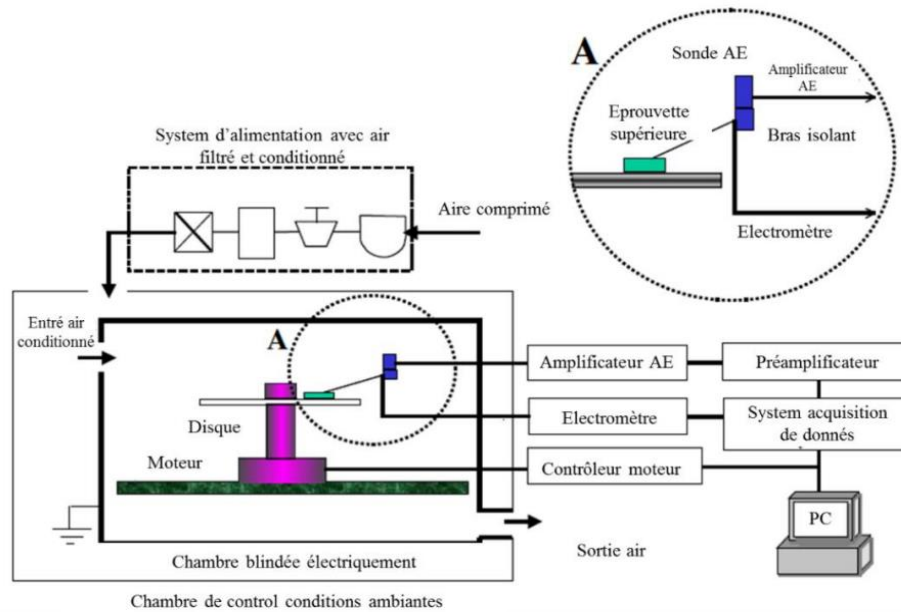


Figure I.11 Tribomètre pion-disque [3].

Ce tribomètre permet l'étude des types de contact : ponctuel, linéaire ou plan. La mesure de charge en continu n'est possible que pour les échantillons en forme de plaques [3]. (Figure I.11).

Les études sur la caractérisation de la génération de charges par effet triboélectrique ou sur l'usure des matériaux se font principalement à l'aide de ces trois principaux tribomètres.

Liu et *al.* [51] ont examiné le frottement de l'acier avec le nylon, le PP et le PTFE ainsi que différents frottements de plusieurs polymères entre eux en utilisant un tribomètre linéaire. Dans leurs travaux, ils ont constaté que la charge électrique tend à se saturer après un nombre défini de cycle de frottement. Les résultats montrent que l'augmentation de la force de contact normale (0,5 N - 2 N) favorise la génération de la charge électrique. La plage de vitesse de l'étude (27 mm/s à 95 mm/s) ne semble pas avoir d'influence significative. Ils ont constaté que la charge s'accumulait sur la surface en nylon lors de frottements répétés et se stabilise après environ 40 à 50 cycles, tandis que la charge sur le PTFE et le PP a atteint la saturation après seulement 2 ou 3 cycles. La charge sur le nylon a diminué à 60 % ou moins de la charge initiale après juste 30 secondes (charge accumulée après 50 cycles de frottement), tandis que la charge du PTFE et du PP n'a pas diminué dans les 30 secondes qui ont suivis le frottement.

d) Tribomètre à deux cylindres

Hiratsuka et Hosotani [21] ont étudié les mouvements de glissement et de roulement de paires de matériaux choisis parmi huit polymères (PA66, POM, ABS, PET, PP, PVC, PE, PTFE). A l'aide d'un tribomètre à deux cylindres (Figure I.12), ce type de tribomètre est

caractérisé par un contact linéique, il nous permet aussi de mesurer la charge générée sur les deux éprouvettes. Hiratsuka et Hosotani ont montré que la charge de saturation sur chaque polymère est presque la même dans les contacts de roulement et de glissement dans presque toutes les combinaisons. Cependant, l'augmentation initiale au début du frottement est plus forte dans le contact glissant que dans le contact roulant. Cela signifie que le nombre de charges générées par unité de processus de contact/séparation est plus important dans le contact glissant. Ils ont aussi étudié l'effet de l'humidité sur la génération de charge par effet tribologique et ont constaté que dans toutes les combinaisons de glissement, il existe une humidité pour laquelle la somme de la valeur absolue des charges de saturation atteint son maximum. Lorsque l'humidité passe de 0 à 10 %, la charge est nettement plus élevée, ce qui signifie que l'humidité atmosphérique augmente la génération de la charge en utilisant ses formes ioniques. D'autre part, lorsque l'humidité atteint un certain niveau, le processus de fuite est plus dominant que celui de charge, ce qui entraîne une diminution de la charge.

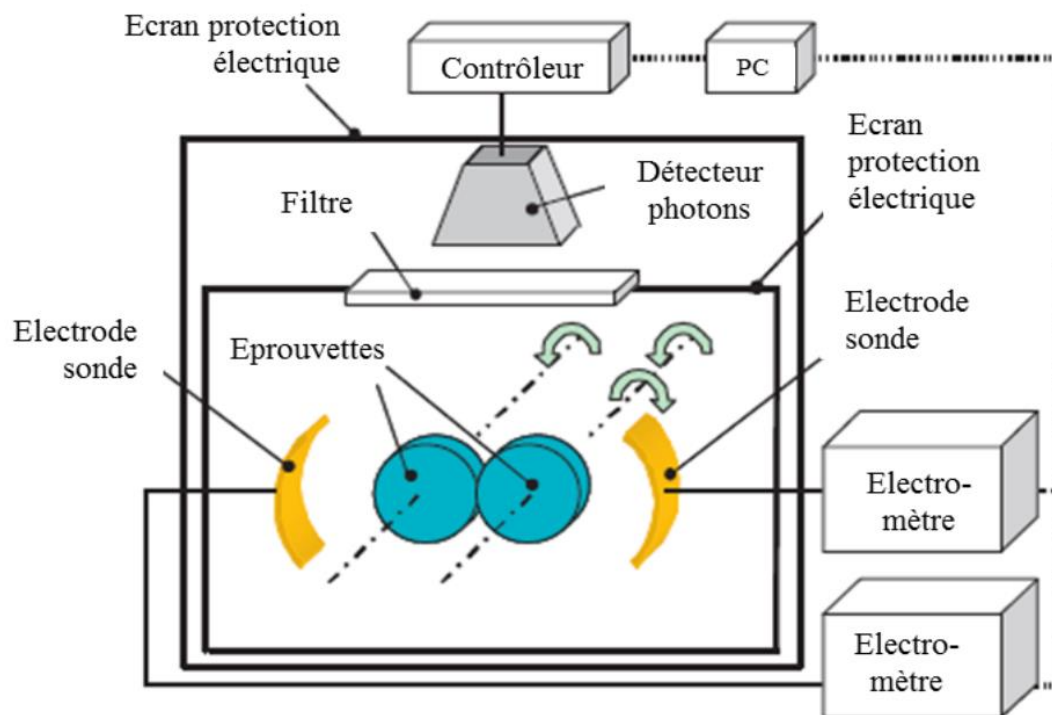


Figure I.12 Tribomètre à deux cylindres [21].

Guerret-Piecourt et *al.* [55] ont analysé le contact entre cristaux de saphir ($\alpha\text{Al}_2\text{O}_3$) en menant leurs expériences sur un tribomètre linéaire. Leur étude a montré que les charges se produisent facilement lors d'un simple contact ou d'un frottement, dans un environnement polaire ou non polaire. Elles ne se produisent pas uniquement à la surface mais aussi dans la masse par piégeage des charges, ce qui induit des effets à longue distance, selon la physique

des charges d'espace. Ils ont aussi constaté que les charges peuvent jouer un rôle majeur dans l'énergie d'adhésion, comme le montrent à la fois les résultats expérimentaux et les effets de charge d'image, et que l'énergie d'interaction pendant le frottement peut dépendre de façon marquée de l'effet des charges piégées et par conséquent de la présence de défauts structurels préexistants ou créés pendant le frottement.

Alahmadi [22] a étudié le frottement sec entre le PE et le PMMA et le PTFE à l'aide d'un tribomètre sphère/plan (Figure I.13). Il a conclu que lorsque les supports métalliques des deux échantillons ont été mis à la terre, cela a entraîné une augmentation de la charge. Alahmadi a aussi constaté que le coefficient de frottement de la sphère de PMMA glissant contre l'acier mouillé par l'eau a enregistré des valeurs très élevées. La force électrique générée par le glissement était suffisamment élevée pour augmenter l'adhérence et attirer les deux surfaces de glissement. Il a aussi remarqué que le glissement PE/acier a donné un coefficient de frottement plus élevé que celui affiché par le contact PMMA/acier. La distance entre les deux matériaux en glissement dans la série triboélectrique est plus grande pour le PE et l'acier que pour le PMMA et l'acier, ce qui modifie le potentiel électrique généré par la charge électrique statique.

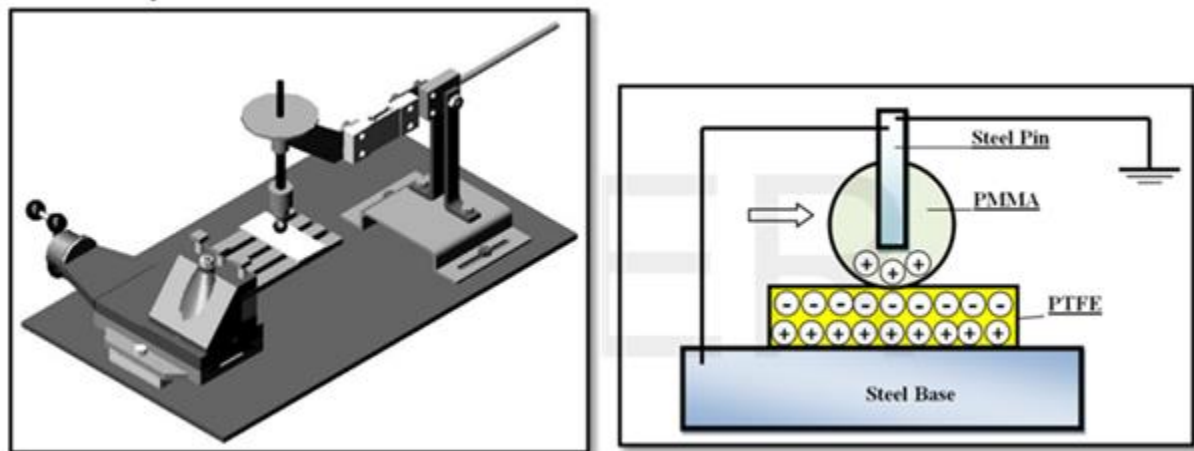


Figure I.13 Banc de tribochargement sphère/Plan [22].

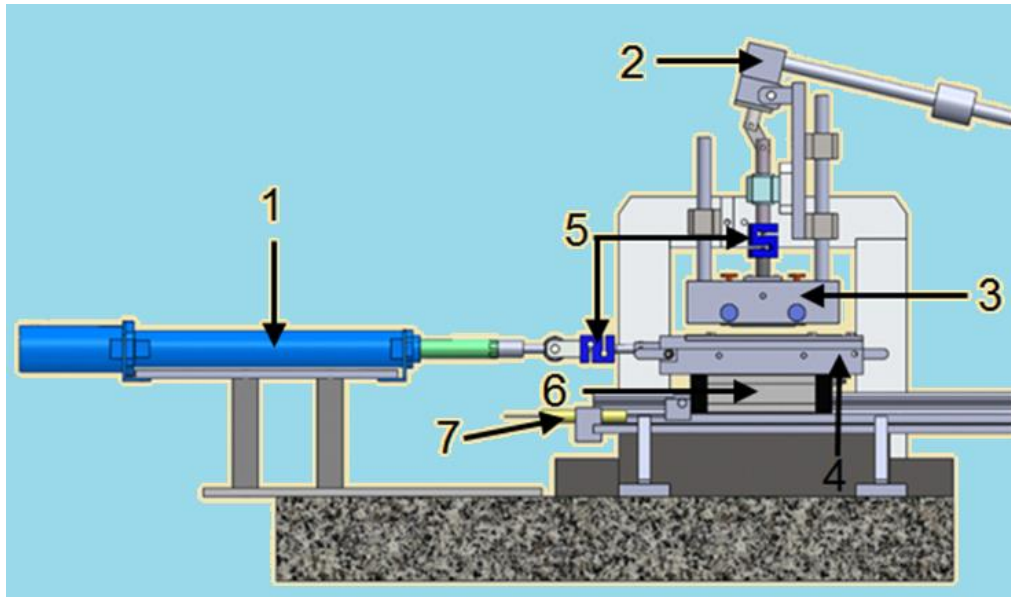


Figure I.14 Banc d'essai triboélectrique ; (1) Moteur électrique linéaire ; (2) Système de contrôle de la force verticale ; (3) Porte échantillon supérieur ; (4) Porte échantillon inférieur ; (5) Capteurs de forces normale et tangentielle ; (6) Système de guidage h.

Y. E. Prawatya et M. B. Neagoë [68,120] ont étudié les comportements triboélectriques des différents polymères lorsqu'ils sont mis en contact entre eux à l'aide d'un tribomètre linéaire plan/plan (Figure I.14). Leurs études ont montré que le niveau de charge électrique généré dépend de plusieurs paramètres, dont la rugosité, la pression de contact et la durée de frottement, et que dans les conditions de leurs études, la variation dans des limites relativement étroites de la vitesse de glissement n'a pas révélé d'influence sur le niveau de charge.

I.4 Modification de l'état de surface des polymères

I.4.1 Traitement de surfaces par plasma froid

Ces dernières années, diverses techniques physiques et chimiques ont été développées pour modifier la surface des matériaux. Le traitement au plasma froid est couramment utilisé pour modifier les propriétés mécaniques, électriques, optiques et tribologiques de surface des polymères, sans modifier leurs propriétés volumiques. Ainsi, le plasma froid permet de créer des groupements favorisant la mouillabilité et induit un changement de la rugosité des surfaces traitées [125-128].

Dans le traitement de surface par plasma de matériaux polymères, plusieurs groupes de recherche ont étudié les réactions chimiques en jeu. En général, les ions, les photons et les radicaux libres produits dans une décharge électrique interviennent dans le transfert d'énergie du plasma vers la surface du matériau à traiter (Figure I.15). L'interaction plasma-surface coupe

les liaisons des chaînes polymères et active la surface pour provoquer le greffage de groupes fonctionnels. Tous ces phénomènes se produisent simultanément au cours du traitement par plasma froid et l'importance de chaque phénomène dépend largement des propriétés du gaz plasmagène et des propriétés du matériau. [129,130].

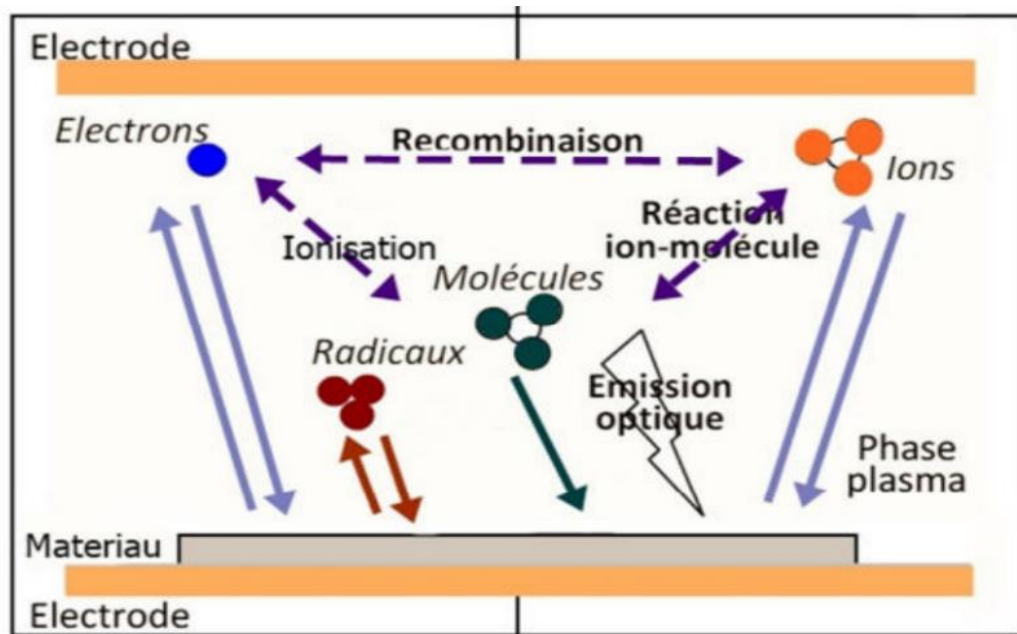


Figure I.15 Principe de fonctionnement du plasma sur le matériau traité [131].

I.4.2 Procédés à décharge à barrière diélectrique pour le traitement de surface des polymères

Les décharges à barrière diélectriques (DBD) sont de plus en plus souvent utilisées pour le contrôle de l'écoulement des flux [132], l'élimination de charge [133, 134], la dépollution [135] et le traitement de surface [128,136], etc.

La modification de l'état de la surface des polymères sous l'action d'une DBD peut également modifier leurs propriétés électrostatiques. Certains résultats sont relativement contradictoires. Ainsi, Sharma et *al.* [137,138] et Chongqi et *al.* [139] ont montré que le traitement plasma réduit la charge triboélectrique acquise par le polymère. Cependant, Murata et *al.* [140] ont observé une amélioration du processus de chargement. Dans une étude récente, il a été rapporté que l'exposition au plasma de type DBD affecte le chargement triboélectrique des polymères de deux manières différentes. Des études ont démontré qu'une exposition à une DBD agit de deux manières distinctes sur le chargement triboélectrique des polymères. Pour le cas d'un traitement de courte durée (1 à 3 secondes), la charge électrique augmente alors que

pour un traitement de durée plus longue (5 à 600 secondes), la charge triboélectrique diminue [141].

Bekkara *et al.* [142] ont étudié la modification des caractéristiques de surface et des propriétés triboélectriques des polymères par plasma DBD dans l'air atmosphérique, ils ont observé qu'après l'exposition à la DBD, la rugosité de la surface augmente par effet de gravure pour tous les types de polymères avec des taux différents. Cependant, le changement de rugosité peut être arrêté par l'augmentation de la température et la fusion partielle de la surface, comme dans le cas du PVC. Leur étude a conclu que l'effet du traitement par DBD du polymère peut se résumer en un changement de la rugosité (augmentation des points de contact) et un changement de la mouillabilité (augmentation de la conductivité de la surface). Ils ont rapporté que cette combinaison de changements influence le comportement du polymère traité pendant la charge triboélectrique. En d'autres termes, la rugosité permet d'augmenter le nombre de points de contact à la surface de l'échantillon et la capacité de charge triboélectrique, tandis que la mouillabilité fait l'inverse en augmentant la conductivité de surface des polymères ainsi que l'accélération de la perte et de la dispersion de la charge triboélectrique.

Benabderrahmane *et al.* [143] ont étudié l'influence des différents facteurs de la DBD sur le tribochargement des polymères. Ils ont constaté qu'en augmentant la distance inter-électrode, la charge triboélectrique semble atteindre un maximum pour une certaine valeur, et qu'au-delà de ce point, la charge diminue car le champ électrique est plus faible pour des distances plus longues. Il a aussi été constaté que l'épaisseur du diélectrique est également un facteur important qui peut affecter fortement la charge triboélectrique ; cependant, la position de cette dernière dans l'espace inter-électrode n'a pas d'effet significatif. Dans les conditions des expériences réalisées par ces chercheurs, l'optimisation de tous les paramètres du DBD permet d'obtenir un rapport charge/masse 5 fois plus élevé que dans le cas des matériaux non traités.

En conclusion, les études sur le traitement des matériaux polymères par DBD montrent que cette technique a la capacité de modifier la surface du matériau, notamment sa rugosité [125-128] et sa mouillabilité [128,144], qui sont deux caractéristiques importantes dans plusieurs domaines d'utilisation des polymères. Ces modifications induites par DBD peuvent représenter un moyen efficace pour contrôler aussi le phénomène de chargement triboélectrique.

I.4.3 Avantages et inconvénients de l'utilisation des plasmas froids

L'utilisation de plasmas froids présente plusieurs avantages, mais elle présente également quelques inconvénients [145,146].

Le traitement par plasma froid donne la possibilité de choisir le type de modification chimique à effectuer sur la surface du polymère traité en choisissant le gaz utilisé. Il permet aussi de modifier la surface du polymère sans affecter les propriétés volumétriques intrinsèques du matériau traité, ainsi que la capacité à nettoyer la surface, à changer la topographie, à déposer une couche mince dans un temps court (de quelques secondes à quelques minutes). De plus, il permet aussi de contrôler la composition et la structure du film déposé.

Cependant, le traitement au plasma froid présente quelques inconvénients, comme l'indépendance des paramètres du traitement du système exploité (chaque système a ses propres paramètres optimaux), mais aussi la complexité des mécanismes physiques qui contrôlent les plasmas. La compréhension des phénomènes tant à la décharge gazeuse qu'à l'interface matériau-plasma est encore limitée.

I.5 Conclusions

L'utilisation des polymères a considérablement augmenté récemment en raison de leurs excellentes propriétés électriques et mécaniques, de leur disponibilité sur le marché et de leur faible coût. L'étude de l'état de l'art montre que :

1) La compréhension des processus tribologiques au contact polymère-polymère reste malheureusement partiellement maîtrisée.

2) La génération de charges électriques par frottement entre deux matériaux isolants est influencée par de nombreux facteurs : la nature et le caractère de la surface des matériaux en contact, les conditions environnementales, la pression de contact, la vitesse relative des surfaces en mouvement, etc.

3) Le traitement de surface des polymères est d'une grande importance dans diverses applications industrielles. L'exposition des polymères à des décharges à barrière diélectrique (DBD) peut modifier les propriétés de surface de ces matériaux ainsi que leur comportement triboélectrique.

Ce chapitre établit une synthèse sur les processus de charge et de décharge des matériaux isolants. Nous allons nous focaliser sur deux domaines importants dans la tribologie des isolants :

- Etude de l'influence du plasma froid sur les propriétés surfaciques et triboélectriques des polymères après un traitement par la technique de la décharge à barrière diélectrique (DBD).
- Etude de l'influence de l'humidité relative ambiante sur le potentiel électrique généré sur la surface des polymères après tribochargement.



« Ce que nous savons, c'est une goutte d'eau, ce que nous ignorons, c'est un océan. »

- Isaac Newton (1642 – 1727)

Chapitre II : Description des dispositifs utilisés et de la mise en œuvre expérimentale

Le choix des matériaux, la réalisation des dispositifs expérimentaux et la mise au point de la méthode de travail est une étape importante dans l'étude des conditions de génération de la charge triboélectrique, en rapport avec les différentes applications des polymères. En effet, la conception des pièces mécaniques doit tenir compte simultanément des phénomènes de frottement, d'usure et de charge électrostatique qui, selon le domaine d'application, peuvent être utiles ou dangereux.

Dans ce chapitre, nous présenterons les installations expérimentales et l'instrumentation mises en œuvre pour étudier les phénomènes de tribochargement, dans le cas particulier du contact conforme entre plaques de polymères, ainsi que pour évaluer l'influence du plasma froid généré par DBD sur les propriétés triboélectriques de ces matériaux. Une préparation soignée des éprouvettes, notamment en éliminant la charge électrique résiduelle, ainsi qu'un contrôle précis des conditions climatiques ambiantes (température et humidité) sont nécessaires pour une étude précise et fine du phénomène triboélectrique.

II.1 Préparation et caractérisation des matériaux utilisés

Les polymères sont divisés en deux classes différentes en fonction de leur comportement en présence d'une haute température, les thermoplastiques et les thermodurcissables. La première classe est la plus répandue, ces polymères peuvent être chauffés et reformés fréquemment. Les recherches présentées dans ce travail sont principalement concentrées sur le comportement tribologique et électrostatique de thermoplastiques, notamment dans le cas d'un contact avec un matériau conducteur. Le but est de mieux comprendre les mécanismes impliqués dans la génération de charges électriques sur la surface des polymères après avoir été mis en contact avec un métal.

Les thermoplastiques sont utilisés dans différents domaines, dans l'emballage et la fabrication des produits agricoles, industriels (électriques, électroniques, automobiles, etc.), du bâtiment et de la construction et des produits ménagers. Cette utilisation est principalement liée à leurs propriétés spécifiques : haute résistance aux chocs, faibles conductivité thermique et conductivité électrique, haute résistance chimique, faible poids, bonne valeur esthétique, avec

une finition de surface dure, cristalline ou caoutchouteuse. Leur sensibilité à la lumière du soleil ou au feu peut être contrôlée en ajoutant des filtres ultraviolets ou des retardateurs de flamme.

Aussi dans ce travail, nous nous sommes focalisés sur le comportement électrostatique des différents matériaux polymères frottés avec des métaux afin de mieux comprendre et maîtriser les mécanismes impliqués dans la génération de la charge triboélectrique.

II.1.1 Polymères utilisés

a) Le Polychlorure de vinyle (PVC)

Le chlorure de polyvinyle (PVC) est l'un des polymères les moins chers et les plus utilisés dans le monde. Il est robuste, très résistant aux produits chimiques et aux conditions climatiques. C'est un polymère essentiellement amorphe ou faiblement cristallin, son taux de cristallinité ne dépasse jamais 15%. Le PVC est disponible sous forme de films, feuilles et tubes, il est facile à mettre en forme et à colorer. Sous sa forme originale, le PVC est cassant, rigide et lourd, mais après l'application de plastifiants, il devient élastique et souple comme du caoutchouc. En revanche, en le renforçant à l'aide de fibres de verre, ce matériau devient solide, rigide et résistant, de sorte qu'il peut être utilisé pour les revêtements de sol, les toitures et les panneaux de construction. Le PVC peut également être mélangé avec d'autres polymères pour élargir la gamme des propriétés. Le PVC présente une excellente résistance aux acides ou aux bases ainsi que de bonnes propriétés de barrière aux gaz atmosphériques, malgré sa faible résistance à certains solvants [147]. Sa structure chimique $(\text{CH}_2\text{CHCl})_n$ est présentée sur la figure II.1.

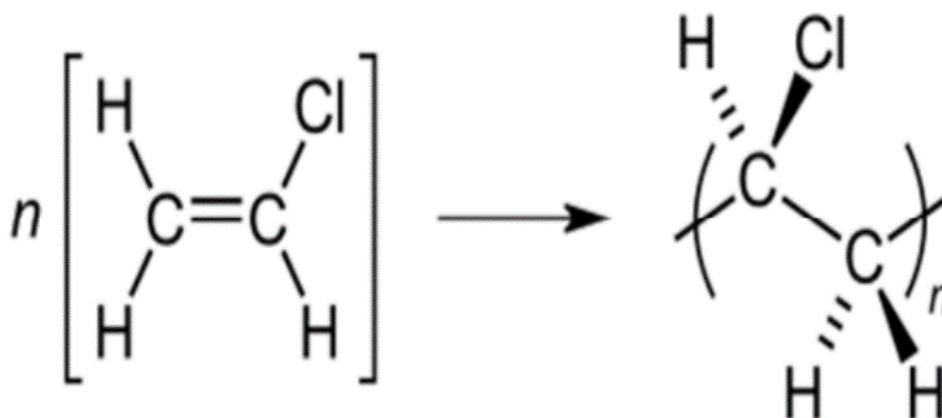


Figure II.1 Structure chimique du polychlorure de vinyle (PVC) [148].

b) Le Polyéthylène (PE)

Le PE $(-\text{CH}_2-\text{CH}_2-)_n$, chimiquement représenté sur la Figure II.2, est l'un des polymères les plus utilisés à côté du PVC. Il se trouve dans la fabrication des articles ménagers, jouets, emballages alimentaires, récipients pour aliments, vêtements de protection jetables, sacs en polymère etc., non seulement parce qu'il est bon marché, inerte et facile à mouler, mais aussi en raison de sa grande résistance à la plupart des solutions aqueuses, y compris l'eau salée, et de ses bonnes caractéristiques d'isolation électrique et de ses faibles pertes diélectriques. En outre, le PE est grandement utilisé dans le domaine médical, puisqu'il n'est pas toxique et peut donc être implanté dans le corps humain (artères artificielles, valves cardiaques et coques de hanche) [147].

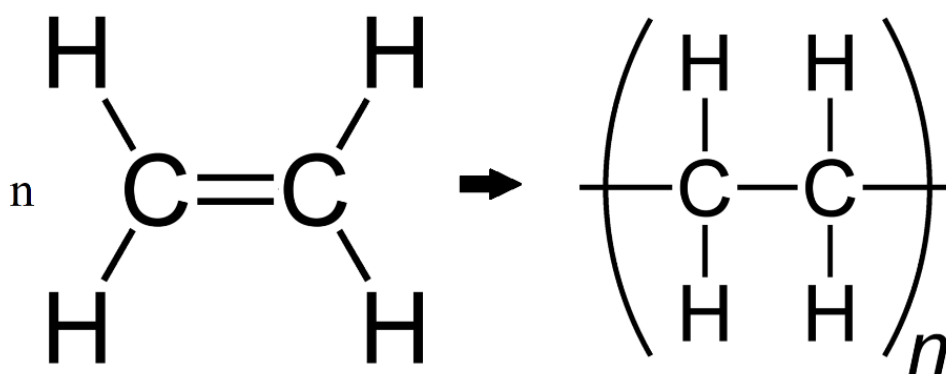


Figure II.2 Structure chimique du Polyéthylène (PE) [149].

c) Le polypropylène (PP)

Le PP, presque similaire au PE en termes de quantité produite et de forme, est stable pour la plupart des solutions aqueuses, y compris l'eau salée, mais sans retardateurs de flamme et stabilisateurs, il est inflammable et se dégrade à la lumière du soleil. Ce polymère est peu coûteux, ductile et léger, il offre de bonnes qualités de résistance chimique, thermique et électrique et une rigidité diélectrique élevée mais il a une faible tenue mécanique. Lorsqu'il est étiré en fibre, le PP a une résistance et une résilience exceptionnelle ; comme il a une bonne résistance à l'eau, c'est un matériau intéressant pour les cordages et les tissus. Il est plus facile à mouler et plus rigide que le PE, a une bonne transparence et peut accepter une gamme plus large et plus vive de couleurs [147]. La structure chimique $(\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3))_n$ du PP est présentée dans la Figure II.3.

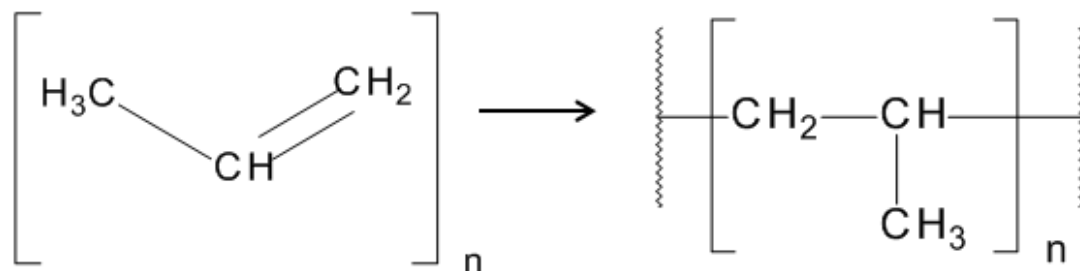


Figure II.3 Structure chimique du Polypropylène (PP) [150].

d) *Le Poly-tétra-fluoro-éthylène (PTFE)*

Le PTFE (CF₂-CF₂) 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.4). Le PTFE se distingue par sa surface glissante, son point de fusion élevé et sa résistance aux attaques de presque tous les produits chimiques. Ces propriétés l'ont rendu familier aux consommateurs en tant que revêtement des ustensiles de cuisine antiadhésifs ; il est également utilisé pour des produits industriels, notamment des roulements, des revêtements de tuyaux et des pièces de valves et de pompes [147].

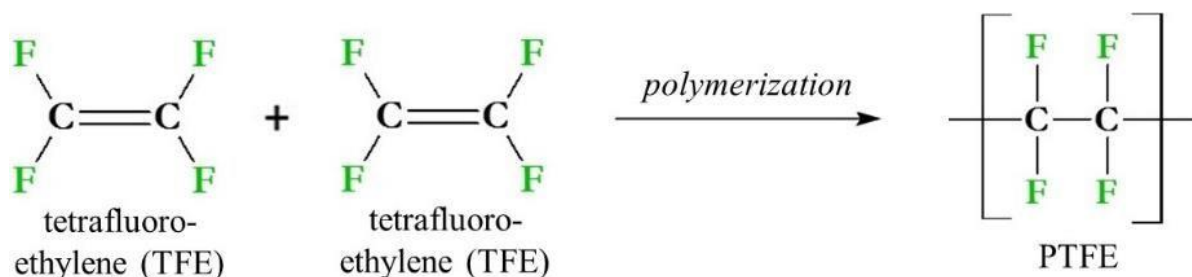


Figure II.4 Structure chimique du Polytétrafluoroéthylène (PTFE) [151].

Le choix des métaux a été fait après avoir réalisé quelques expériences préliminaires. Le premier métal est l'aluminium qui présente de nombreux avantages de taille qui le rendent indissociable du monde industriel et de notre environnement quotidien. Il est très résistant et trois fois plus léger que l'acier. Il est également aisément recyclable, malléable, ne rouille pas et c'est un excellent conducteur thermique et électrique. De par ses qualités, l'aluminium est ainsi utilisé dans la construction automobile (carrosseries, moteurs...), aéronautique (ailes, fuselages, hélices...) et navale (coques de navires), dans le secteur agroalimentaire (notamment pour la fabrication d'emballages tels que des canettes ou des boîtes de conserve), dans le câblage

électrique, dans les transports, dans l'électroménager, dans l'outillage et dans le bâtiment (profil alu garde-corps, rampes d'escaliers, profils de sol garde-corps, volets, toitures, clôtures, portes, panneaux...).

D'autres expériences ont été réalisées avec du cuivre, un matériau qui est ductile et malléable. Il possède une très grande conductivité électrique et présente une certaine résistance à la corrosion. Le cuivre a aussi des propriétés antisalissures. Il est présent dans de nombreux alliages utilisés (les laitons, les bronzes, les cuprobérylliums...etc), notamment dans la construction des radiateurs et les échangeurs de chaleur. Sa bonne conductivité électrique (la meilleure parmi les métaux non précieux) et thermique en fait un matériau de choix en télécommunications, dans le bâtiment, les transports ou encore le domaine de l'énergie. Les circuits intégrés et les circuits imprimés possèdent de plus en plus de cuivre. On utilise aussi le cuivre dans les tubes à vide et les guides d'onde.

II.1.2 Caractérisation des échantillons utilisés

Les propriétés mécaniques, électriques et thermiques des polymères utilisés dans les applications tribologiques affectent le comportement électrostatique de ces matériaux. Notons que, par exemple, la rugosité peut affecter de manière significative le coefficient de frottement et le niveau de charge généré. Une conductivité thermique différente affecte l'état d'échauffement et l'évolution du champ thermique généré par le frottement. La résistivité électrique a un effet sur le déclin du potentiel. Les recherches réalisées dans ce travail portent sur le comportement tribologique et électrostatique des matériaux polymères afin d'approfondir la compréhension du mécanisme de génération de charges dans les contacts secs. Le tableau II.1 présente les caractéristiques des matériaux utilisés dans ce travail.

La résistivité électrique affecte l'atténuation de la charge électrique, tandis que la conductivité thermique affecte l'évolution de l'état d'échauffement et du champ thermique généré par le frottement sec, ce qui peut conduire à des changements d'humidité de surface. Selon Cartwright et al. [152] et Mukherjee et al. [153], l'amplitude de la charge générée par le frottement est directement liée à l'humidité de la surface et à l'humidité relative de l'air ambiant. Biegaj et al [154] ont récemment étudié ce phénomène. Cela montre que la chimie de surface et l'humidité affectent non seulement la charge, mais aussi le déclin du potentiel de surface ; une humidité élevée favorise un déclin plus rapide de la charge.

Tableau II-2. Propriétés mécaniques, électriques et thermiques

	PVC	PE	PP	PTFE	Aluminium	Cuivre
Mode de Young [GPa]	0,35 à 2,5	0,15	1,3	0,5	69	124
Conductivité thermique [$W^{-1}m^{-1}K^{-1}$]	205 à 237	353 à 386	0,1 à 0,22	0,23 à 0,25	205 à 237	353 à 386
Résistivité électrique [$\mu\Omega.cm$]	1 x 10^{20} – 1 x 10^{22}	3,3 x 10^{22} – 3 x 10^{24}	3,3 x 10^{22} – 3 x 10^{23}	1 x 10^{23}	2,82	1,68
Constante diélectrique / Permittivité électrique relative - ϵ_r - $\cdot 10^{-12}$	3,1 – 4,4	2,2	2,2	2	2,4	6 – 6,2

La spectroscopie infra-rouge (IR) est une méthode rapide et sensible pour caractériser la plupart des molécules présentes dans les échantillons. Cette méthode, largement utilisée pour identifier la composition des matériaux non métalliques, fournit un spectre permettant de mesurer la diminution de l'intensité du rayonnement traversant l'échantillon en fonction de la longueur d'onde. La structure chimique des polymères utilisés dans notre travail a été déterminée à l'aide d'un spectromètre FTIR (Shimadzu modèle MIRacle 10), comme le montre la Figure II.5. Un spectre propre à notre échantillon est ensuite comparé avec les spectres obtenus de plusieurs bases de données déjà enregistrées sur la machine pour identifier le polymère étudié. Ce type de technologie de spectroscopie a également été utilisé pour analyser si la structure du matériau change pendant les tests.

Les résultats obtenus lors de l'analyse spectrométrique sur les polymères choisis pour notre étude sont montrés sur la Figure II.6.

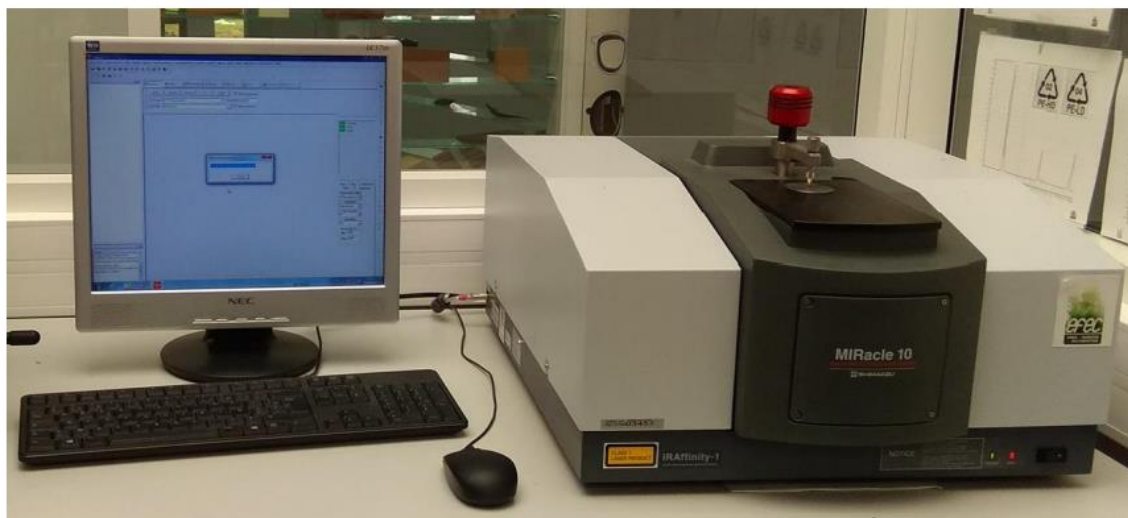
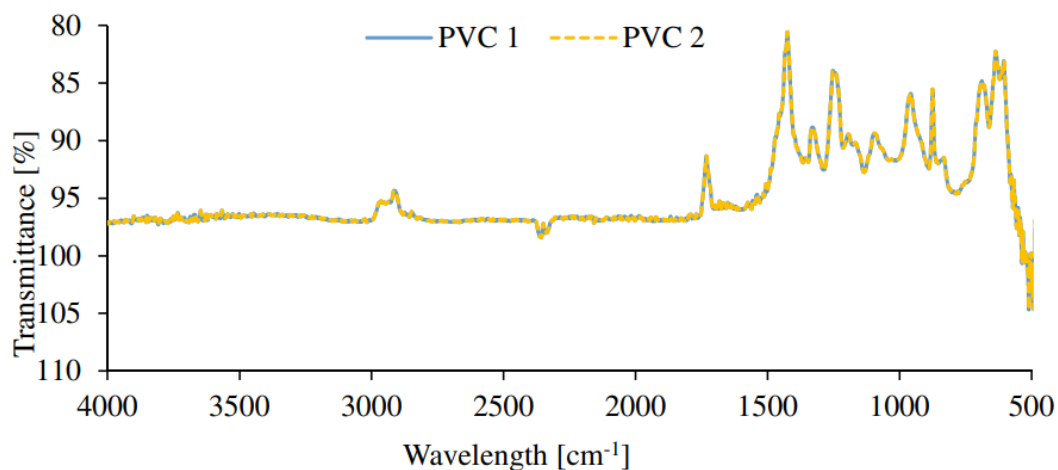
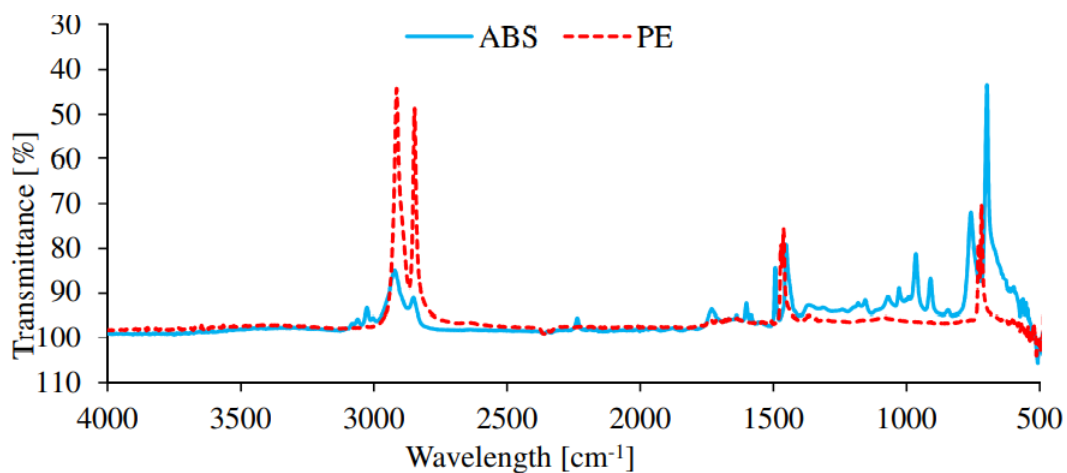


Figure II.5 Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.



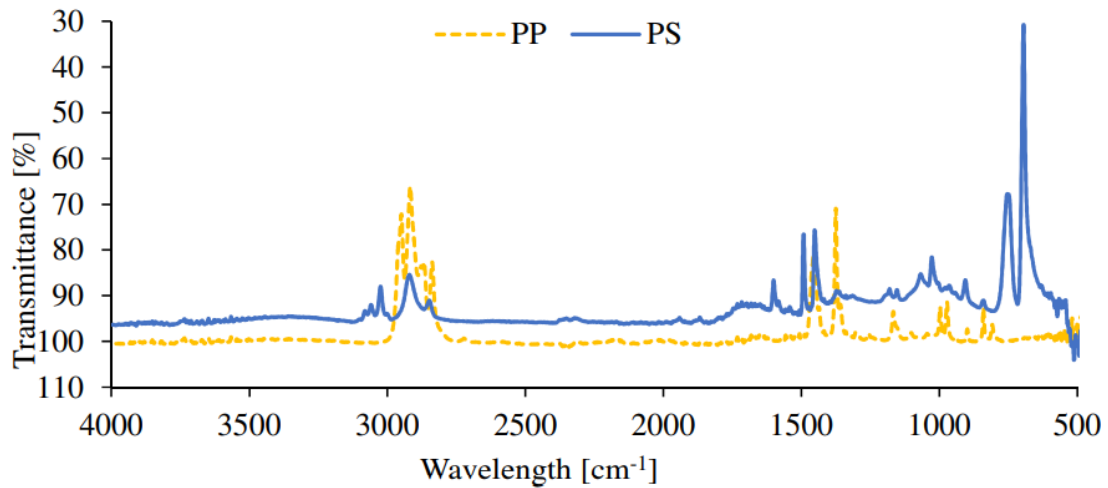


Figure II.6 Résultats spectrométriques de quelques polymères utilisés lors de cette étude.

La rugosité des échantillons utilisés a été mesurée par deux appareils : l'outil d'analyse sans contact Talysurf CCI 6000 et le rugosimètre portable Mitutoyo, modèle SJ-210 (Figure II.7). Pour tous nos échantillons, les tests de rugosité ont été effectués dans deux directions, en tenant compte de la texture de la fabrication. Fait intéressant, cette texture originale peut être utilisée comme variable dans des études comparatives sur les effets des différentes rugosités sur le chargement triboélectrique. Les mesures de rugosité ont été réalisées selon la norme ISO 1997 ; les conditions d'évaluation sont pour le profil en forme de R, en utilisant un filtrage gaussien. Le filtre passe-bas avait une longueur d'onde $L_s = 2,5 \mu\text{m}$, et le filtre passe-haut avait une longueur $L_c = 0,8 \text{ mm}$. Les mesures sont faites conformément aux spécifications du fabricant.

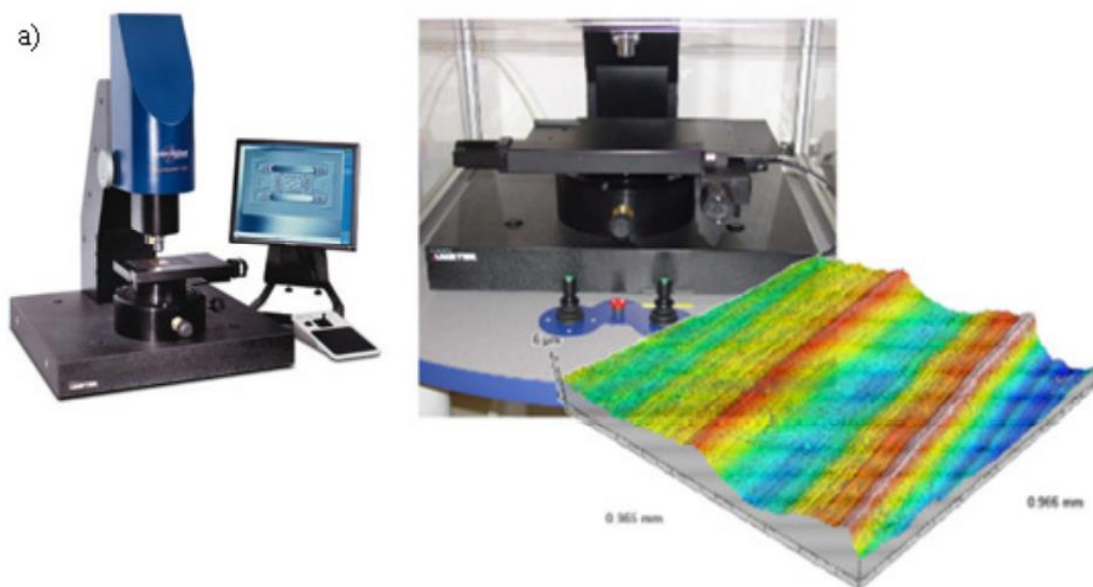


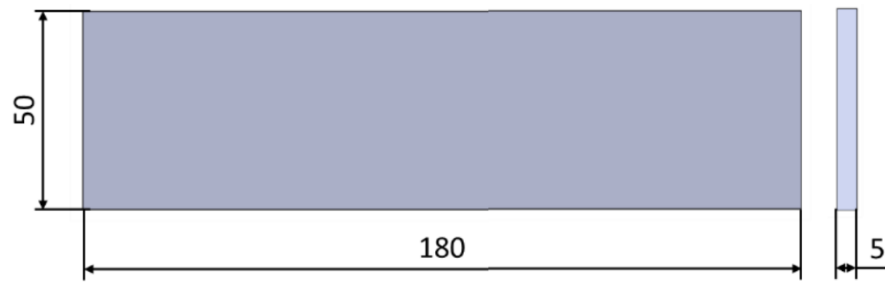


Figure II.7 Dispositifs pour la métrologie des surfaces : a) rugosimètre interférométrique confocal ; b) rugosimètre avec contact.

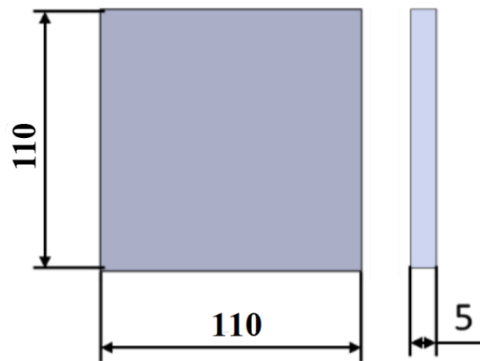
II.1.3 Préparation des échantillons

Les échantillons de polymères utilisés dans nos tests sont des plaques découpées en différentes formes. L'épaisseur des plaques de PVC est d'environ 6 mm, de PTFE est de 5 mm, de PE est de 4,5 mm et de PP est de 5 mm. Les rugosités mesurées pour les quatre polymères ont été $Ra = 1,28 \pm 0,06 \mu\text{m}$ pour le PVC, $Ra = 4,46 \pm 0,25 \mu\text{m}$ pour le PTFE, $Ra = 1,78 \pm 0,09 \mu\text{m}$ pour le PE et $Ra = 0,46 \pm 0,04 \mu\text{m}$ pour le PP. Les plaques de polymère ont été utilisées comme échantillon inférieur et les plaques métalliques comme échantillon supérieur. Toutes les expériences sont réalisées dans une pièce où la température et l'humidité relative sont contrôlées. Pour chaque expérience, nous utilisons un nouvel échantillon (vierge) pour éviter qu'une manipulation affecte l'autre.

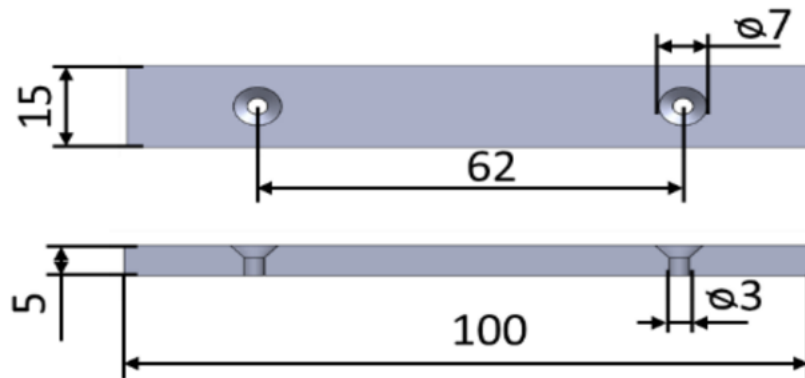
Deux configurations de tribochargement ont été utilisées lors des expériences dans cette thèse, une première configuration Polymère1/Métal, et une deuxième configuration Polymère2/Métal (Figure II.8). L'utilisation d'une plus petite taille de l'échantillon supérieur permet d'ajuster plus facilement la surface de contact. La géométrie différente de la surface de contact peut faire varier la pression de contact et influencer la génération de la charge électrique.



Echantillon polymère 1



Echantillon polymère 2



Echantillon Aluminium/Cuivre

Figure II.8 Géométrie et dimensions en mm des échantillons utilisés.

II.1.4 Dispositif de neutralisation de la charge électrique résiduelle

Afin d'obtenir des résultats reproductibles, il est nécessaire de retrouver les conditions initiales du matériau en termes de potentiel de surface correspondant à une valeur avoisinant le zéro volt avant le début de chaque expérience. Cependant, la manipulation et le transport des échantillons peuvent générer de charges électriques involontaires. Il est donc plus que recommandé qu'avant chaque expérimentation, les éventuelles charges résiduelles des échantillons soient éliminées avec un générateur d'ions bipolaires : ELCOWA, model ECA88-

BS, équipé d'un générateur à haute tension de 5 kV (ELCOWA model SC04B). Ce type de neutralisateur (Figure II.9) est un ensemble d'électrodes couronne de type « pointes » disposées rectilignement et équidistantes. L'alimentation est faite avec une tension alternative pour générer des charges positives et négatives dont le rôle est de neutraliser les charges résiduelles.

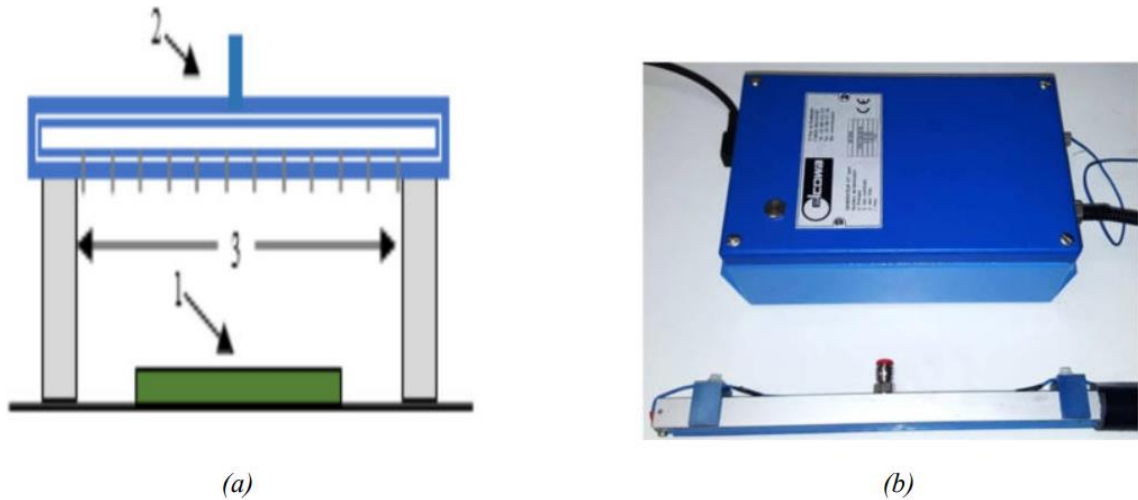


Figure II.9 Processus pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle (a) : (1) échantillon de polymère ; (2) électrode ionisante ; (3) support isolant. (b) générateur d'ions positifs et négatifs.

II.2 Banc expérimental de chargement par effet triboélectrique

Dans le cas d'un contact sec avec frottement, la reproductibilité des résultats est assez délicate. Conscients de ces difficultés, certains chercheurs ont tenté de définir rigoureusement les méthodes expérimentales utilisées pour étudier les effets triboélectriques dans des environnements spécifiques. Plusieurs études ont été liées au risque d'électricité statique dans l'industrie électronique [65,155,156].

Il existe plusieurs techniques de mesure pour caractériser l'uniformité et la stabilité de la répartition des charges sur le plan. La plus utilisée fait appel à des voltmètres électrostatiques sans contact pour mesurer le potentiel électrique généré par les charges externes. Cette méthode de mesure non intrusive est couramment utilisée pour caractériser la charge des films polymères. Elle a récemment été employé pour les recherches sur la charge électrique générée par contact glissant entre de matériaux polymériques [157-162].

Sur la base de ces études, deux dispositifs ont été conçus et réalisés par l'équipe « Tribo-électrostatique » de l'Institut PPRIME pour générer et étudier les effets des charges électriques. Ce travail de recherche a été démarré dans le cadre du projet LABEX "Interactifs", financé par le programme « Les Investissements d'avenir ». Le premier dispositif est un tribomètre linéaire,

qui permet d'étudier le contact glissant entre solides en frottement sec ou lubrifié. Le deuxième mesure la distribution du potentiel électrique à la surface de l'échantillon. Les deux dispositifs sont utilisés ensemble pour étudier les interrelations entre les phénomènes tribologiques et électrostatiques. Ces mesures sont complétées par les mesures de la rugosité et de la composition chimique par spectromètre infrarouge.

II.2.1 Banc expérimental

L'objectif de cette partie est de décrire les équipements et les instruments du banc expérimental du laboratoire, qui permet l'évaluation précise de l'état de charge triboélectrique du polymère, ainsi que les caractéristiques dynamiques du contact glissant conforme qui génère la charge électrique. A travers une étude expérimentale des paramètres liés à la charge triboélectrique d'échantillons parallélépipédiques en contact plan/plan, l'efficacité du banc de chargement a été vérifiée. Une fois cette charge électrique générée, sa distribution a ensuite été évaluée en utilisant un dispositif de mesure de potentiel électrique de surface

Les tribomètres sont couramment utilisés pour étudier les processus de frottement entre différents matériaux ainsi que l'usure qui se produit durant ce processus. Le tribomètre linéaire avec lequel ont été réalisées les études permet l'évaluation précise des effets de tribochargement lors d'un contact sec glissant entre des plaques de polymère, avec le contrôle des conditions de frottement (force normale de contact, vitesse de frottement, temps de frottement/nombre de cycle et la distance de frottement).

Ces études sont basées sur des plaques de polymères rectangulaires ou carrées lors d'un contact plan/plan dans un mouvement de translation linéaire. Ce banc d'essais a été conçu pour répondre aux spécifications suivantes : automatisation du mouvement de glissement pour régler le nombre de cycles et la vitesse de frottement souhaitée. Un système nous permettant de régler la force d'appui, avec un support d'échantillons rigide pour assurer la stabilité du processus de frottement a aussi été installé. Il nous permet aussi d'avoir une mesure précise de la force normale et de la force tangentielle et un enregistrement en temps réel des données pendant les expériences.

Le dispositif de tribochargement est illustré sur la Figure II.10. L'éprouvette supérieure (A) est fixée sur un support (4) qui permet, par l'intermédiaire de deux joints sphériques, le réglage de la planéité du contact entre les plaques de polymères. Deux paliers linéaires perpendiculaires assurent le mouvement vertical pour une force de contact normale. Le support

inférieur (5), qui porte l'éprouvette (B), est entraîné dans un mouvement de va-et-vient dans la direction horizontale assurant ainsi la force tangentielle du contact. Un système de levier (7) est prévu pour régler finement l'intensité de la force de contact normale mesurée par un capteur de force à jauge résistive. Le déplacement du porte échantillon inférieur dans la direction horizontale est assuré par un bloc chariot qui se repose sur un système de rails (6). Le mouvement du chariot (6) et donc de l'éprouvette (B) est mesuré par un capteur de déplacement (9). Le mouvement de va-et-vient est assuré par un moteur linéaire (1) transmis à la tige qui permet d'atteindre la vitesse de 150 mm/s. L'amplitude du glissement peut être modifié en changeant la distance entre les interrupteurs de fin de course (14). Le capteur de force (8) identique au capteur (7) est inséré dans la chaîne cinématique du mouvement tangentiel [161].

Il mesure ainsi continûment la force tangentielle de contact entre les deux éprouvettes. Des conditionneurs de signal (11, 12) pour les capteurs de force et déplacement assurent l'alimentation de ceux-ci et fournissent les signaux analogiques des mesures à la carte d'acquisition (13). La chaîne de mesure est pilotée par un programme LabView (14) en charge de l'acquisition et de la visualisation des mesures des capteurs [161].

II.2.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle

Ce système d'acquisition de données permet le contrôle de quatre paramètres affectant le processus de chargement par effet triboélectrique : la distance de frottement et la vitesse de glissement entre les deux éprouvettes, la force normale, 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 ; il permet le contrôle et le réglage de la vitesse de glissement souhaitée, le nombre de cycles de frottement, ainsi que les informations relatives aux variables utilisées dans l'expérience, à savoir la vitesse du moteur, la course, la force normale, l'humidité relative ambiante, la température de l'air et la nature des paires d'échantillons.



Figure II.10 Banc d'essai tribomètre plan/plan : A- L'échantillon supérieur reste fixe ; B-L 'échantillon inférieur est soumis à une translation alternative ; 1- Moteur linéaire ; 2- Système de contrôle de la force normale ; 3- Thermomètre et hygromètre ; 4- Support de l'échantillon supérieur ; 5- Support de l'échantillon inférieur ; 6- Guidage supporté par un roulement linéaire ; 7- Capteur de force normale ; 8- Capteur de force tangentielle ; 9- Capteur de déplacement linéaire ; 10- Conditionneur de capteur de déplacement ; 11 - Conditionneur de capteur de force ; 12- Carte d'acquisition de données ; 13- Interface d'acquisition LabView ; 14- Interrupteur de fin de course ; 15- Moteur rotatif. [64].

L'interface utilisateur intégrée du banc d'essai est illustrée sur la Figure II.11. Le programme donne la possibilité de contrôler la vitesse de fonctionnement et d'afficher les résultats de mesure des capteurs de force et de déplacement en temps réel. Le poste de commande peut aussi régler la vitesse de translation du moteur linéaire. Pour une charge normale de 20 N, la vitesse maximale du porte échantillon inférieur coulissant peut atteindre 150 mm/s. La même interface permet aussi d'afficher la carte du potentiel électrique mesuré à la surface de l'échantillon ayant subi un tribochargement [161,162].

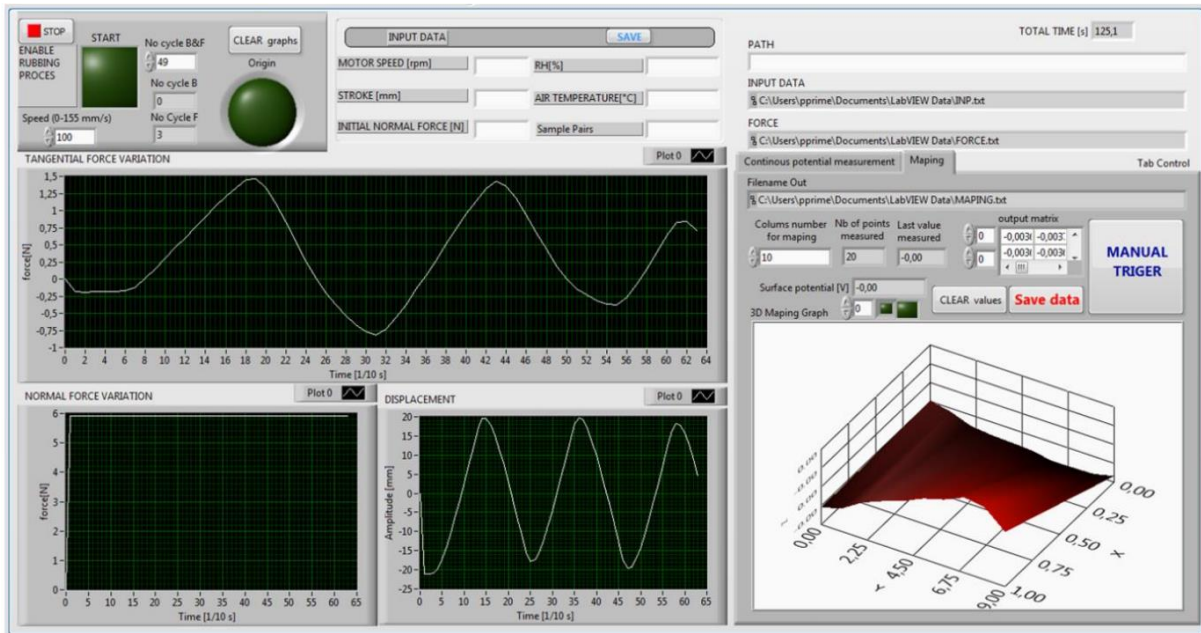


Figure II.11 Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.

L'équipement de mesure des forces est étalonné pour assurer des mesures de qualité. La force normale est mesurée sur une plage de 0 N à 20 N et celle de la force tangentielle de -15 N à + 15 N. Les capteurs de force fonctionnent avec des jauges résistives (JPRM model STC 1205) de portée nominale ± 50 N et de résolution 0,025 N. Ils sont alimentés avec le conditionneur (10) (NEWPORT model INFCS) qui convertit également le signal de sortie sur une plage de +/- 10 V compatible avec la carte d'acquisition NI USB 6210 (12). La mesure du déplacement est réalisée avec le capteur TNC modèle L50R LVDT (Linearly Variable Displacement Transducer). Le capteur (6) permet une mesure avec résolution 0,05 mm et une étendue de 56 mm. Le conditionneur TNC model GDL (11) alimente et convertit le signal du capteur de déplacement (6). Les signaux analogiques des capteurs sont connectés à une carte d'acquisition de données multifonctions NI USB-6210. Elle dispose de 16 entrées analogiques (± 10 V, 16 bits, 250 kéch./s), 4 entrées numériques, de 4 sorties numériques à 5 V chacune et de deux compteurs 32 bits. Ce matériel constitue une solution idéale parfaitement compatible avec le logiciel LabView.

Le contrôle du moteur électrique entraînant le moteur linéaire est assuré par un circuit électronique en pont H (LMD18200T) qui fournit une tension d'alimentation de 12V à 55V avec un courant maximum de 6A. Le pilotage se fait avec une carte Arduino UNO commandée par LabView.

II.3 Banc pour la mesure du potentiel de surface

La mesure du potentiel électrique de surface est une méthode pour évaluer indirectement la distribution de la charge électrique déposée sur la surface de l'isolant, soit par effet triboélectrique, soit par décharge couronne. La mesure de l'évolution du potentiel électrique de surface dans le temps reflète la capacité des polymères de garder la charge acquise par effet triboélectrique.

L'instrument le plus couramment utilisé pour mesurer le potentiel de surface est le voltmètre électrostatique. Celui-ci est équipé d'une sonde permettant de réaliser la mesure sans contact avec l'objet chargé (Figure II.12.a et Figure II.12.b). Le principe de la sonde électrostatique est basé sur l'annulation du champ électrique. Cette méthode consiste à appliquer une tension externe à la sonde réglable jusqu'à ce que le potentiel de celle-ci soit égal au potentiel de la surface chargée, ce qui entraîne l'annulation du champ et ainsi du courant induit. A ce moment, le potentiel de la sonde est égal au potentiel de la surface chargée. Dans notre étude, une sonde électrostatique (modèle 3450, TREK Inc.) connectée à un voltmètre électrostatique ± 10 kV (modèle 3450, TREK Inc.) a été utilisée pour mesurer le potentiel de surface sans contact avec l'échantillon.

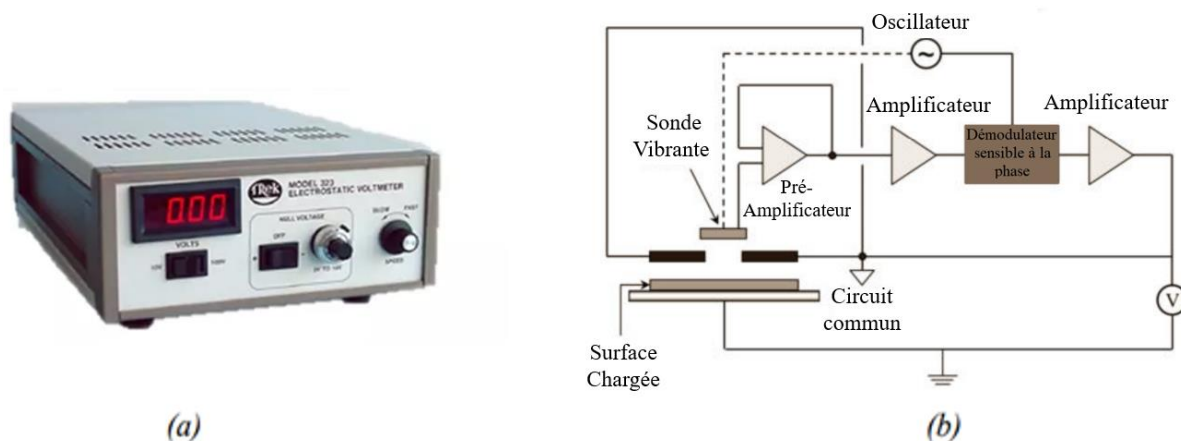


Figure II.12 Photographie (a) et principe de fonctionnement (b) du voltmètre électrostatique.

À la fin du processus de chargement (triboélectrique ou par effet couronne), l'échantillon chargé électriquement est déplacé vers le banc de mesure (Figure II.13).

L'échantillon est d'abord placé sur un support pour être en contact avec une surface bien polie d'une électrode métallique en acier inoxydable mise à la terre et par rapport à laquelle on mesure le potentiel électrique. Ce support est le même que celui du tribomètre linéaire ; il est mobile et permet donc le déplacement de l'échantillon ayant subi un tribochargement entre les

deux installations, celle qui génère le potentiel électrostatique par frottement et celle qui mesure le potentiel électrique de surface. Le fait d'avoir le même support donne la possibilité d'identifier la position de mesure du potentiel électrique de surface par rapport aux zones de contact. La sonde électrostatique est entourée d'un support isolant qui est fixée sur un bras mobile, qui a des mouvements de translation selon les axes x et z. La table mobile et le bras font partie d'un système de positionnement à 3 axes contrôlé par l'ordinateur. La sonde à induction électrostatique TREK, modèle P0865, est reliée à un voltmètre électrostatique (TREK, modèle 341B) qui effectue la conversion des signaux. L'ensemble sonde - voltmètre peut mesurer un potentiel dans la gamme de 0 à ± 10 kV, avec une précision supérieure à $\pm 0,1\%$. La vitesse de réponse est supérieure à 0,2 ms / 1 kV. La distance entre la sonde et l'échantillon à scanner est maintenue à 3 mm, conformément aux spécifications du fabricant.

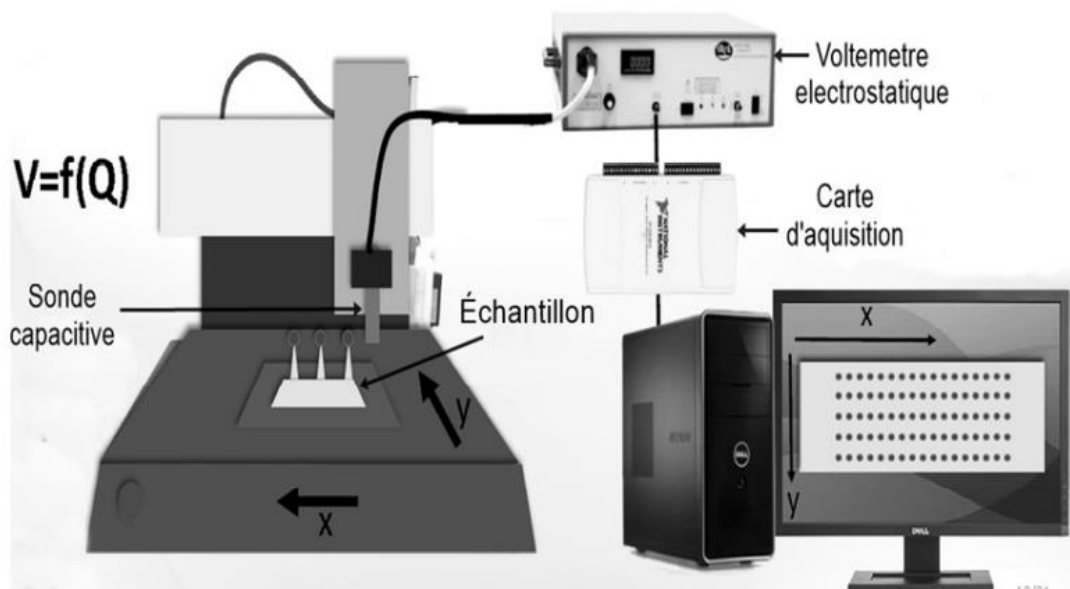


Figure II.13 Banc de mesure et de cartographie du potentiel électrique.

Le signal analogique à la sortie du voltmètre électrostatique représente le potentiel électrique mesuré par la sonde électrostatique, diminué 1000 fois et envoyé à une carte d'acquisition NI USB 6210. L'acquisition des données se fait à l'aide d'un ordinateur équipé du logiciel LabView. La méthode utilisée lors des cartographies du potentiel électrique généré après tribochargement est appelée " scan point par point " : la sonde est placée à un endroit précis et prend une mesure au bout de 0,5 s. Ce temps permet à la sonde de se stabiliser pour réaliser une mesure précise.

II.4 Dispositif de décharge à barrière diélectrique

La décharge à barrière diélectrique (DBD) est une excellente source de plasma pour le traitement de surface. Le banc d'essai de génération de plasma froid (Figure II.14) a été utilisé afin d'étudier l'influence de la DBD sur le comportement électrostatique des plaques de polymères après tribochargement. Ainsi, il a été possible d'évaluer l'effet des paramètres électriques et géométriques du traitement par le plasma froid sur la génération et la dissipation des charges triboélectriques générées à la surface des polymères.

Le montage expérimental est illustré sur les Figures II.14 et II.15. L'installation est composée d'une unité DBD alimentée par un amplificateur haute tension (TREK, modèle 30/20 A), d'un système de mesure et d'un système d'acquisition. Un générateur de signal (marque YOKOGAWA-FG300) est utilisé pour piloter l'amplificateur, plusieurs ajustements pouvant être apportés à la forme d'onde (carrée, sinusoïdale, triangulaire, etc.) et à la fréquence de la tension (de 1 μ Hz à 15 MHz), mais aussi au rapport cyclique et à l'offset, etc. L'amplificateur fournit une tension de sortie élevée avec un rapport de multiplication ($\times 3000$) pour le signal de commande du générateur de signaux. La tension continue maximale est de 30 kV et le courant est de 20 mA ; le taux de montée du signal de sortie est de 550 V/ μ s.

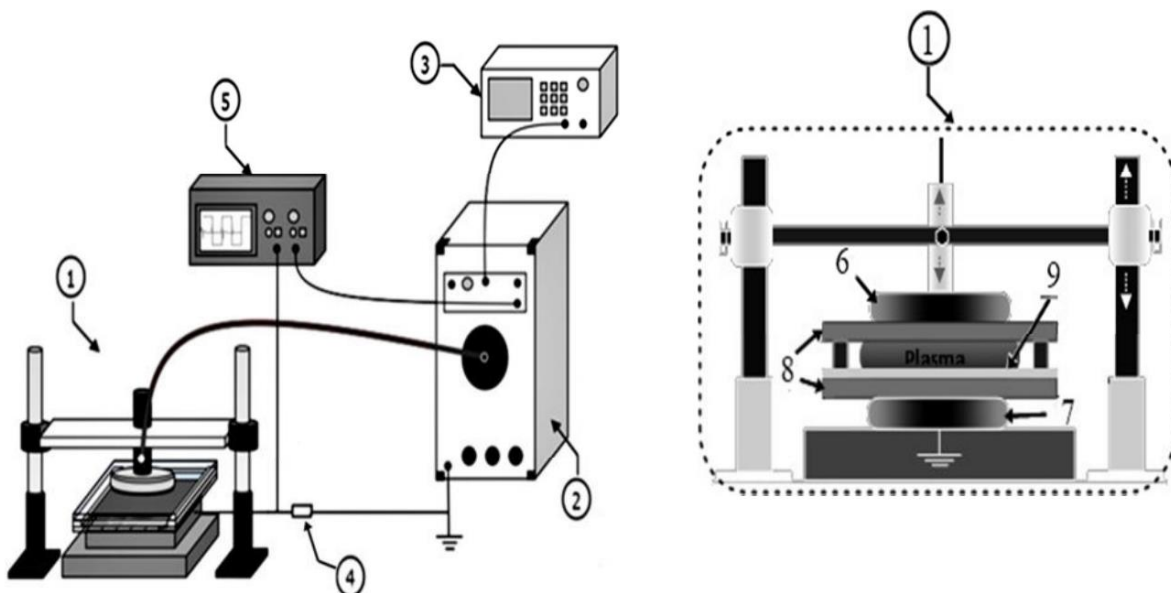


Figure II.14 Schématisation de l'installation expérimentale de génération de la DBD : (1) cellule DBD ; (2) amplificateur de puissance HT; (3) générateur de fonction; (4) résistance non inductive; (5) oscilloscope; (6) électrode active; (7) électrode mise à la terre; (8) barrière diélectrique (verre); (9) échantillon de polymère.

L'installation DBD est constituée de deux électrodes circulaires en aluminium d'un diamètre de 70 mm et d'une épaisseur de 10 mm. La distance entre elles peut être modifiée

manuellement à l'aide d'un système coulissant constitué d'isolants, l'électrode supérieure (active) est mobile, et l'électrode inférieure reliée à la terre est fixe. Ces électrodes sont séparées par deux barrières diélectriques carrées en verre, d'une épaisseur variable (3 mm, 4 mm, et 5 mm) et d'une dimension de $150 \times 150 \text{ mm}^2$. La taille de ces barrières diélectriques est supérieure à la taille des électrodes pour éviter que le plasma froid ne contourne la surface à traiter. La première barrière est placée sur l'électrode mise à la terre. Cette électrode 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. La configuration plan-plan de la DBD utilisée dans cette étude présente l'avantage de traiter les surfaces des polymères de manière uniforme tout en évitant tout contact entre le plasma et les électrodes.

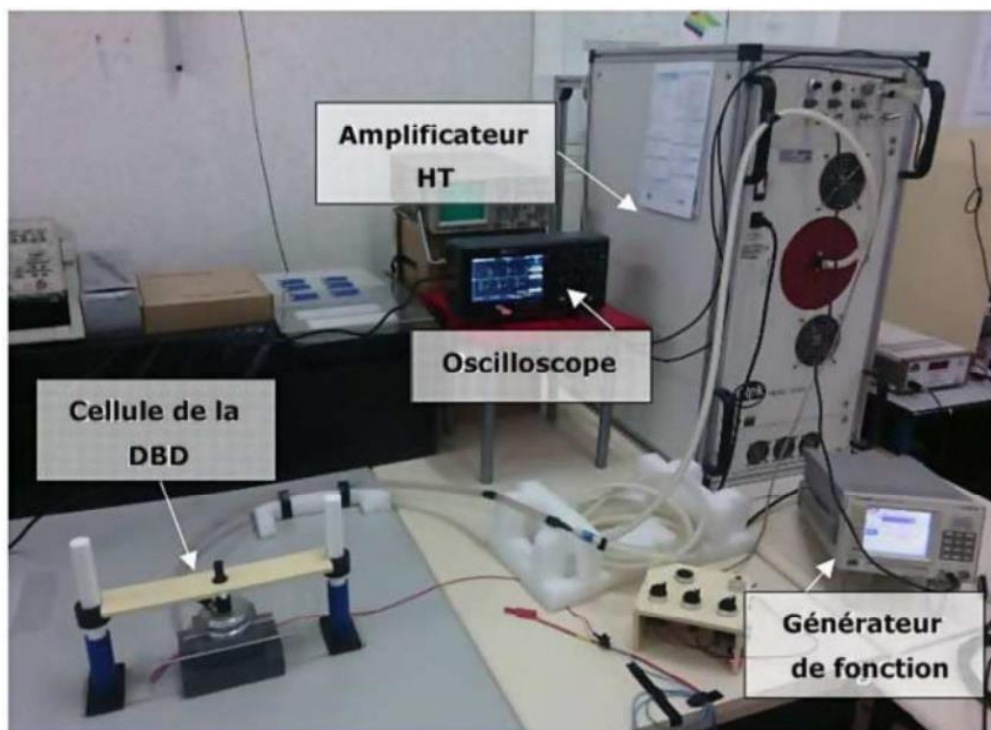


Figure II.15 Photographie de l'installation complète de la cellule de traitement par DBD.

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.

II.5 Dispositif de contrôle de l'humidité et de la température ambiante

L'humidité et la température ambiante sont des facteurs ayant une grande influence sur la génération de charge par effet triboélectrique. Aussi est-il fortement recommandé de maintenir ces deux facteurs constants tout au long du déroulement des expériences. Une étude a été menée pour évaluer l'influence de l'humidité ambiante sur le chargement triboélectrique des polymères.

Un dispositif de contrôle des conditions climatiques « Armoire C A/W » (Figure II.16.a) a permis de contrôler et de maintenir constantes l'humidité et la température du local dans lequel se sont déroulées les expériences. Le taux d'humidité dans le local a pu être varié de 10% à 80%, tandis que de la température a été réglée entre 10 °C et 40 °C.

Les armoires de climatisation « C A/W » ont été fabriquées pour répondre d'une manière efficace au besoin de rafraîchissement des salles développant une charge thermique élevée et où la production centralisée d'eau glacée n'est pas présente. Ces unités répondent aussi bien aux salles d'archives, conservation, musée, laboratoire, IRM, Radiologie, Scanner, etc.

Le niveau de bruit global des unités est maintenu à un faible seuil par l'utilisation de compresseurs "scroll", qui sont installés avec le circuit frigorifique dans un compartiment séparé du flux d'air. Les unités ont été conçues pour présenter la plus faible empreinte possible au sol, avec accès total façade, facilitant l'inspection et la maintenance.

Cette armoire est aussi équipée d'une isolation interne thermique et acoustique en polyuréthane expansé auto extinguable de classe 1 anti feu (UL 94-HF1) densité 30 Kg/m³ et une conductibilité thermique de 0,033 w/m°C, avec une épaisseur de l'isolant de 20mm sur le panneau externe et de 15mm sur le panneau interne.

L'armoire est composée des joints étanches à l'air autour des panneaux à double densité de polyuréthane avec un bac condensas en Inox 304, équipé d'un siphon pour les unités à soufflage inversé. La batterie responsable de l'alimentation de la machine est une batterie froide type détente directe avec tube en cuivre et ailettes aluminium, recouverte d'un film hydrophile, et un multi distributeur type venturi sur chaque circuit contenant une filtration de type lavable en fibre synthétique, avec cadre en acier galvanisé et d'efficacité G4 selon la norme EN779.

L'armoire dispose également d'un ventilateur type EC à commutation électronique, commandé par un signal 0-10 V. Le ventilateur est monté sur plots antivibratoires. Il est aussi équipé d'un compresseur hermétique de type "scroll", avec vannes de sécurité. Le moteur électrique à deux pôles avec protection thermique interne est installé dans un compartiment séparé du flux d'air et monté sur plots antivibratoires.

L'armoire thermique contient un déshydrateur à cristaux de silice, qui assure le contrôle de l'humidité ambiante de la chambre d'essais, , et un voyant liquide avec indicateur d'humidité avec changement de couleur, ainsi qu'un détendeur thermostatique à égalisation externe.

Deux pressostats de sécurité font également partie des composants de la machine, le premier est un pressostat à haute pression avec réarmement manuel, quant au deuxième de basse pression, il est à réarmement auto. Un circuit frigo en tube de cuivre calorifié est fixé à la structure de l'unité de façon appropriée

L'armoire dispose également d'un coffret électrique complet avec : sélectionneur général en façade, contrôleur de phase, disjoncteur thermique pour chaque organe, contacteurs moteurs ventilateurs, contacteurs moteurs compresseurs, transformateurs pour organes auxiliaires et des composants et des câblages conformes aux normes CE.

L'armoire thermique est équipée d'une interface utilisateur (Figure II.16.b), pour la visualisation des conditions de fonctionnement, avec les caractéristiques suivantes: visualisation de la consigne de température et de la température ambiante, visualisation des paramètres de fonctionnement, contrôle de l'interface par deux niveaux de "menu" sous mot de passe, reset d'alarme et test unité pour autodiagnostic.

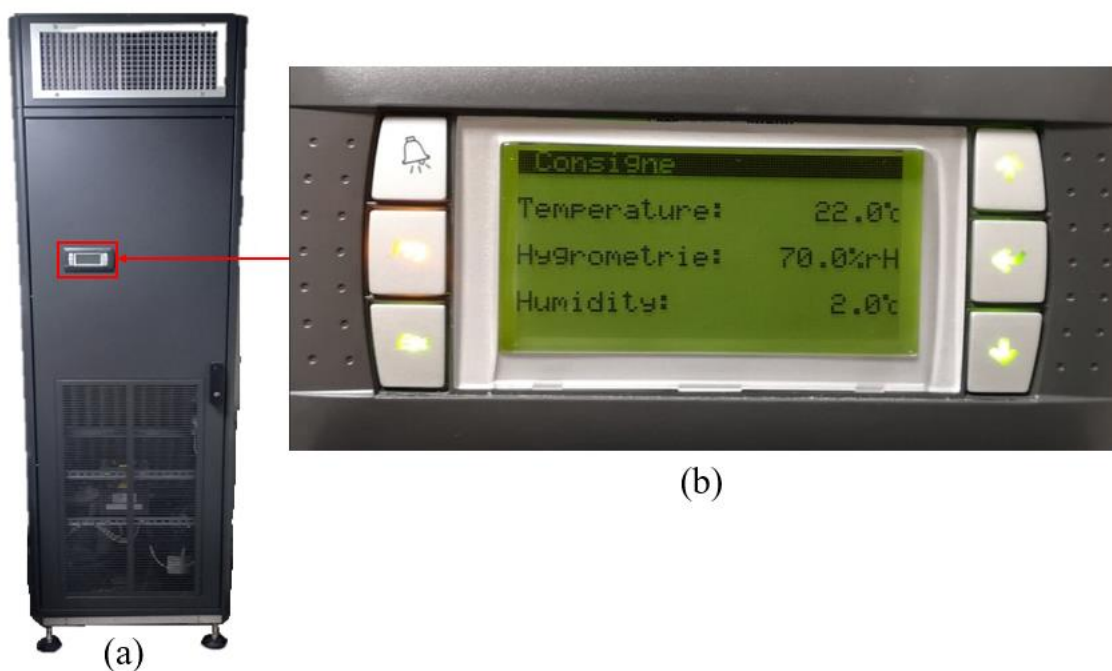


Figure II.16 a) Photographie de la machine de contrôle de l'humidité et de la température. b) Panneau de contrôle de la machine.

La précision de réglage du dispositif expérimental conduit à une bonne répétabilité et à une dispersion négligeable des résultats. Pour évaluer la répétabilité de la mesure, nous avons au moins effectué quatre tests pour chaque expérience. Cependant, ce sont les valeurs moyennes qui ont été utilisées tout au long de nos analyses. Ainsi, pour des essais réalisés selon la même méthode et les mêmes conditions atmosphériques, la dispersion des résultats obtenus est suffisamment faible pour ne pas affecter l'interprétation de ces résultats.

II.6 Conclusions

Plusieurs installations expérimentales ont été mises au point et équipées de l'instrumentation nécessaire pour caractériser le contact glissant entre deux polymères ou entre un polymère et une pièce métallique, en rapport avec le processus de triboélectrification.

Différents types de polymères seront étudiés pour mieux identifier le comportement triboélectrique des isolants. Dans le processus d'élaboration de l'échantillon lui-même, le soin sera pris pour maintenir le même état de surface. Un spectromètre et des rugosimètres seront utilisés pour caractériser respectivement la composition chimique des matériaux ainsi que leur état de surface.

Un banc d'essai instrumentalisé nous donnera la possibilité de caractériser les conditions dynamiques pendant le contact glissant plan/plan pour des paires polymères/polymères ou

polymères/métal. Les expériences seront réalisées avec divers matériaux, pour de larges gammes de variation des forces normales appliquées et des vitesses relatives de déplacement.

Un voltmètre électrostatique sans contact sera utilisé pour évaluer l'efficacité du dispositif de génération de charges par effet triboélectrique.

Un dispositif à décharge à barrières diélectrique (DBD) assurera le traitement par plasma froid des plaques de polymères, avant le tribochargement.

Les conditions climatiques ambiantes (température et humidité) seront contrôlées par une installation dédiée, pour étudier l'influence de l'humidité sur le comportement triboélectrique des polymères.

Le chapitre suivant va aborder l'étude du comportement triboélectrique et surfacique de certains polymères, sous l'influence d'une décharge par barrière diélectrique.



« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but n'en change pas. »

- Léonardo de Vinci (1452 – 1519)

Chapitre III : Modification des propriétés surfaciques et triboélectriques des polymères par une décharge à barrière diélectrique

Le contrôle de la charge électrique générée par contact et/ou frottement a toujours été un objectif important des recherches dans le domaine de la triboélectricité. Quand cette charge peut causer des nuisances aussi bien aux individus qu'aux équipements, son élimination devient nécessaire.

Les moyens pour éliminer ces charges indésirables sont divers : mise à la terre des objets concernés, augmentation de l'humidité ambiante, utilisation d'ioniseurs à base de décharge couronne ou à barrière diélectrique, etc. Cependant, pour le cas contraire, quand la charge doit être favorisée, les moyens sont en réalité limités. Parmi les paramètres permettant l'augmentation de la charge, on trouve : la pression de contact, la température, la nature du matériau...etc., et même le traitement DBD qui peut être à la fois un paramètre favorisant ou limitant de la génération de charge triboélectrique.

Les décharges à barrière diélectrique (DBD) sont connues pour être une excellente source de plasma pour le traitement de surface. L'exposition à la DBD modifie à la fois la morphologie et la composition chimique de la surface des polymères traités ; elle augmente également la rugosité du polymère et modifie sa mouillabilité. Le taux d'usure des composites polymères a été approximativement divisé par deux après un traitement approprié au plasma à basse pression [163].

La rugosité est l'un des principaux facteurs qui affectent la charge électrique générée par effet triboélectrique entre les polymères. Des études précédentes ont clairement montré que le traitement par décharge à barrière diélectrique (DBD) modifie les caractéristiques de surface des polymères, y compris leur capacité à retenir la charge électrostatique. Ainsi, Sharma et al. [137] ont montré que le traitement par plasma de poudres de polystyrène (PS) et de films de polyéthylène (PE) à l'argon, l'hélium et l'air atmosphérique, réduit les charges triboélectriques acquises par les polymères ainsi que leur résistivité électrique de surface.

Bekkara et al. [164] ont réalisé une étude sur la modification des caractéristiques de surface et des propriétés triboélectriques des polymères par plasma DBD dans l'air atmosphérique et ont montré que l'exposition au DBD agit de deux manières sur la tribocharge des granules

de polymères (Figure III.1). Pour un traitement de courte durée de l'ordre de 2 à 5 secondes, l'effet triboélectrique peut être renforcé. A l'inverse, pour un traitement de longue durée de l'ordre d'une minute ou plus, la charge générée par tribochargement est diminuée. Ils ont conclu aussi que l'effet du traitement du polymère par DBD dans l'air peut se résumer par un changement de rugosité (augmentation des points de contact) et un changement de mouillabilité (augmentation de la conductivité de surface). Cette combinaison d'effets influence le comportement du polymère traité lors de la charge triboélectrique. Autrement dit, la rugosité permet d'augmenter le nombre de points de contact à la surface des polymères et ainsi la capacité de le charger par voie triboélectrique, tandis que la mouillabilité opère dans le sens contraire en augmentant la conductivité de surface des polymères et par conséquent aide à accélérer la dispersion et la perte de la charge triboélectrique [164]

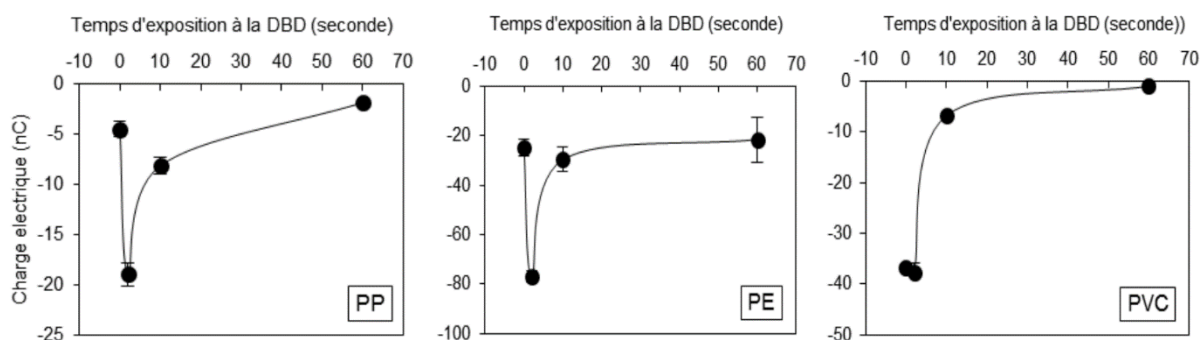


Figure III.1 Evolution de la tribo-charge des granules en fonction du temps d'exposition à la DBD [164].

Une décharge à barrière diélectrique (DBD) s'établit entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau à propriétés diélectriques. Cette dernière joue le rôle d'un condensateur en série avec le plasma. Ainsi, l'accumulation de charges à la surface de la barrière diélectrique entraîne une chute de la différence de potentiel entre les deux électrodes et évite le passage à l'arc.

Au cours d'un traitement DBD, des radicaux, des ions et des photons se produisent. Ces espèces réagissent avec la surface du polymère en modifiant ses propriétés mécaniques, électriques et optiques. Un polymère exposé à un plasma subit des réactions qui engendrent un changement de la composition et la structure de quelques couches moléculaires de la surface (Figure III.2) ainsi qu'une augmentation de la rugosité du polymère et de son énergie de surface.

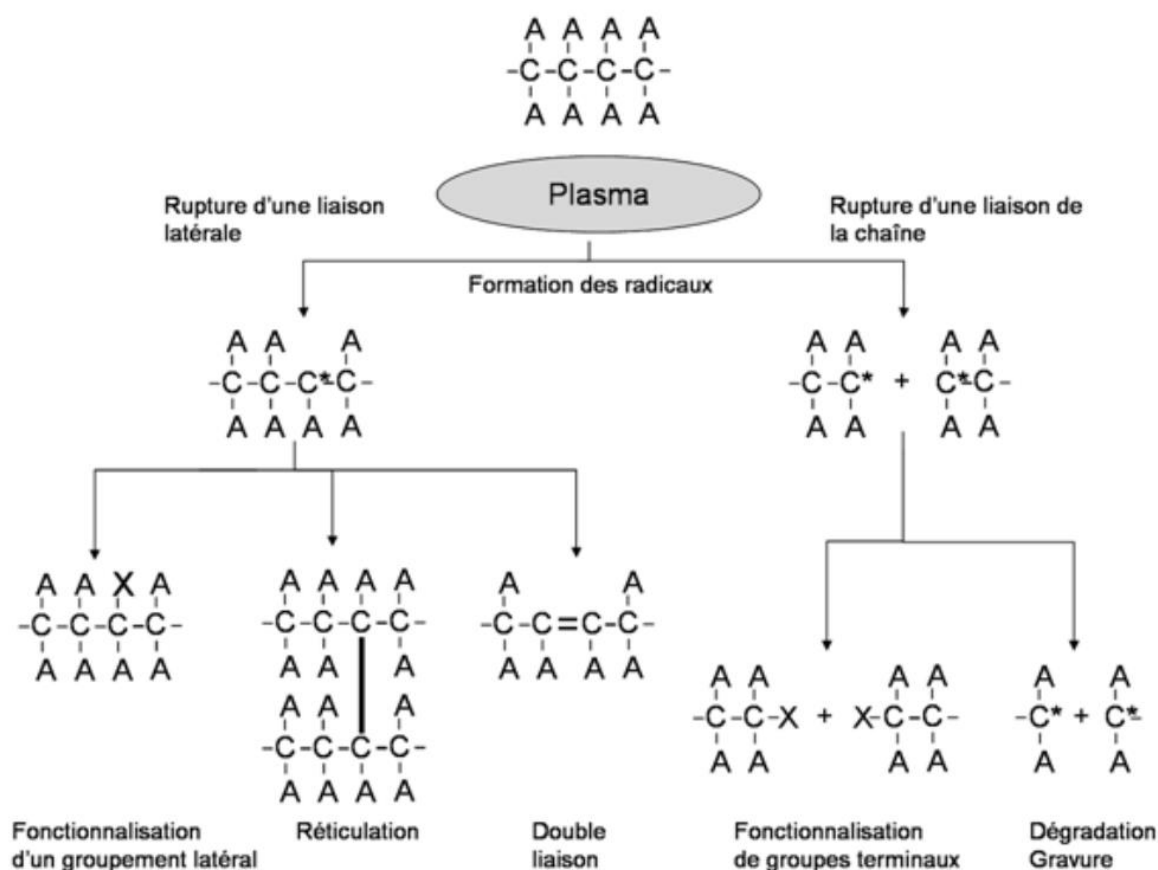


Figure III.2 Schéma des réactions du contact d'un plasma à la surface d'un polymère [165].

Les chercheurs ont démontré que cette combinaison de changements influence les propriétés triboélectriques des matériaux isolants. La rugosité de surface, par exemple, augmente le nombre de points de contact à la surface des polymères et, comme rapporté par Neagoe et *al.* [99], la charge électrique acquise par frottement augmente également. La mouillabilité se manifeste par la présence d'une fine couche d'eau superficielle qui facilite le transfert de charge entre les deux corps, augmentant ainsi la capacité de tribochargement.

Ainsi, l'utilisation de la DBD, pourrait constituer un moyen efficace pour le contrôle et l'amélioration des phénomènes de chargement électrostatique : telle est donc l'idée de base de notre travail dans cette partie.

L'objectif de cette étude est donc d'évaluer les différents facteurs de la décharge à barrière diélectrique qui peuvent affecter la rugosité des plaques de polypropylène exposées à un plasma froid dans plusieurs configurations. Elle vise également à mettre en évidence les corrélations qui pourraient exister entre la modification de la rugosité et le potentiel électrique généré par effet triboélectrique à la surface du polypropylène traité par DBD atmosphérique.

III.1 Procédure expérimentale

III.1.1 Cellule de traitement par DBD

Le traitement de surface des plaques de polymères a été effectué par DBD dans des conditions atmosphériques. Pour créer cette décharge, un signal alternatif a été produit par un générateur de fonction (Yokogawa FG300). L'amplificateur délivre une haute tension de sortie avec un rapport de multiplication de 3 kV/1 V (x 3000) par rapport au signal de pilotage du générateur de signaux. La tension maximale fournie par l'amplificateur est de ± 30 kV avec un courant de ± 20 mA ; la vitesse de montée du signal de sortie est de 550 V/ μ s. Un oscilloscope numérique de la marque Lecroy (série Waveace 1001) a été utilisé pour surveiller le signal de sortie de l'amplificateur. Le banc expérimental utilisé pour le traitement de surface des plaques est schématisé sur la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Le pilotage de l'amplificateur haute tension est montré dans la Figure III.4. Une photographie de la cellule DBD est représentée sur la Figure III.5.

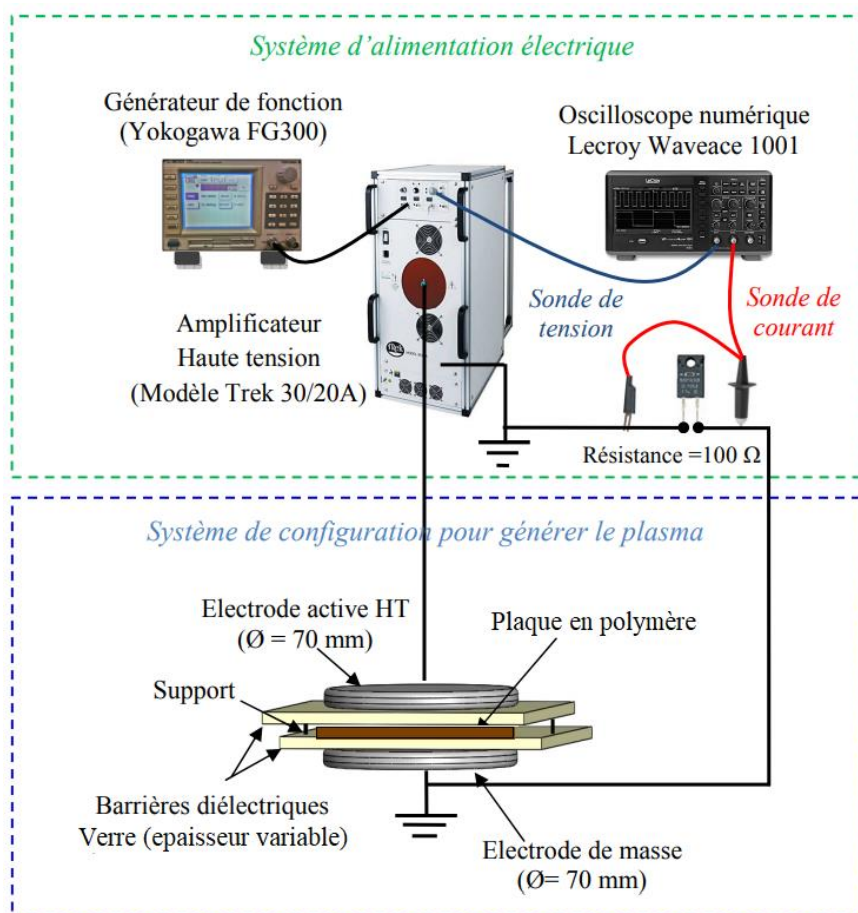


Figure III.3 Schéma global du montage expérimental utilisé pour le traitement de plaques de polymères par la DBD.

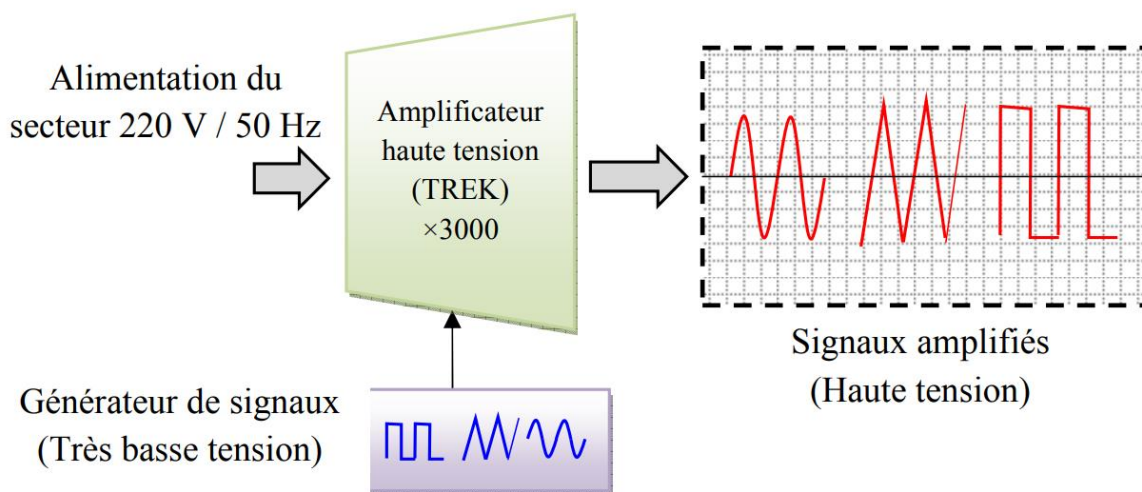


Figure III.4 Pilotage de l'amplificateur haute tension.

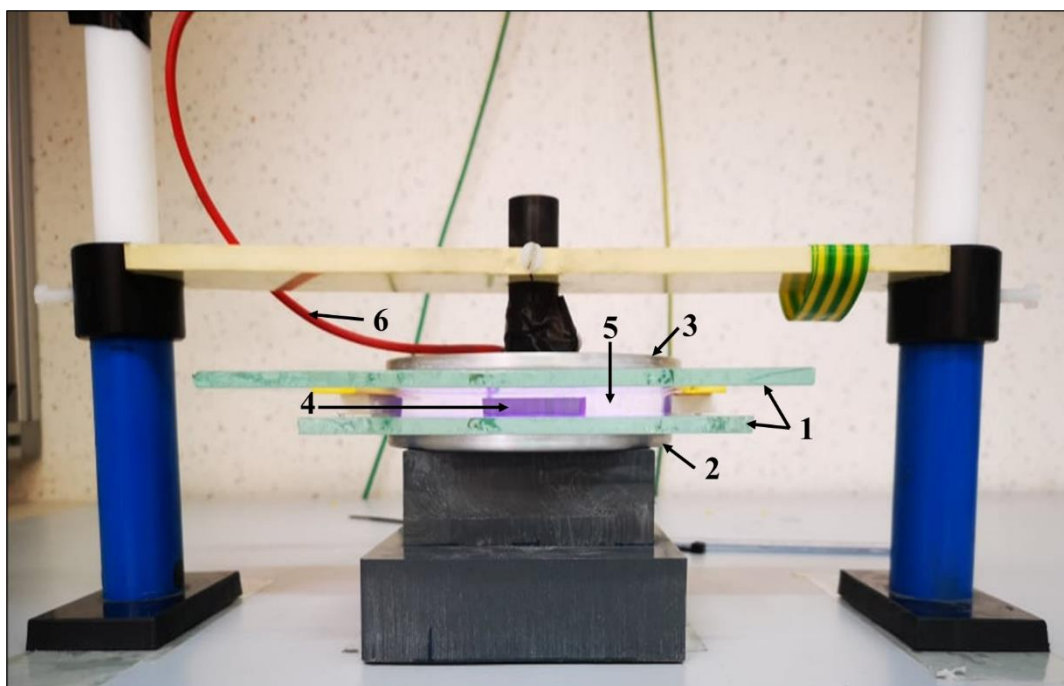


Figure III.5 Photographie d'un traitement DBD en cours sur un échantillon en PP.

- (1) Barrières diélectriques ; (2) électrode reliée à la terre ; (3) électrode active ; (4) échantillon de polymère ;
 (5) Plasma ; (6) câble de haute tension..

III.1.2 Matériaux

Les expériences de tribochargement ont été réalisées en utilisant des paires d'échantillons PP / métal. Ce choix était justifié par le fait que le PP est l'un des polymères les plus utilisés dans l'industrie en raison de ses excellentes propriétés mécaniques. Pour le métal utilisé dans

cette étude, un échantillon d'aluminium a été sélectionné car des tests préliminaires avaient montré qu'il générerait une charge plus élevée sur des échantillons de PP par rapport à l'acier inoxydable ou le cuivre. Les dimensions de l'échantillon d'aluminium (A) étaient : 100 mm x 15 mm x 5 mm, et celles des échantillons de PP (B) : 100 mm x 100 mm x 4,5 mm. (Figure III.6).

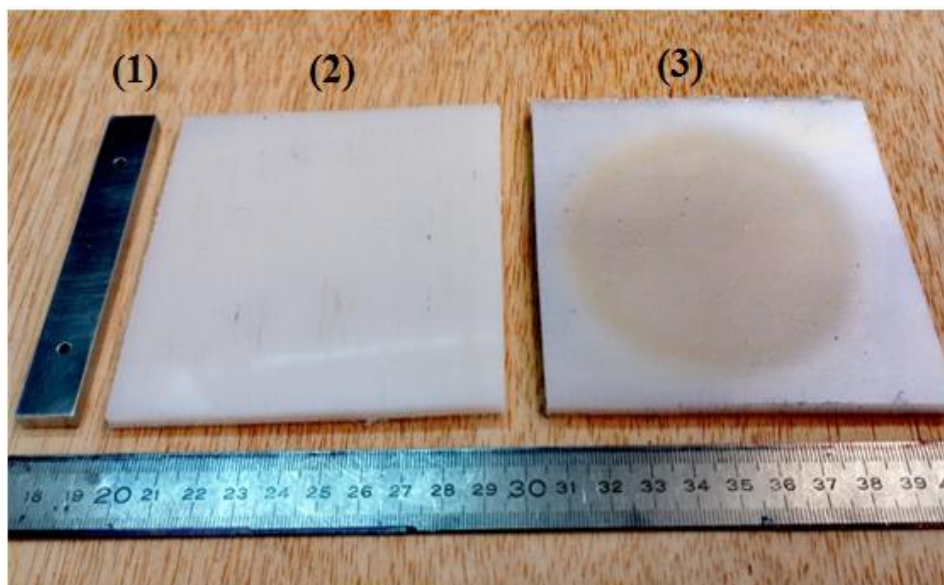


Figure III.6 Photographie des échantillons utilisés dans les expériences ; (1) échantillon d'aluminium ; (2) échantillon de PP non traité ; (3) échantillon de PP traité.

Les plaques carrées de polypropylène (PP), ont été traitées par une décharge à barrière diélectrique (DBD) atmosphérique générée entre deux électrodes en forme de disque (\varnothing 70 mm), alimentées par l'amplificateur de courant alternatif 30 kV, 20 mA.

III.1.3 Méthode et procédure

L'étude visait à évaluer les facteurs pouvant affecter la rugosité et le comportement triboélectrique des échantillons traités au plasma, tous les paramètres variables de la cellule DBD sont montrés sur la Figure III.7 : La distance inter-électrode (10,5 mm à 13,5 mm), le temps de traitement (5 min à 20 min) et la configuration de la cellule DBD, c'est-à-dire du nombre des diélectriques en verre (un ou deux) ainsi que leur épaisseur (entre 4 mm et 9 mm). Les échantillons non traités et ceux qui sont traités par DBD ont été tous tribochargés dans un tribomètre linéaire, afin d'évaluer l'effet du traitement par plasma froid sur le potentiel électrique généré à la surface du polymère par effet triboélectrique. L'altération de l'aspect de la surface après chaque traitement a été analysé par des mesures effectuées avec un rugosimètre

portable (Surftest SJ-210) et confirmé par la suite à l'aide d'un microscope numérique de haute précision (Keyence VHX-7000).

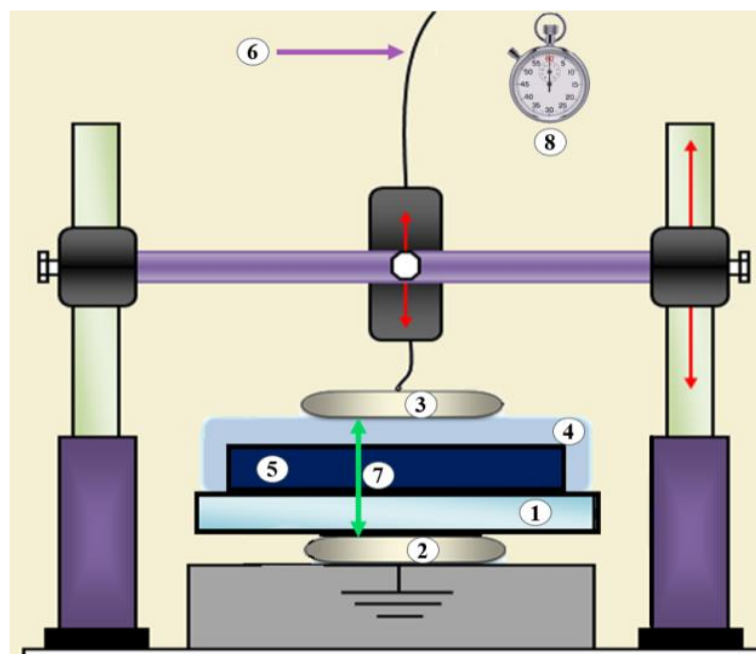


Figure III.7 Réacteur DBD ; (1) Diélectrique (verre) ; (2) électrode à plaque mise à la terre ; (3) électrode haute tension ; (4) plasma ; (5) échantillon de polymère (PP) ; (6) Haute tension AC ; (7) Distance inter-électrode ; (8) Temps de traitement.

Comme mentionné précédemment (Figure III.7), la rugosité de surface a été mesurée avec un instrument portable (Surftest, modèle SJ-210). Les mesures peuvent être réalisées sur des distances de 16 mm suivant l'axe x (longueur) et de 4,8 mm suivant l'axe y (largeur), à différentes vitesses (0,25 mm/s, 0,5 mm/s et 0,75 mm/s). La plage d'amplitude de mesure est de 360 μm (- 200 μm à 160 μm). L'appareil applique automatiquement un filtre gaussien et la norme de rugosité ISO1997. Dans nos études, la vitesse de mesure a été définie à 0,25 mm/s sur une distance $x = 15$ mm avec une longueur d'onde limite $\lambda_c = 0,08$ mm.

Pour chaque configuration, l'expérience a été répétée pour deux échantillons, afin de confirmer les résultats obtenus. La rugosité de chaque échantillon a été mesurée sur trente lignes répartis aléatoirement (15 lignes suivant l'axe X et 15 lignes suivant l'axe Y). La moyenne et l'écart-type de ces mesures ont été calculés, afin d'évaluer l'effet du traitement par plasma non thermique sur la rugosité des plaques PP. Pour s'assurer de la précision des mesures, les valeurs de rugosité obtenues avec l'appareil portable ont été comparées à celles obtenues avec un microscope numérique Keyence VHX-7000.

Les paramètres moyens de rugosité du PP à l'état brut (avant traitement DBD) étaient : $Ra = 0,06 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$) et $Rq = 0,08 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$).

Les différents paramètres du banc de chargement triboélectrique sont restés inchangés tout au long des expériences : la force normale 20 N, la vitesse de translation 20 mm/s, la course du porte-échantillon inférieur 70 mm et le nombre de cycles de tribochargement (frottement) 20 (Figure II.10).

La neutralisation de l'échantillon PP a été effectuée avant et après chaque opération de traitement DBD. Cette action a permis d'éliminer toutes les charges électriques résiduelles qui pouvaient exister avant le début du traitement ou qui ont été générées par la DBD. La neutralisation a été effectuée à l'aide d'une barre antistatique (380 mm x 20 mm x 20 mm) (ELCOWA, modèle ECA88-BS), équipée d'un générateur de haute tension alternative de 5 kV (ELCOWA modèle SC04B). La barre a été maintenue fixe à une hauteur de 5 mm au-dessus de l'échantillon, qui est passé quatre fois sous elle à une faible vitesse manuelle, afin d'obtenir une neutralisation efficace des charges. La neutralisation est ensuite confirmée par la mesure du potentiel électrique de surface avec une sonde sans contact.

III.2 Étude de l'influence des différents paramètres du traitement DBD atmosphérique sur la rugosité de surface

Dans un premier temps, une étude concernant l'effet des paramètres variables de la cellule DBD sur l'état de surface d'échantillons de polypropylène traités par plasma froid sera réalisée. Le but est de trouver une configuration optimale de la cellule afin d'obtenir des résultats notables sur la modification de surface par plasma froid.

III.2.1 Influence de la durée de traitement DBD

La première série d'expériences visait à étudier l'effet du temps de traitement sur la rugosité de surface des échantillons de PP (Figure III.8). Des prises de mesures de rugosité ont été faites dans un premier temps sur des échantillons non-soumis à un traitement par DBD (0 minutes de durée de traitement). Pour pouvoir réaliser une comparaison par la suite avec des échantillons traités pendant différentes durées de traitement au plasma froid, avec un temps de traitement allant de $t = 0$ minutes (non traité) jusqu'à $t = 20$ minutes, les autres paramètres sont maintenus constants. La tension efficace de signal carré et la fréquence ont été maintenues constantes à 30 kV et à 2000 Hz, respectivement. La distance inter-électrodes a été fixée à 12,5 mm (4 mm d'intervalle d'air) et l'épaisseur de la barrière diélectrique en verre à 4 mm.

Pour une durée de traitement à la DBD de 5 minutes, une faible augmentation a été constatée au niveau des deux paramètres de rugosité ' Ra ' et ' Rq ', qui ont vu la valeur ' Ra ' accroître de 0,062 μm à 0,072 μm et la valeur ' Rq ' de 0,083 μm à 0,099 μm .

En augmentant la durée de traitement à 10 minutes, une nette augmentation des paramètres de la rugosité a été observée, les valeurs ' Ra ' et ' Rq ' ont doublé, passant de 0,062 μm à 0,133 μm et de 0,081 μm à 0,169 μm respectivement.

Pour 15 minutes de traitement à la DBD, les paramètres de la rugosité ' Ra ' et ' Rq ' ont continué leur accroissement avec la durée de traitement, passant de leurs valeurs initiales de 0,062 μm à 0,158 μm pour le ' Ra ' et de 0,083 μm à 0,201 μm pour le ' Rq '.

La durée de traitement la plus longue (20 minutes) a eu l'effet le plus significatif sur les deux paramètres de rugosité, les paramètres de rugosité ont vu leurs valeurs plus que quadruplé passant de 0,062 μm à 0,245 μm pour le ' Ra ' et de 0,083 μm à 0,308 μm , ce changement au niveau de la rugosité a pu être constaté visuellement comme cela est montré sur la Figure III.6.

Une durée de traitement à la DBD supérieure à 20 minutes n'était pas possible, puisque la barrière diélectrique en verre avait tendance à se fissurer au bout de la 22ème minute. En effet, ceci peut être expliqué par le fait que le mouvement intense des ions et des électrons qui constituent le plasma génère une forte chaleur et le diélectrique en verre ne peut plus la supporter au bout d'un certain temps.

Une autre explication possible est que le bombardement ionique du plasma froid provoque le vieillissement de la matière et pousse le verre à se fissurer après une certaine période de traitement.

Les valeurs des deux paramètres " Ra " et " Rq " ont augmenté au fur et à mesure avec la durée du traitement ; plus le temps d'exposition à la DBD atmosphérique est long, plus la rugosité du PP est élevée. Le coefficient de corrélation entre le temps de traitement à la DBD et les valeurs de la rugosité de l'échantillon traité est de 0,97. Quand ce coefficient est proche de 1, cela veut dire que le facteur « durée de traitement » a une forte influence sur l'état de surface de l'échantillon traité.

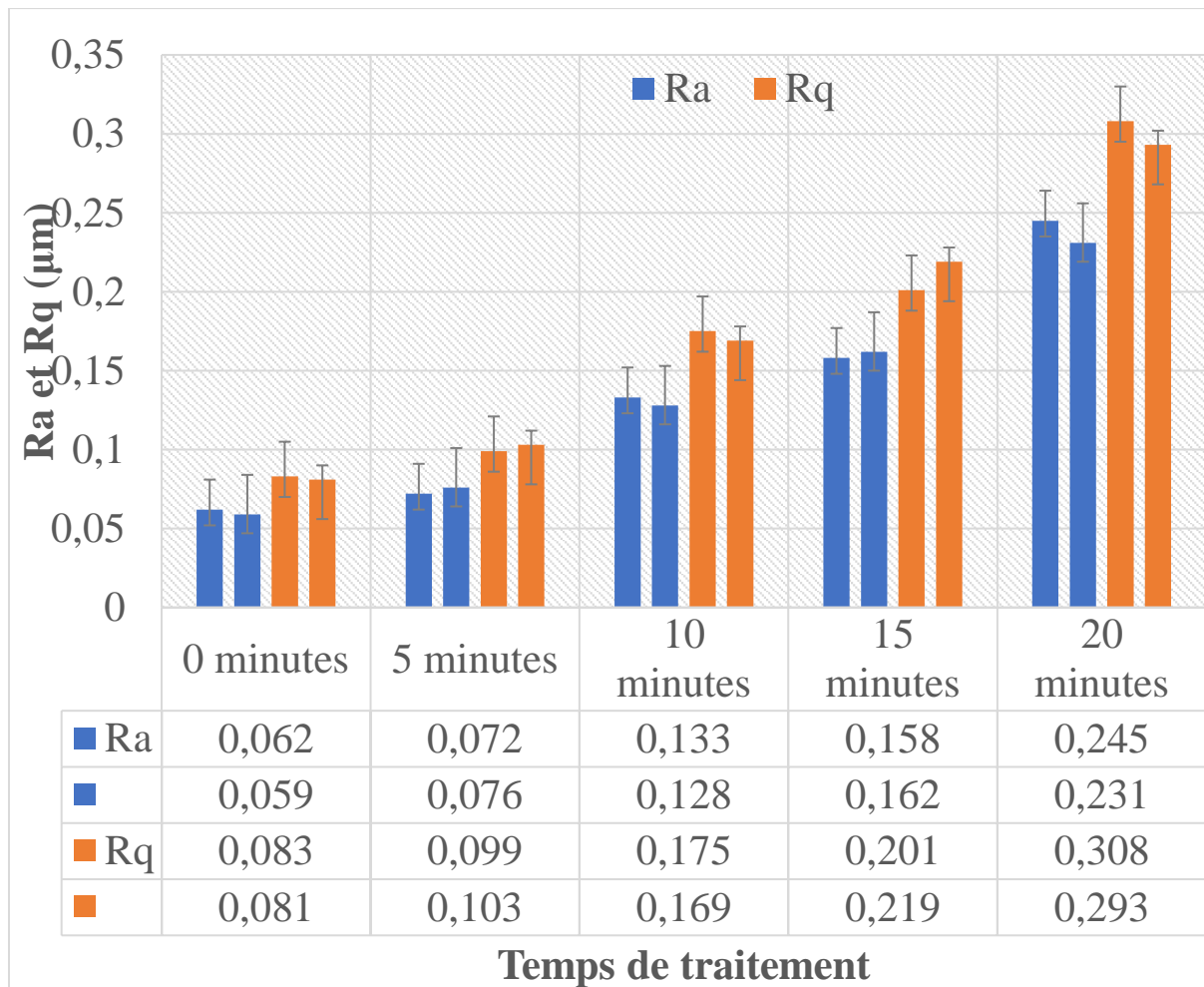


Figure III.8 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après différents temps de traitement au plasma froid. $f = 2000 \text{ Hz}$; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; $U = 30 \text{ kV}$; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.

III.2.2 Influence du nombre de diélectriques

Pour cette deuxième série d'expériences, deux configurations différentes ont été testées (Figure III.9). Une configuration qui est constituée de deux barrières diélectriques en verre, une première barrière en dessous de l'échantillon et une deuxième barrière au-dessus (configuration à double diélectrique). La seconde configuration de la cellule DBD comporte une barrière diélectrique en moins ; seulement la barrière diélectrique située en dessous est gardée.

Il convient de noter que, selon plusieurs études expérimentales [165-168], la distribution de décharge et le degré de localisation du régime filamentaire dépendent de la position de la barrière diélectrique. Ces études ont montré qu'avec deux électrodes couvertes par un diélectrique, la décharge peut passer du mode homogène au mode filamentaire, pour de grandes distances inter-électrodes. Cependant, avec une seule électrode couverte par un diélectrique, la décharge observée à des fréquences supérieures à 500 Hz est toujours en mode filamentaire

quelle que soit l'intervalle d'air. De plus, la forme géométrique des échantillons déposés sur la barrière inférieure (ou sur l'électrode inférieure) peut également influencer la distribution de la décharge sur leur surface.

Les autres paramètres de la cellule DBD sont maintenus constants. La tension efficace de signal carré et la fréquence ont été maintenues à 30 kV et à 2000 Hz, respectivement. La distance inter-électrodes a été fixée à 12,5 mm (4 mm d'intervalle d'air), l'épaisseur de la barrière diélectrique en verre à 4 mm et la durée du traitement DBD à 20 minutes.

Lorsque l'échantillon a été exposé au plasma dans la configuration diélectrique double, la rugosité Ra a augmenté d'un facteur 3, passant de $0,06 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$) avant le traitement DBD, pour atteindre $0,18 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$) et $0,17 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$) pour les deux échantillons, respectivement (Figure III.10). Dans le cas de la configuration mono diélectrique, la valeur de Ra a augmenté quatre fois, pour atteindre $0,23 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$) et $0,24 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$), respectivement.

Une deuxième barrière diélectrique réduit la puissance transférée dans la décharge, ce qui explique une rugosité plus faible par rapport à la configuration à une seule barrière diélectrique. Le traitement plasma en présence de deux barrières diélectriques étant moins efficace, toutes les autres expériences ont été menées en utilisant la configuration à une seule barrière diélectrique.

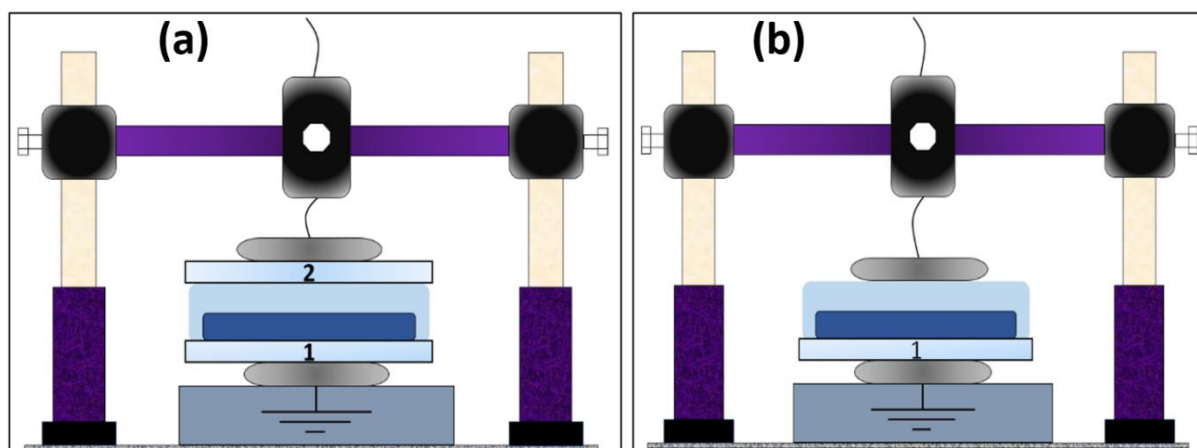


Figure III.9 Configuration de la cellule DBD ; (a) Configuration double barrière diélectrique ; (b) Configuration une seule barrière diélectrique.

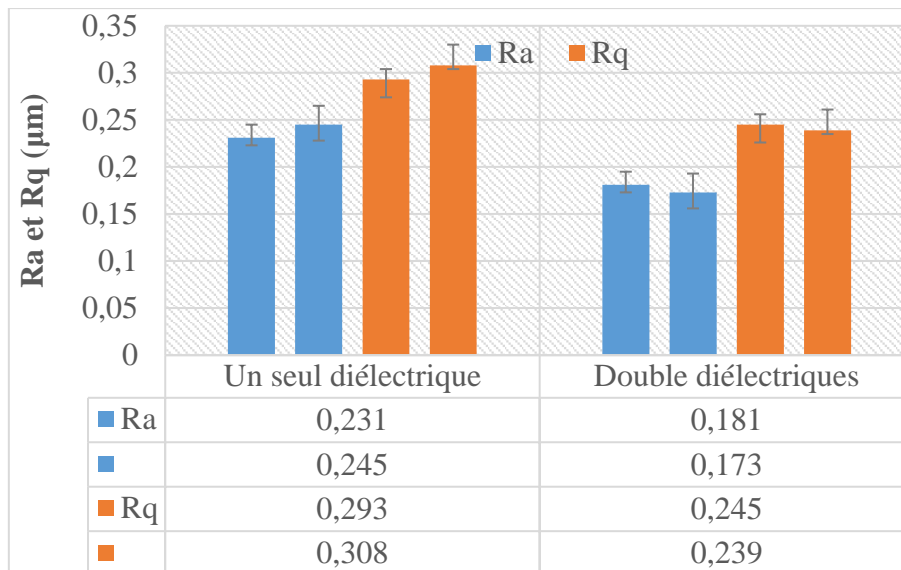


Figure III.10 Rugosité de surface de deux échantillons PP différents dans deux configurations de cellules DBD atmosphériques différentes (simple diélectrique et double diélectrique) $t = 20 \text{ min}$; $f = 2000 \text{ Hz}$; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; $U = 30 \text{ kV}$; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.

III.2.3 Influence de la distance inter-électrodes

Dans la troisième série d'expériences, l'influence de la distance inter-électrodes a été étudiée (Figure III.11). En variant à plusieurs reprises la distance entre l'électrode inférieure et l'électrode supérieure, cette distance a été variée de 8,5 mm jusqu'à 15,5 mm. En tenant compte que l'épaisseur de l'échantillon est de 4,5 mm, et que l'épaisseur du diélectrique est de 4 mm, une distance de 8,5 mm entre les deux électrodes est toujours présente, donc la variation réelle pour le plasma « intervalle d'air » généré pendant les expériences sera entre 0 mm et 7 mm.

Comme le cas des expériences précédentes, les différents paramètres de la cellule DBD sont maintenus constants. La tension efficace de signal carré et la fréquence ont été maintenues à 30 kV et à 2000 Hz, respectivement. La distance inter-électrodes a été variée comme mentionné précédemment, l'épaisseur de la barrière diélectrique en verre était de 4 mm et la durée du traitement DBD était de 20 minutes.

Les premiers essais ont été réalisés avec une électrode supérieure posée directement sur l'échantillon à traiter, une distance donc de 8,5 mm (0 mm d'intervalle d'air) séparait l'électrode supérieure à l'électrode inférieure reliée à la terre, aucun traitement par DBD n'a pu être réalisé vu qu'une distance nulle ne permettait pas au plasma de se générer. C'est pourquoi l'échantillon a gardé son état de surface inchangé pour une distance d'intervalle d'air de 0 mm. En augmentant la distance inter-électrodes de 1 mm, une légère modification au niveau de l'état de

surface du PP a été constatée, en effet, les paramètres de rugosité Ra et Rq ont vu leurs valeurs s'accroître de $0,060 \mu\text{m}$ à $0,096 \mu\text{m}$ et de $0,082 \mu\text{m}$ à $0,129 \mu\text{m}$ respectivement.

Une seconde augmentation de la distance inter-électrodes de 1 mm a été réalisée, comme attendu, la rugosité de surface a connu une valeur encore plus élevée pour une distance « intervalle d'air » de 2 mm par rapport à une distance de 1 mm, le Ra et Rq ont doublé de valeur en atteignant $0,119 \mu\text{m}$ et $0,153 \mu\text{m}$ respectivement.

La relation de proportionnalité entre la distance inter-électrodes et la rugosité du PP a continué à avoir lieu pour une intervalle d'air de 3 mm, les paramètres de rugosité « Ra » et « Rq » ont poursuivi leurs accroissements et ont connu leurs plus grandes valeurs pour une distance inter-électrodes de 12,5 mm (intervalle d'air = 4 mm), leurs valeurs respectives ont presque quadruplé en atteignant $0,238 \mu\text{m}$ et $0,300 \mu\text{m}$.

Le facteur de corrélation calculé entre la distance inter-électrodes et la rugosité de surface du PP est de 0,26, ce qui indique que la relation n'est pas proportionnelle : en augmentant l'intervalle d'air, une augmentation de la rugosité n'aura pas forcément lieu. Il existe une valeur optimale pour laquelle l'influence de la distance « intervalle d'air » sera maximale, en dessous et au-dessus de cette valeur, l'influence de cette distance perdra en efficacité. Plus la distance inter-électrode est élevée, plus haute sera la charge électrique générée, un maximum d'influence sur les paramètres « Rq » et « Ra » est atteint pour une distance de 12,5 mm. Pour cette distance inter-électrodes, l'intervalle d'air est égal à 4 mm ; elle est suffisante pour initier une décharge consistante avec une tension de 30 kV.

En augmentant encore une fois cette valeur, une diminution de l'intensité du plasma générée se produit. Ainsi, une augmentation de la distance inter-électrodes modifie la distribution du champ électrique et affaiblit la quantité et l'homogénéité du plasma de la DBD qui devient insuffisant pour ioniser la zone d'air entre les barrières diélectriques, son influence sur l'état de surface des échantillons traités devient de moins en moins importante. De ce fait, les distances plus grandes nécessitent l'utilisation d'amplitudes de tension plus élevées pour renforcer le champ électrique.

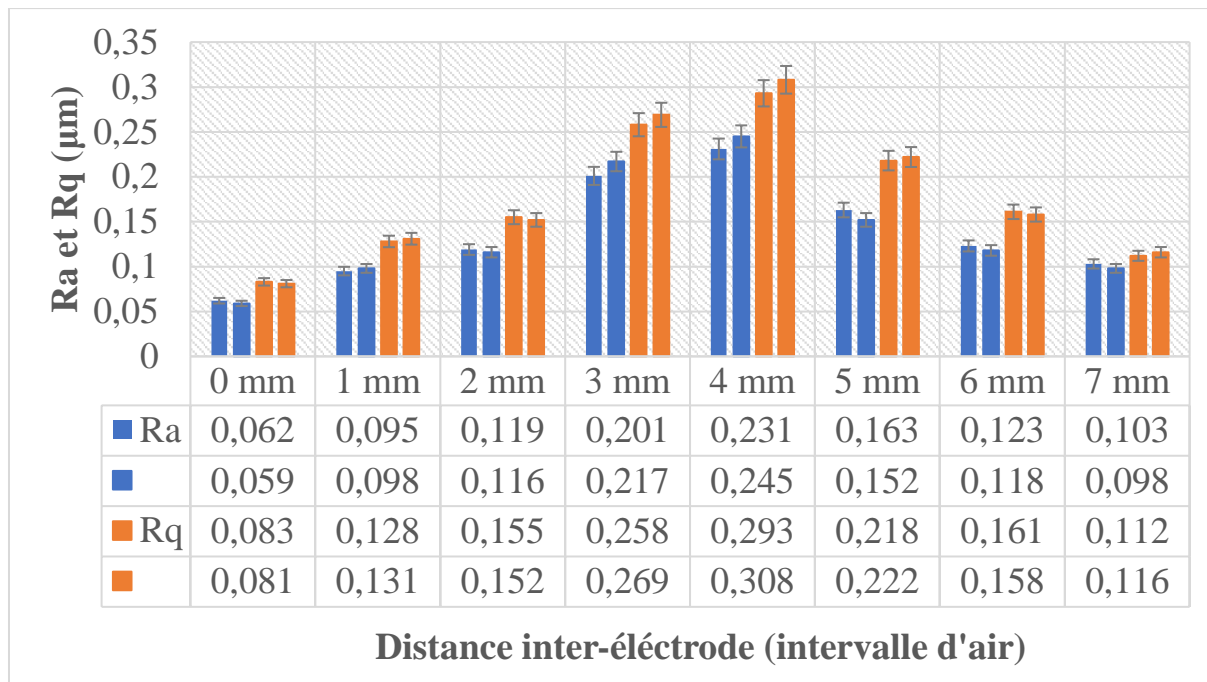


Figure III.11 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après traitement par plasma froid avec différentes distances inter-électrodes. $t = 20 \text{ min}$; $f = 2000 \text{ Hz}$; $U = 30 \text{ kV}$; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.

III.2.4 Influence de la haute tension

Deux autres séries d'expériences ont été réalisées afin d'étudier les effets de la haute tension appliquée au système d'électrodes (Figure III.12).

Toutes les expériences précédentes ont été réalisées avec la tension maximale que l'amplificateur pouvait générer, qui était fixée à 30 kV. Une autre série d'expériences avec une tension réduite (20 kV) a été réalisée. Cette tension n'a pas eu le même effet sur l'état de surface du polymère que la tension précédente (30 kV) : la rugosité du PP a à peine augmenté après le traitement avec DBD atmosphérique, atteignant une valeur de $Ra = 0,094 \mu\text{m} (\pm 0,01 \mu\text{m})$. Pour garantir l'exactitude de ces résultats, d'autres séries d'expériences ont été réalisées avec des tensions encore plus basses que les précédentes (10 kV et 20 kV).

En comparant les résultats de la rugosité générée après traitement avec la rugosité initiale des échantillons, il a été constaté que le plasma généré avec des tensions inférieures à 30 kV a eu un très faible impact sur l'état de surface des échantillons traités. La limite supérieure de l'amplificateur de tension était de 30 kV, mais on peut supposer qu'à des valeurs plus élevées, une augmentation plus forte de la rugosité après le traitement DBD peut être obtenue si la barrière de verre diélectrique ne se fissure pas.

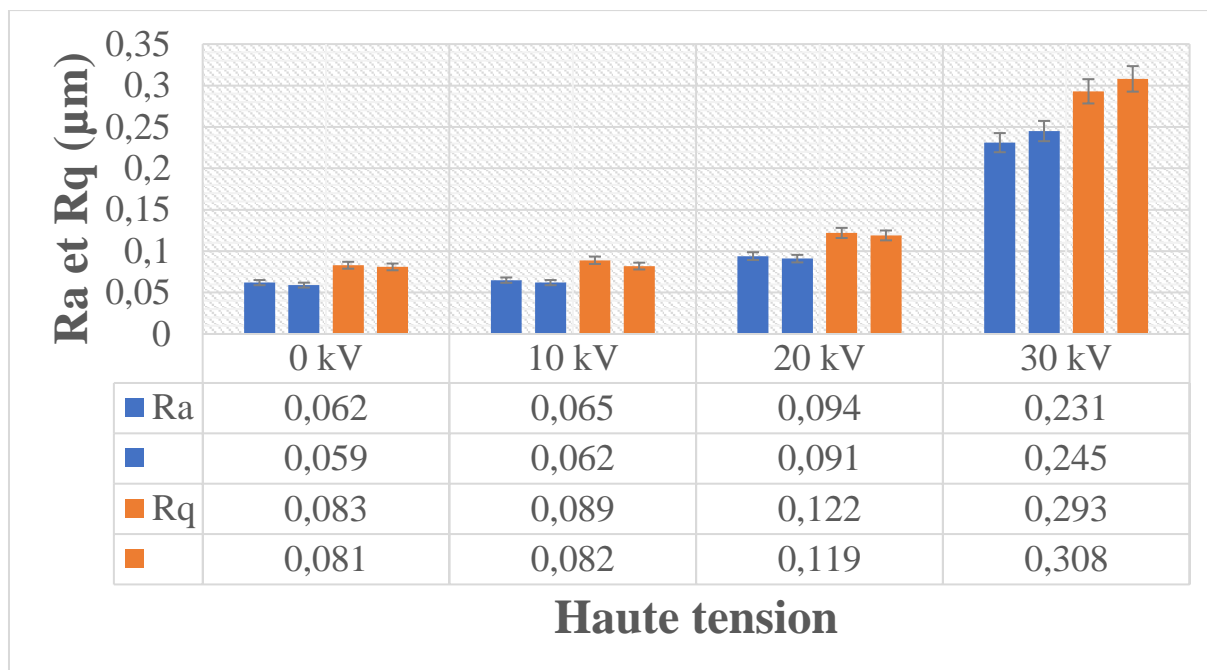


Figure III.12 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après traitement par plasma froid avec différentes tensions ; $t = 20 \text{ min}$; $f = 2000 \text{ Hz}$; ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.

III.2.5 Influence de la fréquence de la tension appliquée

Le nombre et l'amplitude des pics de courant de décharge augmentent avec la fréquence de la tension appliquée. Cet effet de la fréquence pourrait s'expliquer par la dynamique des charges de l'espace et de celles à la surface du matériau. Lorsque la durée d'une alternance devient courte, les charges à la surface du matériau n'ont pas le temps de se dissiper. Ainsi, lors de l'alternance suivante, la différence de polarité entre les nouvelles charges et celles déjà présentes accentue la décharge, ce qui explique la forte variation de l'intensité du courant en fonction de la fréquence. De plus, pour une même durée de traitement, le nombre de pics de courant enregistrés augmente avec la fréquence. Des résultats similaires de la fréquence de la tension appliquée sur le courant de décharge ont été rapportés dans les références [141,169-171].

Dans la Figure III.13, l'effet de la fréquence sur l'état de surface des échantillons traités par plasma est montré. Cet effet est identique à l'effet de la durée de traitement. L'influence sur la rugosité de surface des échantillons traités est proportionnelle à la fréquence de la tension appliquée : une fréquence plus grande génère une rugosité élevée. L'analyse de corrélation entre ces deux paramètres a révélé un facteur de corrélation de 0,93, ce qui signifie que l'augmentation de la fréquence a une forte influence sur l'état de surface de l'échantillon traité.

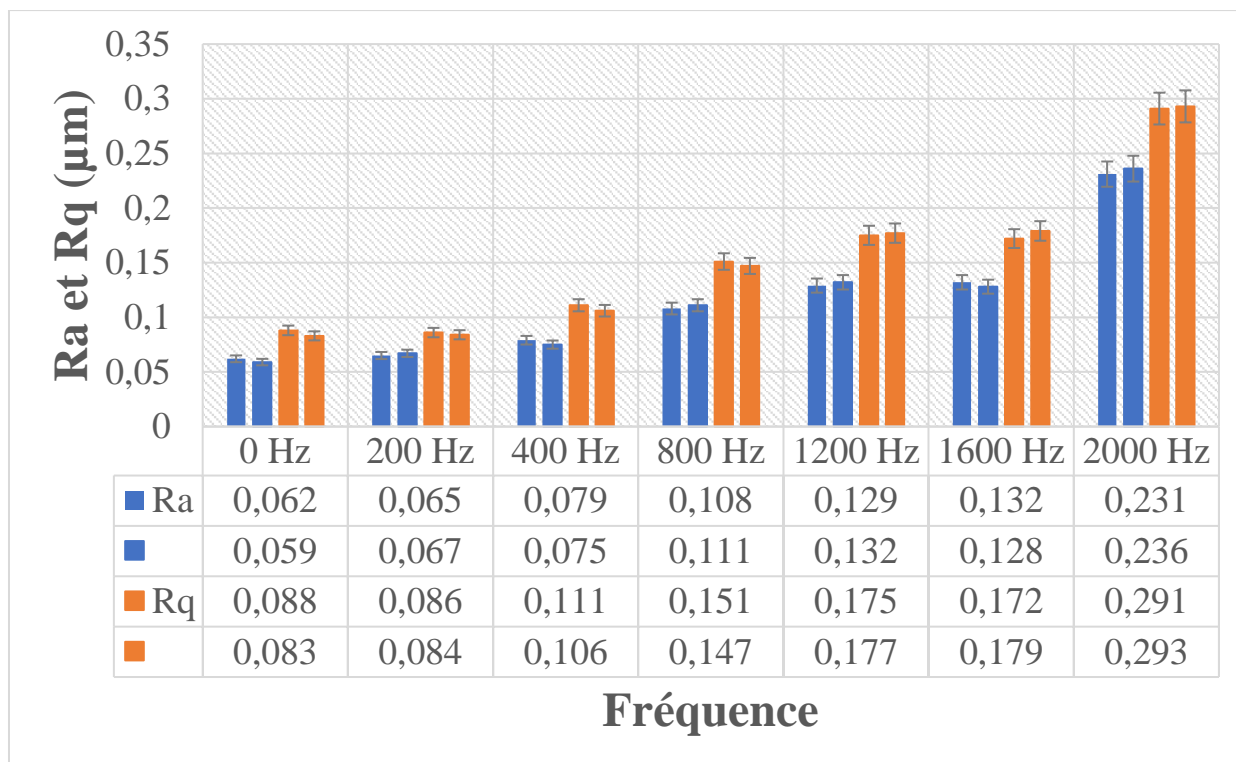


Figure III.13 Rugosité de surface de deux échantillons différents en PP après traitement par plasma froid sous différentes fréquences ; $t = 20$ min ; $U = 30$ kV ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.

III.2.6 Influence de l'épaisseur du diélectrique (verre)

Pour cette première partie du chapitre 3, une dernière série d'expériences a été réalisée pour étudier l'effet de l'épaisseur du diélectrique en verre. Huit plaques en verres ont été utilisées lors de ces expériences avec différentes épaisseurs allant de 2 mm jusqu'à 9 mm, afin de comparer l'influence de chaque épaisseur sur la rugosité du PP généré après traitement.

Les diélectriques en verre avec les épaisseurs de 2 mm et de 3 mm n'ont pas pu être inclus dans les résultats, en effet, en utilisant la configuration optimale de la cellule DBD ($t = 20$ minutes ; $U = 30$ kV ; $f = 2000$ Hz ; intervalle d'air = 4 mm) permettant d'avoir des valeurs de « Ra » et « Rq » les plus hautes possibles, les diélectriques avec une épaisseur inférieure à 4 mm avaient tendance à se fissurer au bout de quelques minutes de traitement (2 à 4 minutes). Là encore, c'est fort probable que cela est dû à la chaleur générée par le mouvement des porteurs de charges. De fait, comme l'épaisseur du diélectrique est très faible, il se fissure rapidement contrairement à des épaisseurs supérieures ou égales à 4 mm.

Dans la Figure III.14, les résultats de l'influence de l'épaisseur du diélectrique sur la génération de la rugosité sont montrés : plus cette épaisseur est faible, plus la surface générée

après traitement est rugueuse, et inversement, des diélectriques épais empêchent une meilleure génération du plasma froid et donc une influence assez faible de ce dernier sur l'état de surface de l'échantillon traité. Les expériences se sont arrêtées sur une épaisseur de diélectrique de 9 mm puisque cette dernière n'a pratiquement plus d'influence sur l'état de surface des plaques de PP.

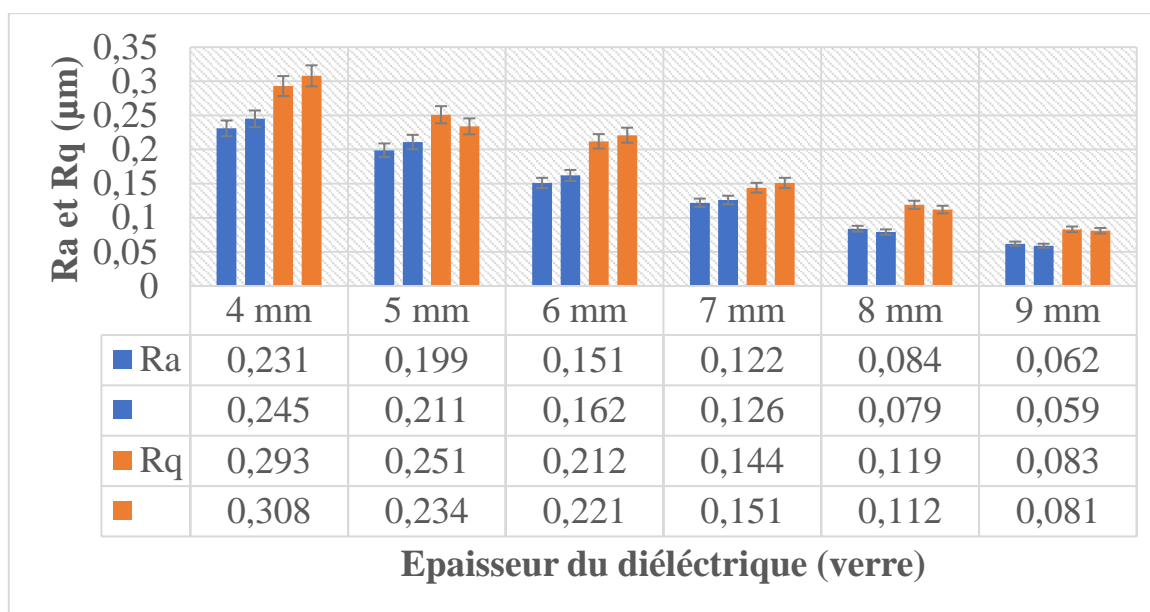


Figure III.14 Rugosité de surface de deux échantillons différents en PP après traitement par plasma froid sous différentes épaisseurs du diélectrique ; $U = 30 \text{ kV}$; $t = 20 \text{ min}$; $f = 2000 \text{ Hz}$; distance inter-électrodes = $12,5 \text{ mm}$.

Le traitement par plasma froid sur des échantillons en PP a eu une influence significative sur leur état de surface. En effet, avec une configuration optimale de la cellule DBD, la rugosité des échantillons traités a augmenté de presque quatre fois par rapport à leur état initial, passant d'une valeur de Ra de $0,060 \text{ }\mu\text{m}$ à une valeur de $0,238 \text{ }\mu\text{m}$, et une valeur de Rq de $0,082 \text{ }\mu\text{m}$ à $0,300 \text{ }\mu\text{m}$. Cette modification au niveau de l'état de surface des échantillons a aussi été constatée visuellement : un cercle est apparu en plein milieu de l'échantillon traité ayant les mêmes dimensions que les électrodes utilisées dans la cellule DBD. Comme nous pouvons clairement le voir sur la Figure III.6, c'est dans cette partie de l'échantillon où la modification de la surface s'est produite.

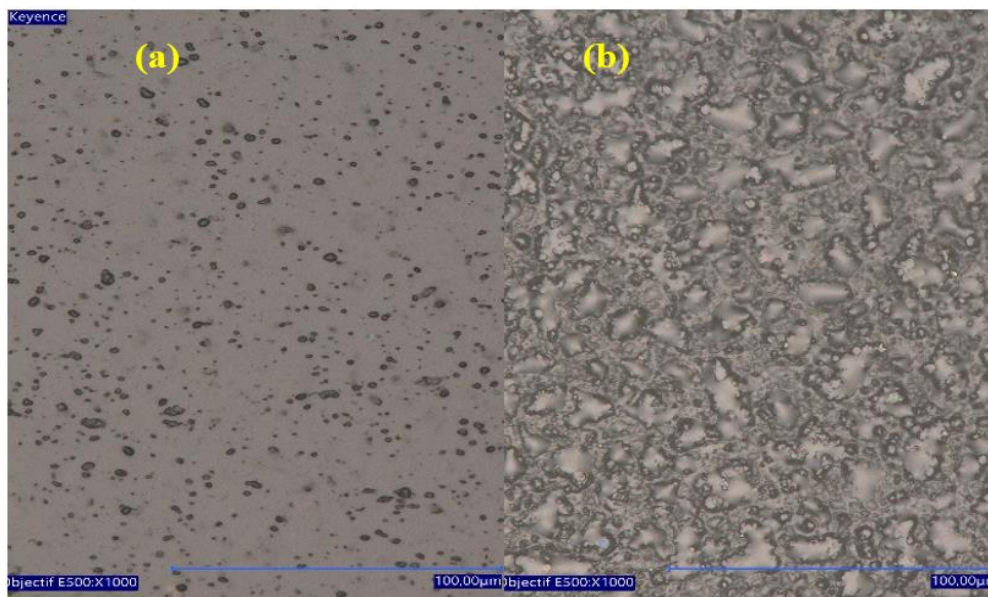


Figure III.15 Images comparatives prises avec un microscope Keyence VHX-7000 d'une surface brute (non traitée) et d'une surface traitée au plasma froid du même échantillon de PP. (a) Surface non traitée ; (b) Surface traitée au plasma ($t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; Distance inter-électrode = 4 mm ; fréquence = 2000 Hz ; $U = 30$ kV ; épaisseur du diélectrique = 4 mm).

Les images comparatives prises avec un microscope Keyence VHX-7000 montrent la différence (Figure III.15) entre l'aspect des surfaces en PP avant et après traitement par DBD pendant 20 minutes. Les deux surfaces peuvent être facilement distinguées l'une de l'autre.

III.3 Etude de l'effet du traitement par plasma froid sur le niveau du potentiel électrique généré par le tribochargement du polypropylène

Le plasma DBD est utilisé pour créer un plus grand nombre de collisions entre les particules énergétiques et les espèces de l'air. Cela peut conduire à un échauffement de l'air dans l'espace, ce qui entraîne un plasma en équilibre thermique. Cependant, pendant une courte durée de traitement, il y a un peu d'échauffement au gaz en raison du transport de charge limité et de la dissipation de l'énergie transférée par le plasma à la surface des matériaux isolants.

Le traitement par plasma froid augmente la rugosité de la surface du matériau, par conséquent, la mouillabilité du matériau traité s'accroît aussi; l'augmentation de la rugosité augmente le nombre de pics ou de points à la surface des matériaux et conduit à la création de pièges de charge sur la surface (augmentation de la surface de contact à l'interface). L'importance de la rugosité de surface et son influence sur le processus triboélectrique pour un contact glissant entre les matériaux polymères ont été soulignées par Neagoe et *al.* et d'autres

auteurs [120, 164-170]; leurs résultats indiquent que le contact entre deux polymères électrisés se produit généralement sur un certain nombre de points liés à la rugosité de surface.

Pendant le contact glissant, un point de l'une des surfaces peut effectuer plusieurs contacts avec les points de l'autre surface. Plus les points de contact sont nombreux, plus la charge triboélectrique acquise est grande. Les expériences présentées dans cette partie ont montré que l'exposition à un plasma froid a modifié l'état de surface des échantillons traités en augmentant leurs paramètres de rugosité (Ra et Rq). Cette deuxième partie de ce travail se focalisera sur l'étude de l'influence du traitement par DBD sur le niveau du potentiel électrique sur la surface de ces échantillons après tribochargement, en comparant la quantité et la dispersion du potentiel généré sur la surface des échantillons en fonction des différentes rugosités générées par traitement DBD.

Après avoir récupéré les différents échantillons de PP, en les classant selon leur rugosité obtenue après traitement par plasma froid, ils seront dans un premier temps neutralisés, pour s'assurer qu'ils ne possèdent aucune charge résiduelle. Une mesure du potentiel sera faite pour garantir que la neutralisation a été bien réalisée. Ensuite, l'échantillon sera positionné dans le banc triboélectrique pour l'opération de tribochargement et directement après, le potentiel généré sur la surface l'échantillon tribochargé sera mesuré. Les valeurs du potentiel seront comparées à celles des autres échantillons avec des rugosités différentes.

L'objectif de tout ce travail est d'étudier l'influence du traitement par plasma froid sur le niveau et la dispersion du potentiel électrique généré après tribochargement, suite à la modification de l'état de surface des échantillons exposés à l'action d'une DBD.

III.3.1 Potentiel électrique obtenu par tribochargement à la surface d'un échantillon non traité

La première série d'expériences a consisté à étudier la génération et la distribution du potentiel électrique à la surface d'échantillons de PP tribochargés non traités (non soumis au plasma froid). Les résultats ont ensuite été comparés à ceux obtenus pour les échantillons traités par DBD.

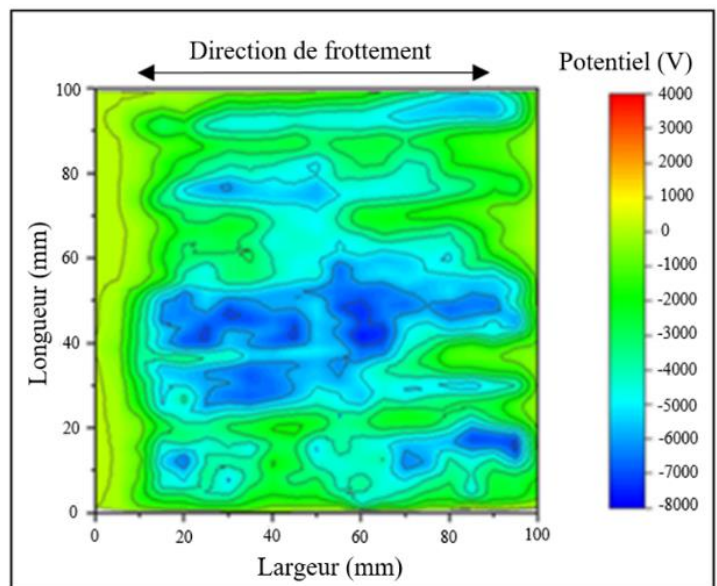
La distribution du potentiel électrique à la surface de deux échantillons non traités est plutôt non-homogène. Pour l'un des échantillons, les valeurs mesurées vont de - 1000 V (± 100 V) à - 6000 V (± 300 V), avec une moyenne arithmétique de - 4000 V (± 1550 V) comme le montre la Figure III.16 (a). Pour le second échantillon de PP non traité, tribochargé dans des

conditions rigoureusement identiques au premier, le potentiel électrique présentait des valeurs négatives comprises entre - 1000 V (± 200 V) et - 7000 V (± 500 V), comme le montre la Figure III.16 (b). Les résultats de l'analyse statistique de la dispersion du potentiel électrique à la surface des deux échantillons sont donnés dans le tableau 3-1.

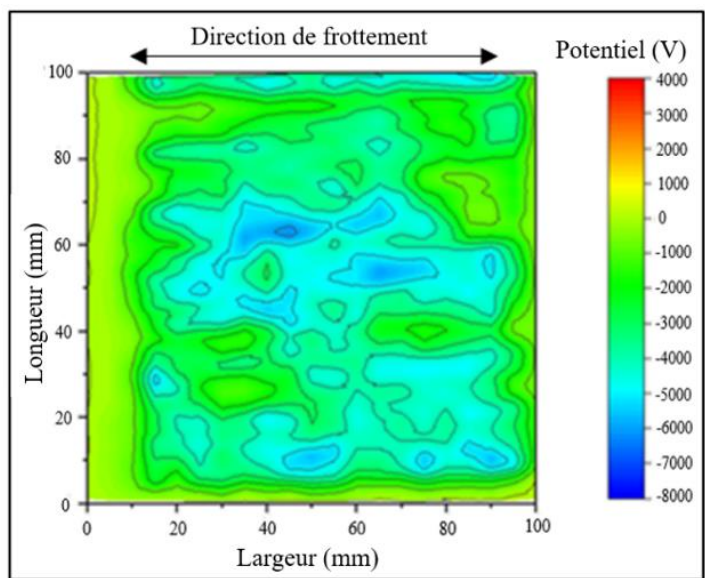
Cette grande dispersion des valeurs du potentiel électrique de surface peut être expliquée par le mauvais tribochargement du PP, un matériau qui se situe au milieu de la série triboélectrique. La surface des échantillons était très lisse : $Ra = 0,06 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$) et $Rq = 0,08 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$), ce qui rend plus aléatoire le contact conforme avec d'autres matériaux.

Tableau III.1 : Dispersion des valeurs du potentiel électrique généré sur une surface non traitée des échantillons en PP, par tribochargement

Echantillon	#1	#2
Moyenne arithmétique	- 4000 V	- 3400 V
Ecart moyen	1300 V	1000 V
Ecart type σ	1550 V	1200 V
Variance σ^2	$2.4 \times 10^6 \text{ V}^2$	$1.4 \times 10^6 \text{ V}^2$



(a)



(b)

Figure III.16 Cartographie du potentiel électrique mesuré à la surface d'échantillons de PP non traités, après tribochargement ; (a) premier échantillon ; (b) second échantillon.

III.3.2 Potentiel électrique obtenu par tribochargement à la surface d'un échantillon traité par DBD

Dans la deuxième série d'expériences, la procédure de tribochargement a été reproduite sur des échantillons traités par DBD, qui ont été divisés en deux catégories. La première comprend trois échantillons qui ont montré une augmentation significative des paramètres de rugosité de $Ra = 0,06 \mu\text{m} (\pm 0,01 \mu\text{m})$ et $Rq = 0,08 \mu\text{m} (\pm 0,01 \mu\text{m})$ en atteignant des valeurs

$Ra = 0,22 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$) et $Rq = 0,25 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$) respectivement (soit plus de 300 % de leur valeur initiale).

La deuxième catégorie comprenait des échantillons qui n'ont connu qu'un changement modéré des paramètres de rugosité de surface, de $Ra = 0,06 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$) et $Rq = 0,08 \mu\text{m}$ ($\pm 0,01 \mu\text{m}$) à $Ra = 0,10 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$) et $Rq = 0,13 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$).

Le traitement par DBD a eu une influence significative sur le potentiel électrique généré par la tribocharge sur le PP. La distribution du potentiel électrique est devenue homogène sur toute la partie traitée de l'échantillon "brut", limitée par le cercle rouge en pointillé de la Figure III.17. La dispersion des valeurs mesurées (Tableau 3-2) est plus étroite que celle calculée pour le potentiel électrique des échantillons non traités.

Le traitement DBD atmosphérique a inversé le comportement triboélectrique du polymère traité. Les échantillons de PP non traités se sont chargés négativement, mais après le traitement DBD, le potentiel électrique mesuré après la tribocharge a une polarité positive. Le potentiel électrique de surface moyen dans la zone exposée à la DBD pour les trois échantillons "rugueux" était de 1900 V (± 300 V).

Pour la deuxième catégorie d'échantillons, le traitement par DBD a eu le même effet que sur la première catégorie, c'est-à-dire l'homogénéisation du potentiel électrique généré à la surface du polypropylène après tribocharge et également l'inversion de sa polarité de négative à positive (Figure III.18). La seule différence entre les deux catégories est la magnitude du potentiel électrique, qui s'est avérée dépendre des paramètres de rugosité Ra et Rq . Après le tribocharge, le potentiel électrique est plus élevé pour les échantillons "rugueux".

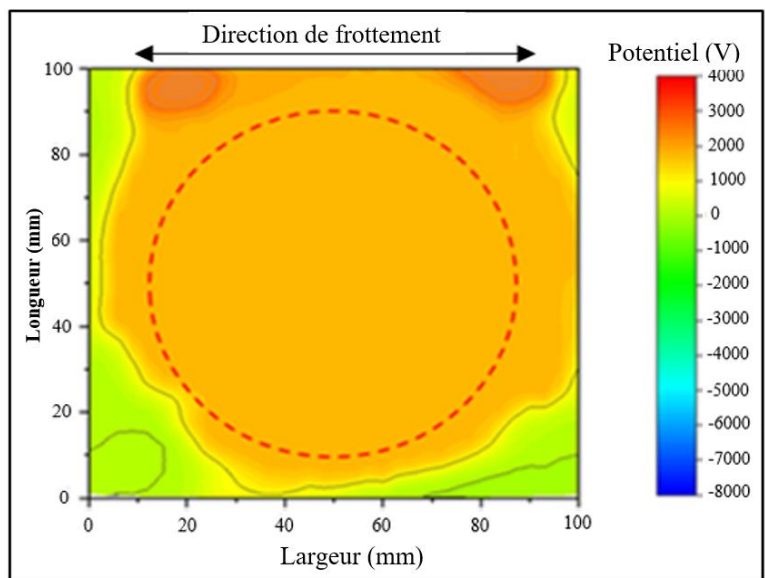


Figure III.17 Cartographie du potentiel électrique généré par tribochargement sur la surface d'un échantillon de PP traité par DBD "rugueux", caractérisé par une rugosité de $Ra = 0,22 \mu\text{m} (\pm 0,03 \mu\text{m})$ et $Rq = 0,25 \mu\text{m} (\pm 0,03 \mu\text{m})$. Le cercle rouge en pointillé indique la position de l'électrode d'aluminium pendant le traitement DBD.

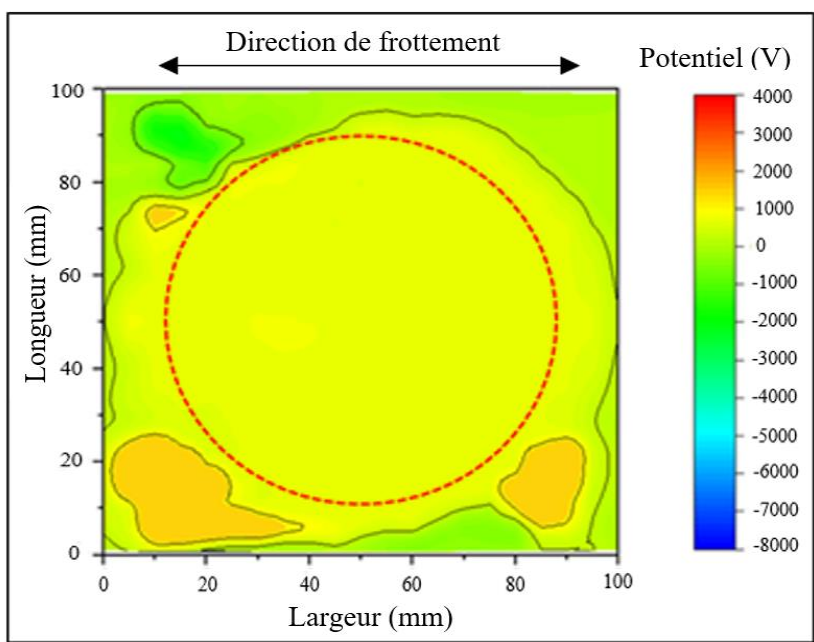


Figure III.18 Cartographie du potentiel électrique généré par tribochargement sur la surface d'un échantillon de PP traité par DBD "lisse", caractérisé par $Ra = 0,10 \mu\text{m} (\pm 0,02 \mu\text{m})$ et $Rq = 0,13 \mu\text{m} (\pm 0,02 \mu\text{m})$. Le cercle rouge en pointillé indique la position de l'électrode d'aluminium pendant le traitement DBD.

Tableau 3-2 : Dispersion des valeurs du potentiel électrique généré sur des surfaces d'échantillons de PP traitées par DBD, après tribochargement

Echantillon	#1	#2
Moyenne arithmétique	1700 V	770 V
Ecart moyen	70 V	70 V
Ecart type σ	80 V	80 V
Variance σ^2	6400 V ²	6400 V ²

Pour l'échantillon "lisse" de la Figure III.18, la valeur moyenne du potentiel électrique après tribochargement dans la zone précédemment exposée à la DBD était de 770 V (± 80 V), contre 1700 V pour l'échantillon "rugueux" présenté sur la Figure III.17. Cependant, l'écart moyen, l'écart type et la variance étaient similaires (tableau 3-2). Le potentiel électrique moyen pour les trois échantillons "lisses" était de 1000 V (± 400 V).

III.3.3 Corrélation entre la rugosité générée par DBD et le potentiel électrique généré par tribochargement

Dans la Figure III.19, les diagrammes montrent l'influence de la rugosité obtenue après différents traitements à la DBD sur le potentiel électrique généré par tribochargement sur la surface des échantillons en PP. Un échantillon non traité se charge négativement après tribochargement. Cependant, un traitement à la DBD, change le comportement triboélectrique du polymère. En effet, le PP a vu son potentiel s'inverser lorsqu'il est traité, passant d'un potentiel négatif à un potentiel positif. Une relation de proportionnalité est établie entre le potentiel électrique et la rugosité de surface : plus la surface modifiée par traitement au plasma froid est rugueuse, plus le potentiel généré après tribochargement est élevé.

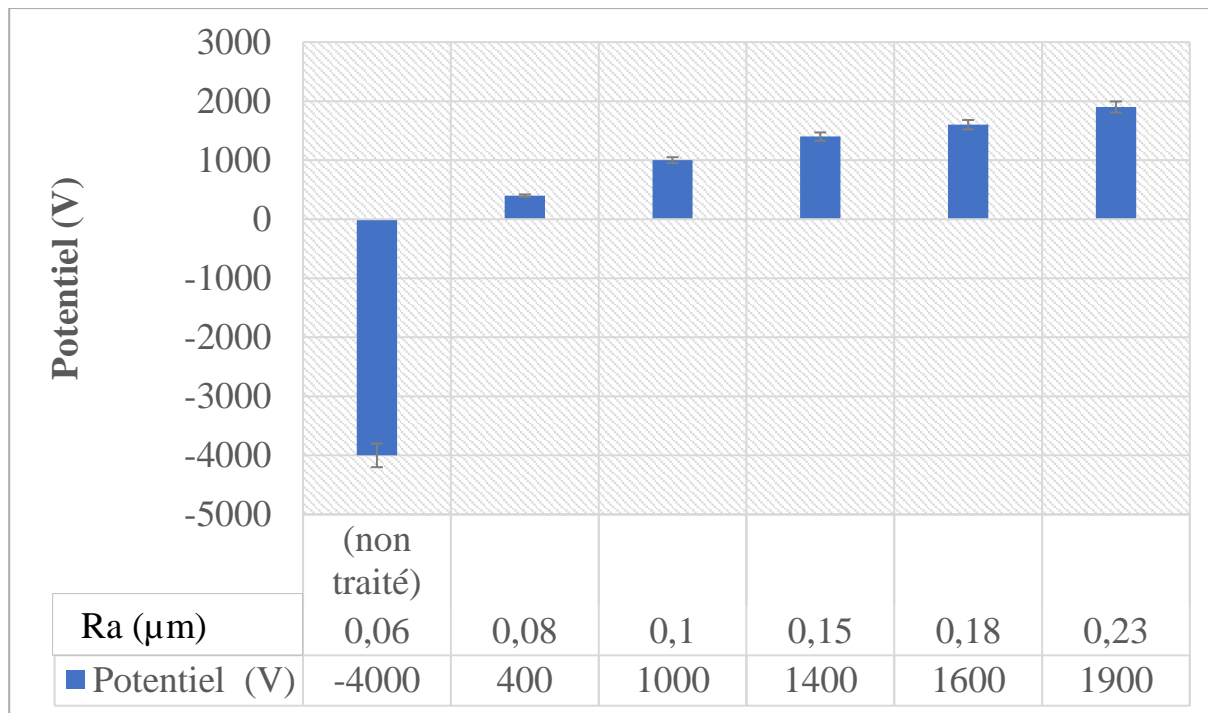


Figure III.19 Diagramme comparatif entre les valeurs du potentiel électrique généré par tribochargement à la surface des échantillons de PP ayant des rugosités différentes dues au traitement par DBD

III.4 Conclusions

Le but de ce travail était : (1) quantifier l'influence de la DBD atmosphérique sur la rugosité de surface du PP ; (2) corréler le niveau de potentiel électrique obtenu par tribochargement avec les différentes rugosités de surface du polymère après traitement par plasma froid. Il a été constaté que :

- Le traitement par DBD atmosphérique du PP a une influence directe sur la rugosité de surface, l'exposition au plasma froid conduit à une surface plus rugueuse que la surface initiale (non traitée).

- Avec une configuration optimale de la cellule DBD atmosphérique, la rugosité obtenue après le traitement DBD peut être jusqu'à cinq fois supérieure à la valeur initiale.

- Tous les paramètres réglables de la DBD influencent la rugosité de surface du polymère traité : le temps de traitement, la distance inter-électrodes (la longueur de l'entrefer), l'épaisseur du diélectrique et la valeur de la haute tension appliquée.

- Le traitement par DBD a une influence directe sur le potentiel électrique généré à la surface du polypropylène : (i) en contact avec des échantillons d'aluminium, les échantillons non traités et traités acquièrent par effet triboélectrique des charges négatives et positives, respectivement ;

(ii) le potentiel électrique est distribué de façon plus homogène à la surface des échantillons traités par DBD.

- Le potentiel électrique à la surface des échantillons PP après tribochargement est directement lié à la rugosité après traitement par DBD ; une surface plus rugueuse génère un potentiel électrique plus élevé.

Pour le chapitre suivant, un facteur très important sera étudié, qui est l'humidité relative ambiante, l'influence de ce facteur sur le comportement triboélectrique de deux polymères sera le principal sujet de recherche concernant le chapitre quatre.



« Il faut accepter les déceptions passagères, mais conserver l'espoir pour l'éternité. »

Martin Luther King Jr. (1929 – 1968)

Chapitre IV : Etude de l'influence de l'humidité relative sur le comportement triboélectrique des polymères

Le tribochargement des matériaux dépend de leurs nature, état de surface, pression de contact et mouvement relatif et il est influencé par l'humidité relative et la température ambiantes [71,74,172,173]. Les chocs électrostatiques, dus à l'accumulation de charges électriques de polarités opposées lors du frottement entre divers objets, tels que des chaussures et des tapis ou des vêtements et des sièges de véhicules, sont moins importants en hiver qu'en été ; ceci signifie que la charge électrique est partiellement supprimée lorsque l'humidité ambiante est moins élevée.

Selon de nombreuses études expérimentales et théoriques, les molécules d'eau qui adhèrent à la surface des matériaux, formant une couche de quelques nanomètres, jouent un rôle important dans le transfert de charges [56,81,87,174-180]. La présence de telles couches d'eau modifie fortement la charge triboélectrique des matériaux isolants [178-182] ; bien que l'eau ne soit pas une nécessité pour l'échange de charges [183], sa présence associée à de grands champs électriques peut le favoriser.

Cette présence de molécules d'eau à la surface des matériaux est le plus souvent liée au niveau d'humidité ambiante. Une conductivité électrique plus élevée liée à l'air humide augmentera également la fuite des charges des surfaces [81,174,179]. À partir d'études sur des lits fluidisés composés de diverses particules de polymères, Németh et ses collègues [174] ont conclu qu'à faible humidité le mécanisme de transfert de charge est dominé par les électrons ; à une humidité plus élevée, l'eau et les ions associés contribuent au chargement électrostatique [174]. Un autre mécanisme de charge triboélectrique pourrait être l'échange de groupes fonctionnels des polymères, qui sont transférés à la surface des granules lorsqu'elles sont exposées à l'action de taux d'humidité élevés [174,184]. En résumé, il n'existe pas encore d'image complète de l'influence de l'humidité sur la charge triboélectrique.

IV.1 Procédure expérimentale

Les expériences de tribochargement ont été réalisées en utilisant des plaques de PP et de PVC, qui ont été frottées contre des barres parallélépipédiques en aluminium (Al). Ce choix était justifié par le fait que le PP et le PVC sont deux des polymères les plus utilisés dans l'industrie en raison de leurs excellentes propriétés mécaniques [185,186]. Pour le métal utilisé

dans cette étude, un échantillon d'aluminium a été choisi car des tests préliminaires avaient souligné qu'il générerait par effet triboélectrique des niveaux de potentiel électrique plus élevés à la surface des échantillons de PP et de PVC que l'acier inoxydable ou le cuivre. Les dimensions de l'échantillon (A), en aluminium, étaient les suivantes : 100 mm x 15 mm x 5 mm, et celles des échantillons (B), en PP et PVC, étaient : 100 mm x 100 mm x 4,5 mm (Figure IV.1).

Avant chaque série d'expériences, deux grandes plaques en PP et PVC ont été découpées en plusieurs petits échantillons selon les dimensions indiquées ci-dessus ; chaque échantillon a ensuite été neutralisé en l'exposant à l'action de charges électriques bipolaires générées par un ioniseur commercial. Le potentiel électrique de surface de l'échantillon a été mesuré par la sonde électrostatique pour s'assurer de l'absence de charges résiduelles avant l'opération de tribochargement. Les échantillons ont été laissés pendant au moins 12 heures dans la chambre d'essai climatique afin qu'elles puissent s'acclimater à des valeurs de température et d'humidité relative préalablement programmées, puis soumis à l'opération de tribochargement.

Dès que le processus de frottement est terminé, le potentiel généré à la surface des échantillons est mesuré et enregistré sur un PC, à l'aide du logiciel LabView. Toutes les opérations (neutralisation, tribochargement et mesure du potentiel électrique de surface) ont été réalisées dans la même pièce, à température et humidité relative ambiantes constantes, afin d'éviter le choc thermique sur les échantillons traités, ce qui aurait pu fausser les résultats des expériences.

La barre d'aluminium a été nettoyée manuellement en deux étapes après chaque opération de frottement, d'abord avec du papier de verre, puis avec des serviettes en papier pour éliminer tout résidu de PP ou de PVC qui pourrait influencer les résultats.

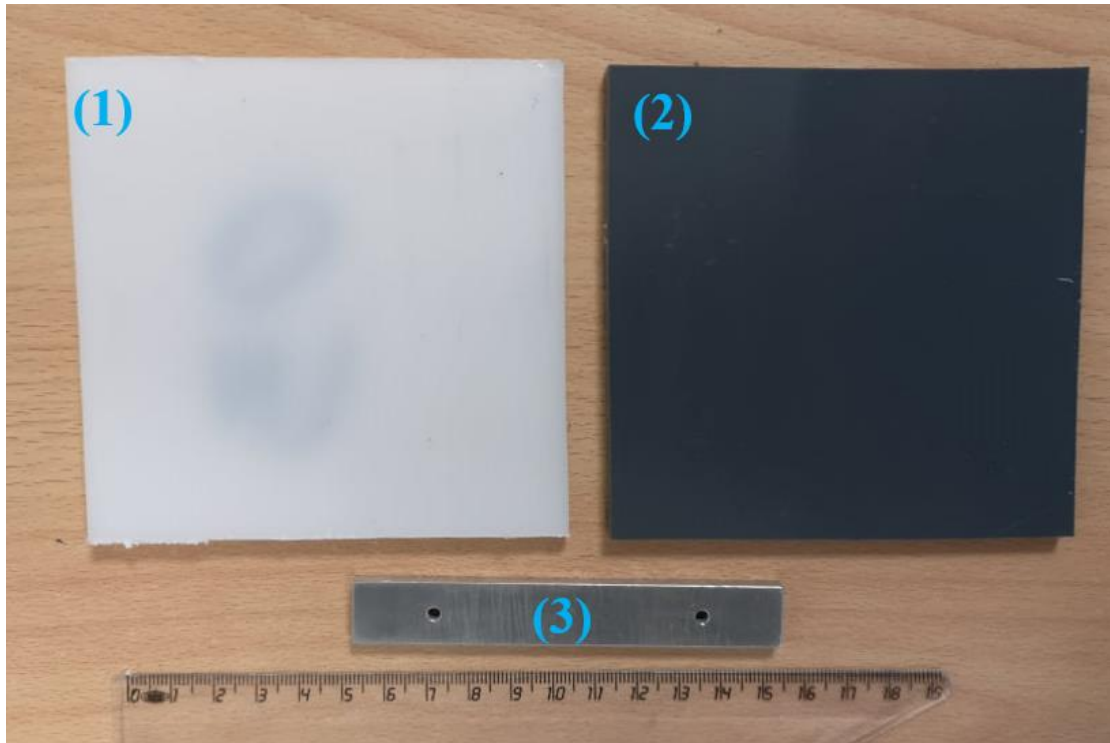


Figure IV.1 Photos des échantillons utilisés dans les expériences ; (1) échantillon en PP ; (2) échantillon en PVC ; (3) échantillon en aluminium.

Pour déterminer l'effet de l'humidité relative ambiante RH sur les propriétés triboélectriques des échantillons de PP et PVC, la température dans la chambre d'essai climatique a été maintenue inchangée ($T = 22^{\circ}\text{C}$) pour les huit séries d'expériences, réalisées à différents niveaux d'humidité allant de $RH = 10\%$ à $RH = 80\%$, avec un pas de 10% . Il a été ainsi possible d'étudier précisément l'influence de chaque niveau d'humidité sur la génération de charge électrique et le déclin du potentiel de surface des polymères. L'humidité et la température souhaitées dans la chambre sont généralement atteintes au bout de deux heures, et sont contrôlées par une interface présente sur la machine thermique (Figure IV.2).

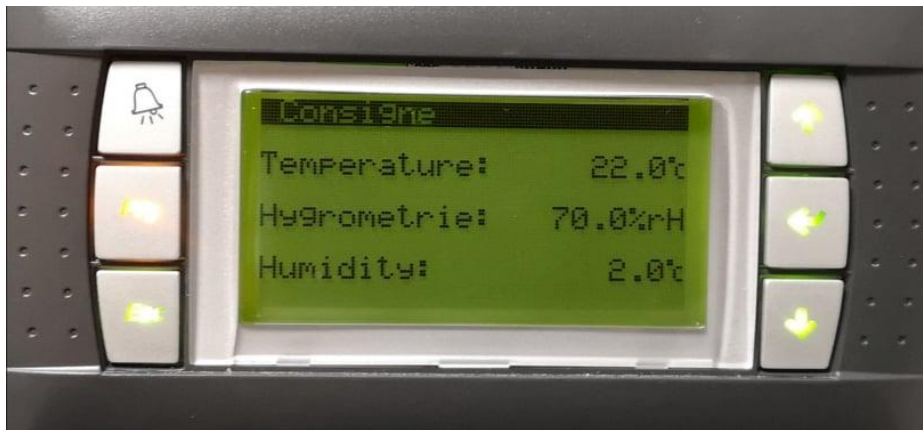


Figure IV.2 Panneau de contrôle de la température et de l'humidité dans la chambre d'essais.

Le tribomètre linéaire (Figure II.10) a été utilisé pour le chargement par frottement des différents échantillons de matériaux. Le banc expérimental a été conçu pour assurer un contact conforme (plan-plan) entre la paire d'échantillons, en utilisant deux porte-échantillons, celui du haut pour l'échantillon (A) et celui du bas pour l'échantillon (B). Un système de rails de guidage facilitait le mouvement horizontal alternatif à vitesse variable du porte-échantillon (B). Les différents paramètres du banc sont restés inchangés tout au long des expériences : la force normale a été de 20 N, la vitesse de translation de 20 mm/s, la course du porte-échantillon inférieur de 70 mm et le nombre de cycles de tribochargement (frottement) de 20.

Le potentiel électrique à la surface de l'échantillon inférieur a été mesuré par la sonde capacitive (Trek, modèle 6300-7) d'un voltmètre électrostatique (Trek, modèle 341B) (Figure II.13). Deux types de mesures ont été réalisés, le premier étant un balayage de la surface de l'échantillon tribochargé afin de caractériser la distribution du potentiel électrique généré et pouvoir par la suite comparer les résultats obtenus pour différents paliers d'humidité. Le deuxième type de mesure a visé l'étude du déclin du potentiel électrique après tribochargement pour différents taux d'humidité, la sonde étant placée au-dessus d'un point fixe à la surface de l'échantillon pendant 3600 secondes (une heure). Le point a été choisi de manière à être caractérisé par le même potentiel initial (- 3000V) dans toutes les expériences.

Comme lors des expériences réalisées précédemment, la neutralisation des échantillons de PP et de PVC a été effectuée avant et après chaque opération de tribochargement. Cette action a permis d'éliminer toutes les charges électriques résiduelles qui pouvaient être générées par la découpe des plaques et par leur transport jusqu'à la chambre d'essai.

IV.2 Etude de l'effet de l'humidité relative sur la génération du potentiel électrique surfacique du PP et du PVC

Dans un premier temps, l'influence de l'humidité relative sur le potentiel généré à la surface du PP et du PVC après tribochargement a été étudiée. Pour chacun des deux polymères une comparaison a été réalisée entre la distribution de ce potentiel électrique à différents niveaux d'humidité.

Afin d'évaluer la variabilité des résultats obtenus, pour chaque niveau d'humidité, chaque expérience a été répétée au moins trois fois et une valeur moyenne a été calculée pour chacun des deux polymères utilisés.

Pour faciliter la discussion de l'influence de l'humidité sur le comportement triboélectrique des polymères, les huit niveaux d'humidité ont été classés en trois catégories : faible ($RH = 10\%$, 20% et 30%), moyenne ($RH = 40\%$, 50% et 60%) et élevée ($RH = 70\%$ et 80%). Les expériences ont été arrêtées à un taux d'humidité maximal de 80% et cela pour deux principales raisons. La première étant que la machine thermique ne pouvait pas maintenir fixe le taux de 90% (RH fluctuait entre 91% et 85%). La deuxième raison est qu'un taux d'humidité aussi élevé est susceptible d'endommager les appareils électroniques se trouvant dans la chambre et ainsi fausser les résultats obtenus.

Concernant le calcul de la moyenne du potentiel électrique généré après chaque opération de tribochargement, seule la surface de l'échantillon concernée par le frottement a été prise en compte (elle sera représentée par un carré pointillé rouge sur les cartographies du potentiel). La sonde électrostatique balaie les échantillons point par point, avec un pas de 5 mm entre chaque mesure, ce qui fait une moyenne de 2300 points mesurés. La partie qui a été soumise au frottement ne comprend que 1800 points. Seuls les résultats obtenus à partir de ces points ont été pris en compte. Une moyenne des valeurs mesurées est ensuite calculée pour déterminer le potentiel moyen généré à la surface des échantillons.

IV.2.1 Humidité basse (10 % - 30 %)

Les échantillons en PP ont acquis des charges électriques négatives, distribuées de manière non uniforme sur leur surface, comme le montre la cartographie du potentiel électrique mesuré dans l'une des expériences (Figure IV.3). Cette non-uniformité est probablement due à des impuretés sur la surface de la plaque et à l'imperfection du contact plan-plan pendant le processus de tribochargement. Des résultats similaires ont été obtenus pour les trois autres essais réalisés au même niveau d'humidité relative, toutes les plaques en PP montrant un potentiel électrique négatif sur leur surface, avec des distributions différentes. Les différentes expériences réalisées avec les échantillons de PP pour des taux d'humidité basses ont toutes conduit à des résultats identiques. Le PP est donc un polymère qui se charge négativement à $RH \leq 30\%$ lorsqu'il est frotté avec de l'aluminium.

En ce qui concerne les échantillons de PVC, leur comportement triboélectrique est similaire à celui des échantillons en PP (Figure IV.4).

Après tribochargement avec l'aluminium, les échantillons de PP et de PVC avaient presque le même niveau de potentiel électrique sur leur surface, la valeur moyenne mesurée sur leurs parties frottées étant de l'ordre de - 4000 V.

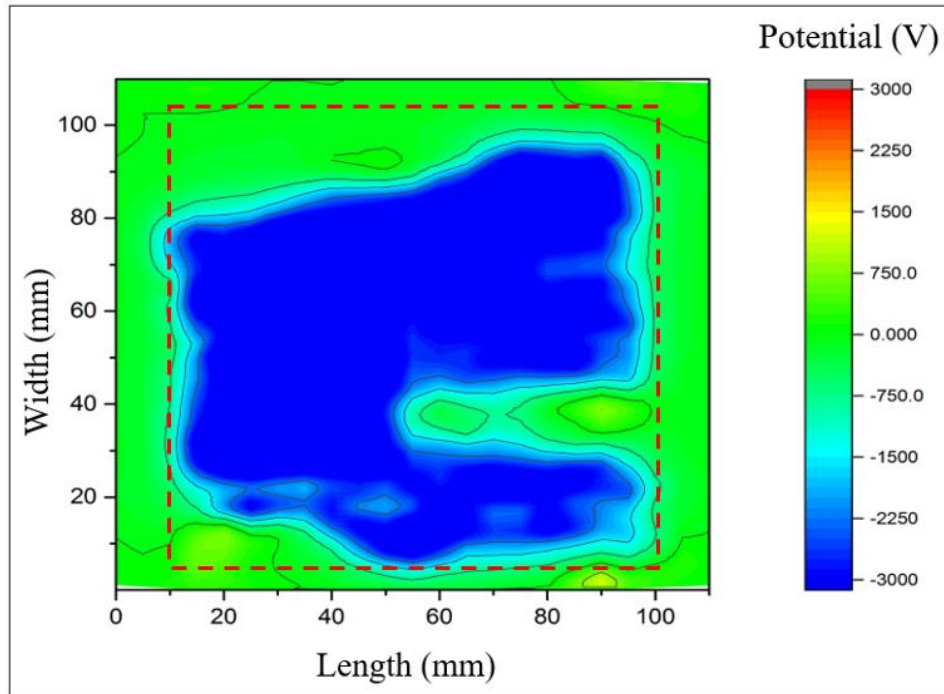


Figure IV.3 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon EN PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 20 %.

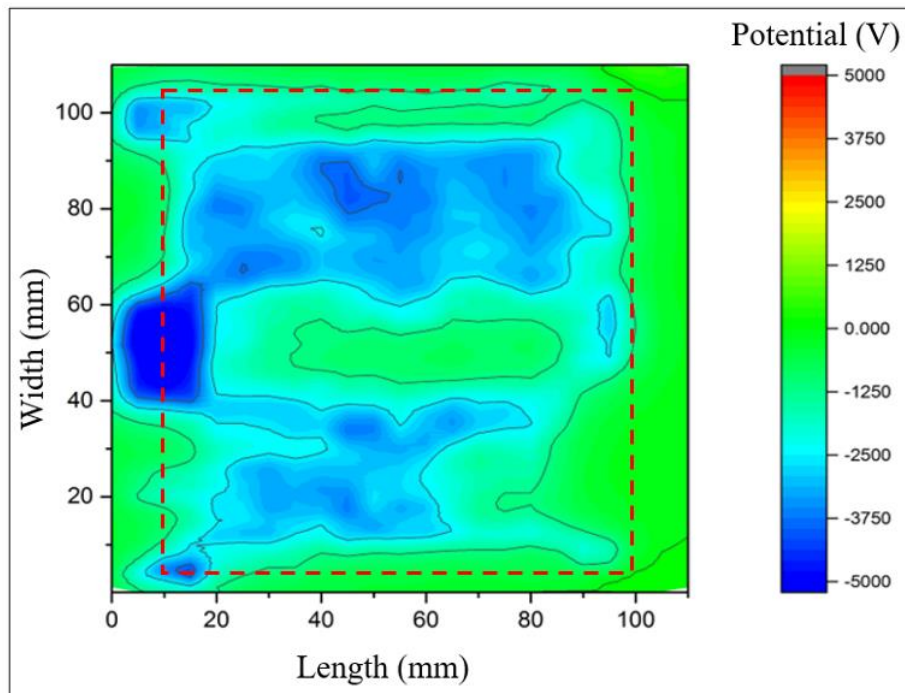


Figure IV.4 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 20 %.

IV.2.2 Humidité moyenne (40 % - 60 %)

Contrairement aux expériences réalisées à faible humidité, dans ce second cas, la cartographie du potentiel électrique acquis après tribochargement des échantillons en PP a été caractérisée par la cohabitation de zones positives et négatives, comme on peut le voir sur la Figure IV.5. Ce phénomène peut être mis en relation avec le positionnement de ce polymère dans la partie centrale de la série triboélectrique, ce qui signifie qu'il peut être chargé positivement ou négativement en fonction des matériaux avec lesquels il est mis en contact et des conditions de frottement. On peut en déduire que le changement d'humidité a modifié le comportement triboélectrique du PP. Le potentiel moyen généré à la surface des échantillons de PP a complètement inversé son signe, passant d'une valeur négative de - 4000 V pour une humidité de 20 % à une valeur positive de 3000 V pour une humidité de 40 %, ce qui met en évidence la forte influence de l'humidité ambiante sur le comportement triboélectrique de ce polymère.

Ce phénomène de présence de parties chargée positivement et d'autres parties chargées négativement a été observé sur les trois autres plaques en PP ayant subi la même expérience. Tous les échantillons ont eu donc le même comportement triboélectrique lorsqu'ils ont été frottés avec de l'aluminium à une humidité relative moyenne.

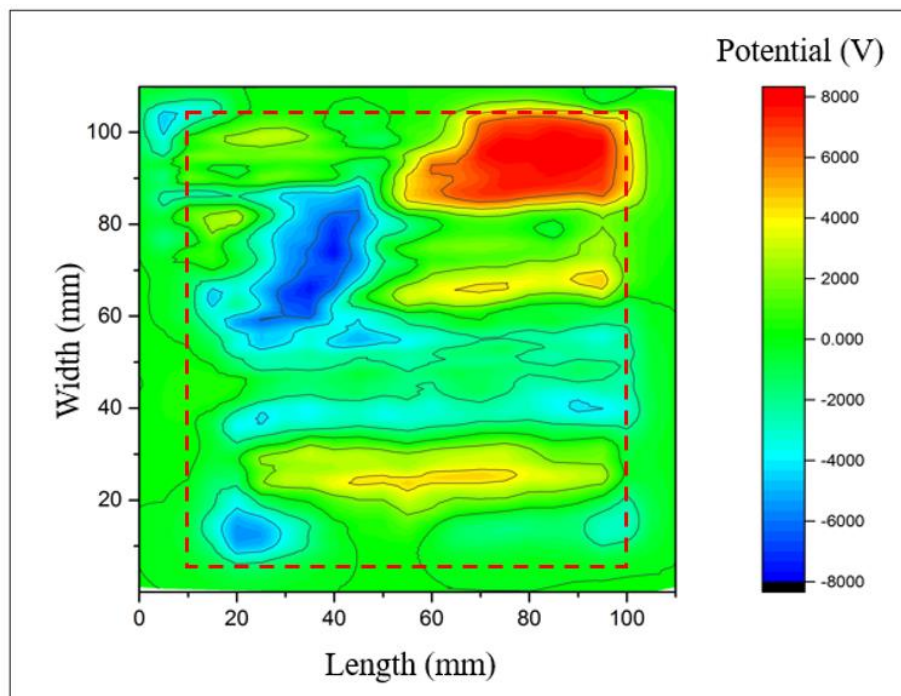


Figure IV.5 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 50 %.

Contrairement aux échantillons en PP, les plaques en PVC n'ont pas connu d'inversion de leur potentiel de surface après tribochargement (Figure IV.6). Le potentiel de surface du PVC n'a été que peu influencé par l'augmentation de l'humidité puisque sa valeur moyenne n'a pas baissé de manière significative, passant de - 4000V pour une humidité relative de 20 % à - 3800V pour une humidité relative de 50 %. Un potentiel négatif a été enregistré dans tous les échantillons malgré la modification du taux d'humidité et ceci est probablement dû à la nature du PVC et à sa position dans la série triboélectrique. En effet, le PVC est situé à l'extrémité négative de la série, ce qui signifie qu'il se charge négativement dans la majorité des cas, quelles qu'elles soient les conditions de tribochargement.

Le positionnement de chaque polymère dans la série triboélectrique a eu son influence sur le comportement de ces isolants lors d'un tribochargement sous différents paliers d'humidité relative. En effet, le PP qui est positionné au milieu de la série, a connu un changement concernant son potentiel électrique généré sur sa surface, passant d'un potentiel complètement négatif à une présence négative et positive du potentiel. Quant au PVC, qui est situé tout en bas de la série, il n'a pas présenté le même comportement, vu que son potentiel n'a subi aucun changement de signe malgré la hausse du taux d'humidité. Le potentiel électrique du PVC a conservé son signe négatif pour un taux d'humidité allant de 20 % jusqu'à 50 %.

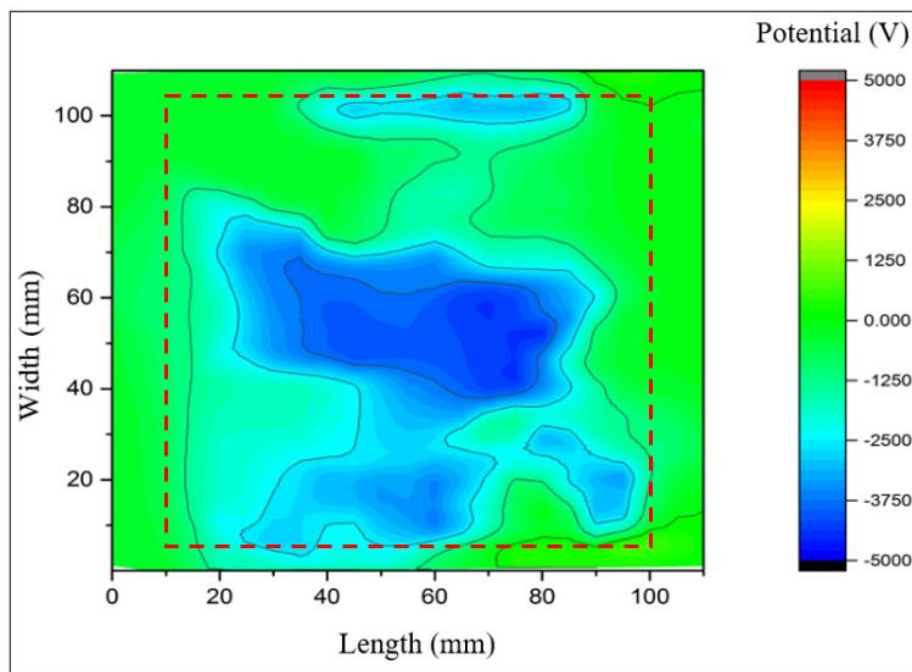


Figure IV.6 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 50 %.

IV.2.3 Humidité haute (70 % - 80 %)

Au fur et à mesure que l'humidité augmentait, la présence d'une zone de potentiel électrique positif était de plus en plus visible à la surface des échantillons de PP tribochargés, et finalement la présence de potentiel négatif a totalement disparu.

Pour un taux d'humidité supérieur à 70 %, le potentiel électrique généré après tribochargement était positif sur toute la surface frottée des plaques en PP, comme le montre la Figure IV.7. Le potentiel acquis par tribochargement change complètement de signe à des niveaux d'humidité élevés par rapport à des niveaux d'humidité faibles.

Les expériences réalisées sur les quatre plaques en PP ont toutes abouties au même résultat : le potentiel électrique négatif qui était généré après tribochargement sur la surface des plaques de PP pour des taux d'humidité inférieurs à 60 %, a commencé à disparaître et a changé de signe en augmentant le taux d'humidité au-dessus de 60 %. Pour des valeurs d'humidité relative de 70 % et de 80 %, le potentiel généré sur la surface des échantillons était partout positif. Le comportement triboélectrique des plaques en PP a été fortement influencé par l'augmentation de l'humidité relative dans la chambre d'essai. Le PP s'est transformé d'un polymère qui se charge négativement lorsqu'il est frotté contre de l'aluminium, à un polymère qui se charge positivement dans les mêmes conditions, en augmentant seulement l'humidité ambiante.

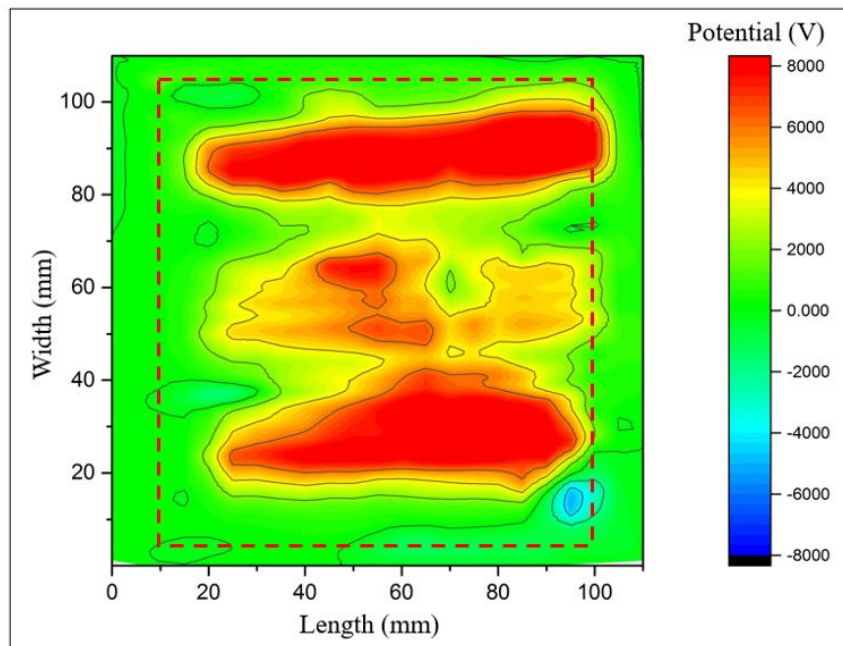


Figure IV.7 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 80 %.

Dans le cas des échantillons de PVC (Figure IV.8), un taux d'humidité élevé a affecté la quantité de potentiel généré sur la surface des échantillons tribochargés (sa valeur moyenne a diminué de - 3800V à - 1100V). Le PVC est donc un matériau qui ne peut pas générer une grande quantité d'électricité pendant le tribochargement à des niveaux d'humidité élevés, mais contrairement au PP qui change de signe, le PVC conserve sa caractéristique de se charger négativement, ce qui est cohérent avec son emplacement dans la série triboélectrique comme mentionné précédemment.

Les quatre plaques en PVC qui ont été testés pour des taux d'humidité entre 70 % et 80 % ont toutes présenté un potentiel électrique négatif sur leur surface. Le PVC est un polymère qui maintient son comportement triboélectrique même en augmentant l'humidité à des taux très élevés, à l'inverse des plaques en PP, qui dépendent fortement des taux d'humidité ambiante lors de leur tribochargement.

On peut voir sur la Figure IV.8 que la partie en bleu qui signifie un potentiel électrique négatif est assez rétréci comparé à la partie générée sur la surface des échantillons en PVC lors du tribochargement dans de faibles taux d'humidité (figure IV.4 et Figure IV.6). Ce rétrécissement est dû à l'augmentation du taux de l'humidité ambiante lors du tribochargement. Les trois cartographies concernant le tribochargement du PVC montrent que plus l'humidité est élevée, plus la non-uniformité de la distribution du potentiel électrique sur la surface des échantillons est faible.

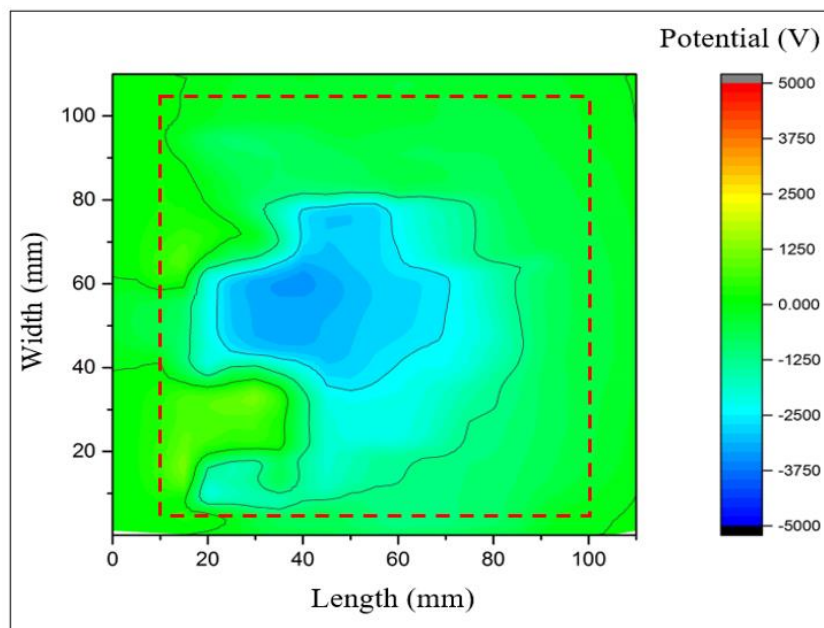


Figure IV.8 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 80 %.

Pour conclure l'analyse des résultats obtenus précédemment, le comportement triboélectrique de chaque polymère varie de manière différente en fonction des taux d'humidité, et leurs positionnements dans la série triboélectrique joue un rôle dans cela. Le PVC qui est positionné tout en bas de la série, se charge toujours négativement contre l'aluminium, quel qu'il soit le taux d'humidité ambiante. Cependant, cela ne veut pas dire que l'humidité n'a pas d'influence sur le tribochargement du PVC, puisque, dans notre cas, une augmentation de taux d'humidité jusqu'à 80 % a provoqué – dans les conditions spécifiques des expériences réalisées - une baisse de potentiel de 2700 V en moyenne. Le PVC se charge mieux à des faibles taux d'humidité.

Quant au PP, c'est un polymère avec un comportement triboélectrique qui dépend significativement du taux d'humidité ambiante, et comme il est situé au milieu de la série triboélectrique, le PP a la capacité de générer un potentiel négatif ou positif en fonction des conditions dans lesquelles est effectué le tribochargement. L'humidité relative est l'un des facteurs qui influent sur le signe du potentiel généré. Lorsqu'il est frotté avec de l'aluminium, le PP se charge négativement à une humidité en dessous des 30 %. Un taux d'humidité moyen (40 % à 60 %) provoque une cohabitation de zones de potentiel positif et négatif sur la surface des échantillons. Le potentiel électrique des échantillons de PP est de signe opposé lorsqu'il est tribochargé à des taux d'humidité élevés (70 % à 80 %).

Pour confirmer les résultats obtenus précédemment, une deuxième série d'expériences a été réalisée pour chaque polymère, Une comparaison a été ensuite réalisée entre la première et la seconde série afin d'analyser le comportement triboélectrique de ces deux polymères à des taux d'humidités différents.

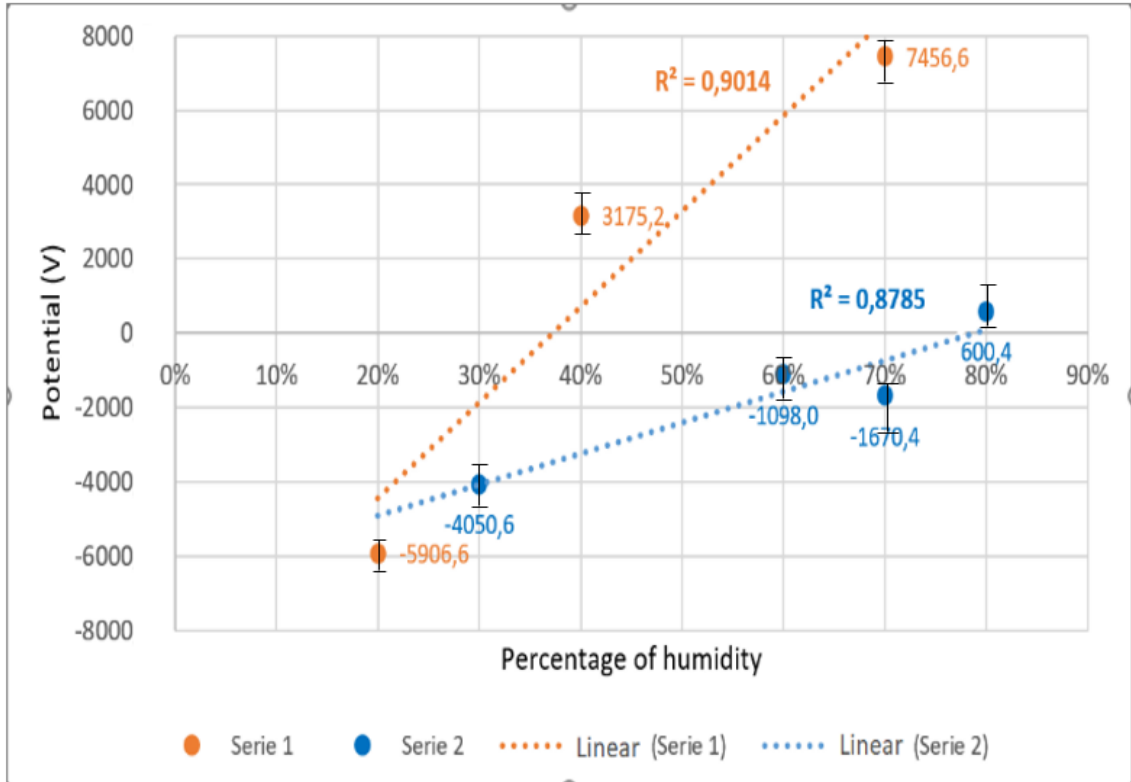


Figure IV.9 Graphique comparatif entre deux séries d'expériences sur l'influence de l'humidité sur le potentiel généré sur des plaques de PP après tribochargement.

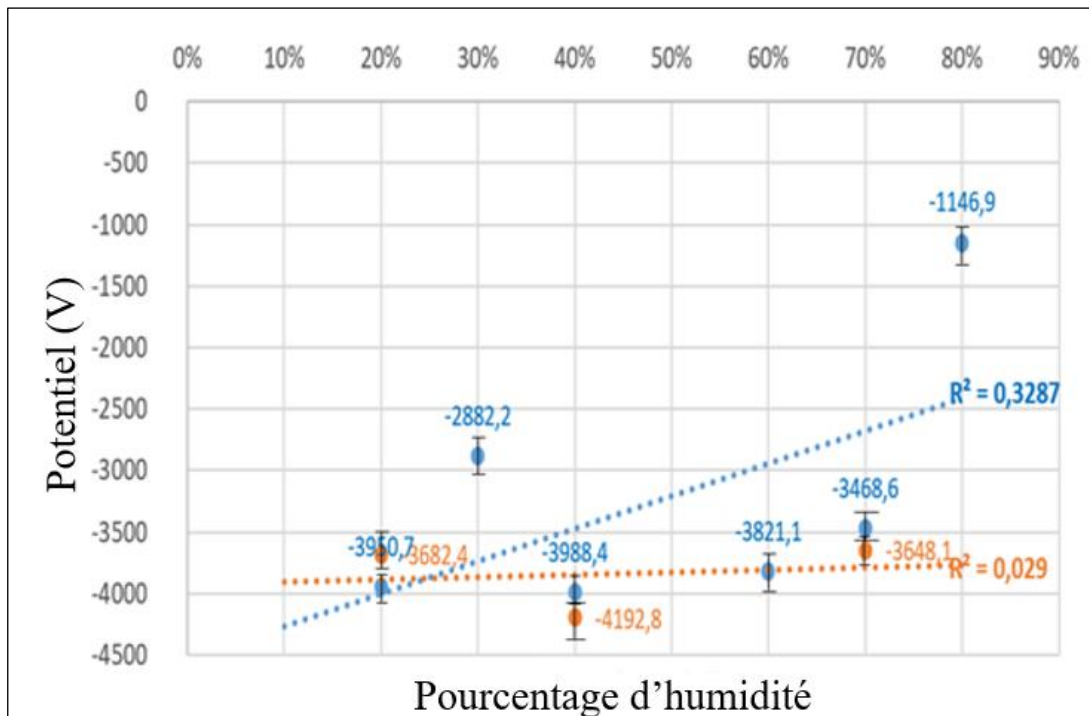


Figure IV.10 Graphique comparatif entre deux séries d'expériences sur l'influence de l'humidité sur le potentiel généré sur des plaques de PVC après tribochargement.

Les graphiques comparatifs présentés dans les Figures IV.9 et IV.10 illustrent le comportement triboélectrique des deux polymères à différents niveaux d'humidité relative ambiante.

Dans les deux séries d'expériences, les échantillons de PP ont changé de signe de potentiel électrique après avoir augmenté le niveau de RH (Figure IV.9). Des valeurs moyennes négatives du potentiel généré ont été enregistrées à de faibles valeurs de l'humidité relative de l'air ambiant. Ces valeurs ont diminué en valeur absolue avec l'augmentation de l'humidité, puis le potentiel généré a changé de signe. Le seuil d'inversion de signe n'était pas le même pour les deux séries d'expériences. Pour la première série, le potentiel a inversé son signe à une humidité relative comprise entre 30 % et 40 %, pour la seconde, à une humidité relative entre 70 % et 80 %.

Le potentiel généré dans la première série d'expériences a atteint 7500 V, alors que dans la seconde il a atteint une valeur maximale de 600 V seulement alors que les niveaux de potentiels à de faible taux d'humidité sont assez proches. Les différences dans les résultats sont très probablement dues aux différences dans la composition chimique (pigments, additifs) des échantillons de PP utilisés dans les expériences.

Concernant les échantillons en PVC, le changement d'humidité n'a pas eu la même influence qu'il a eu pour le cas des échantillons en PP, en effet, une augmentation de l'humidité relative n'a pas inversé le signe du potentiel électrique généré sur la surface du PVC. Après tribochargement, le PVC qui se trouve en bas de la série triboélectrique acquiert toujours un potentiel négatif lorsqu'il est frotté avec de l'aluminium, même si l'humidité est très basse ou très élevée. Cependant, on remarque un comportement différent pour chaque série d'expériences, concernant la première série, l'humidité a influencé le potentiel électrique généré sur les plaques en PVC, le potentiel d'une valeur moyenne de - 3900 V pour une humidité relative de 20 %, a diminué en valeur absolue au fur et à mesure de l'augmentation de l'humidité, le potentiel a atteint une valeur de - 1100 V pour une valeur d'humidité de 80 %. Cependant, pour la deuxième série d'expériences, l'humidité relative ne semble pas avoir une grande influence sur le comportement triboélectrique des échantillons de PVC, en effet, la valeur du potentiel électrique généré pour une valeur d'humidité de 20 % est de - 3700 V, et le potentiel électrique généré pour une valeur d'humidité assez haute (80 %) est de - 3600 V.

Un facteur de corrélation « R^2 » a été calculé pour les quatre séries d'expériences, ce facteur a pour utilité de déterminer le taux de corrélation entre un facteur et le résultat obtenu. Le facteur

de corrélation entre l'humidité relative et le potentiel généré concernant la première série d'expériences des plaques en PVC est de 0,33, ce qui signifie que l'humidité a eu une petite influence sur le potentiel généré, pour la deuxième série d'expériences, le facteur de corrélation étant de 0,029 ce qui signifie que l'augmentation de l'humidité n'a presque aucune influence sur la génération du potentiel sur les plaques en PVC.

Concernant les plaques en PP, un facteur de corrélation presque identique a été calculé pour les deux séries d'expériences, le premier étant égale à 0,90 et le deuxième à 0,88, ce qui signifie que l'humidité relative a eu une forte influence sur le comportement triboélectrique des échantillons en PP.

IV.3 Etude du déclin de potentiel du PP et du PVC après tribochargement sous différents taux d'humidité

Pour cette deuxième partie du travail, une étude a été menée sur le déclin de potentiel des plaques en PP et en PVC. Quatre mesures du déclin ont été ensuite effectuées pour chaque niveau d'humidité relative, puis une valeur moyenne a été calculée à partir des données mesurées. Les résultats obtenus ont permis de tracer les courbes indiquant le déclin du potentiel électrique pour chaque taux d'humidité. Toutes les courbes ont été placées sur le même graphique afin de permettre une comparaison entre le comportement des échantillons à trois humidités ambiantes distinctes.

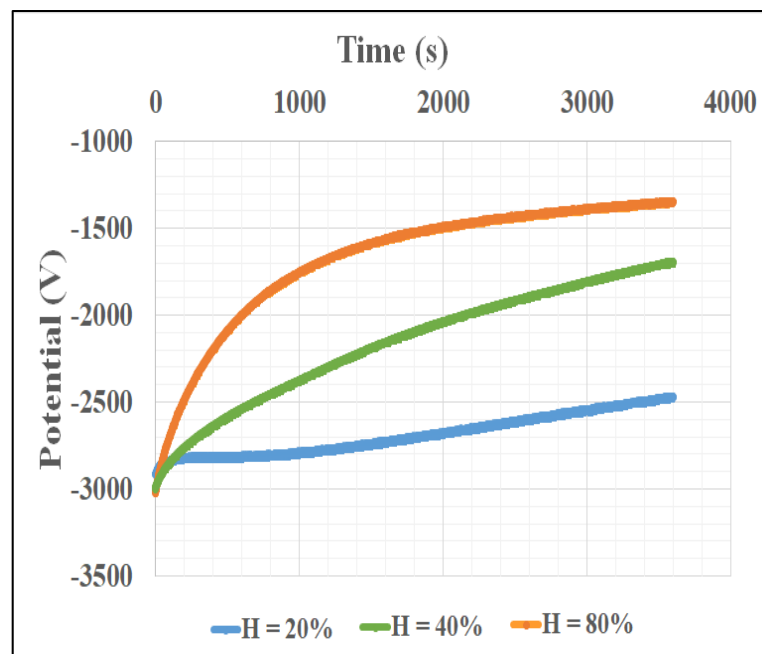


Figure IV.11 Graphique montrant trois déclin de potentiel après tribochargement des échantillons de PVC contre de l'aluminium pour trois niveaux d'humidité différents pendant une durée d'une heure.

Les résultats de la première série d'expériences réalisées sur les échantillons de PVC tribochargés contre de l'aluminium sont présentés sur la Figure IV.11. Pour une faible valeur d'humidité relative de l'air ambiant $RH = 20\%$, la chute de potentiel était inférieure à 400 V en une heure, ce qui signifie que le PVC s'est relativement comporté comme un bon isolant.

Dans le second point expérimental, à une humidité relative modérée $RH = 40\%$, le déclin du potentiel mesuré à la surface de l'échantillon de PVC a été plus rapide. Le potentiel électrique a baissé, en valeurs absolues, de 3000 V à 1700 V, en une heure. En augmentant l'humidité relative de l'air ambiant, le PVC a perdu une partie de sa capacité de rétention de la charge. Le déclin du potentiel de surface enregistré pour le troisième point expérimental, correspondant à un niveau d'humidité relative élevé ($HR = 80\%$), a été le plus rapide. Le PVC a perdu plus de 1600 V en une heure ; l'humidité relative élevée de l'air ambiant a fortement détérioré la capacité de ce polymère à conserver la charge électrique à sa surface.

L'augmentation de l'humidité ambiante a accéléré de manière significative le déclin du potentiel électrique à la surface des échantillons de PVC. On conclue que le PVC perd sa capacité à maintenir le potentiel électrique lorsque l'humidité relative est assez élevée, cela peut-être dû à la présence d'une couche d'eau sur sa surface provoquée par l'humidité haute programmée dans la chambre d'essais. Le PVC connaît un déclin de potentiel plus rapide en augmentant l'humidité et perd donc sa caractéristique de bon isolant.

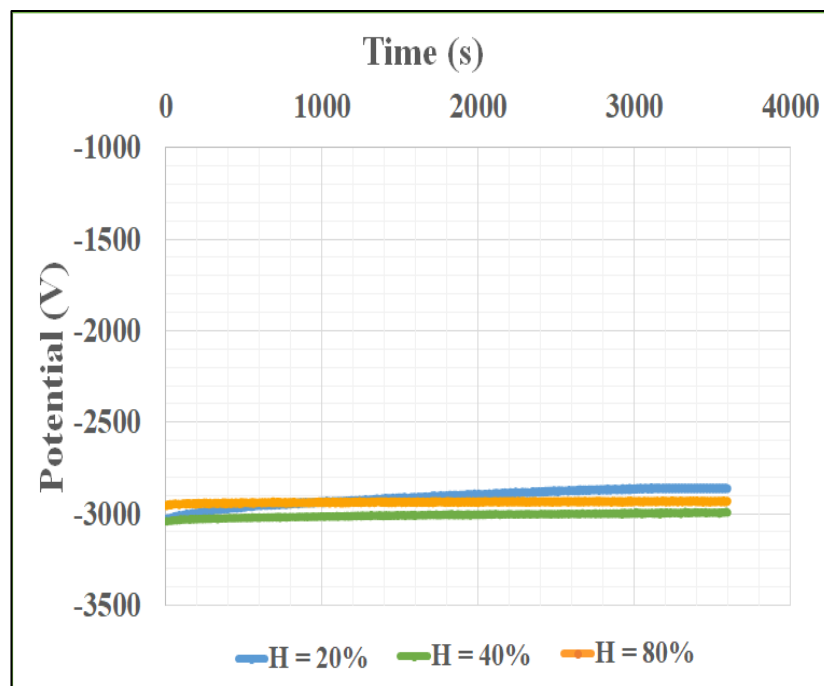


Figure IV.12 Graphique montrant trois déclin de potentiel après tribochargement des échantillons de PP contre de l'aluminium pour trois niveaux d'humidité différents pendant une durée d'une heure.

Dans la deuxième série d'expériences, afin de permettre la comparaison entre les courbes de décroissance du potentiel de surface du PVC et du PP à différents niveaux d'humidité, les échantillons de PP ont été frottés avec du bronze, afin de générer un potentiel négatif même pour RH = 80 %, ce qui n'était pas le cas lorsqu'ils étaient frottés contre des échantillons d'aluminium. De cette façon, il a été possible d'enregistrer la décroissance du potentiel à partir de la même valeur, - 3000 V, aux trois niveaux d'humidité relative, comme pour le PVC (Figure IV.12). Les résultats montrent que la variation des conditions ambiantes a peu d'influence sur la capacité du PP à maintenir le potentiel électrique sur sa surface. Le déclin du potentiel a été presque la même pour toutes les valeurs d'humidité, soit environ 100 V.

Le PP et le PVC sont deux polymères hydrophobes [187,188]. Cependant, ils n'ont pas eu le même comportement en termes de déclin de potentiel à différents taux d'humidité. Contrairement au PVC, le PP ne semble pas pour autant être influencé par l'augmentation de l'humidité ambiante.

Cette différence dans le comportement de ces deux polymères peut être due à la capacité des polymères à absorber l'eau. Selon Néméth [189] chaque polymère a sa propre capacité à absorber l'eau à différentes humidités. Des expériences de tribochargement et des mesures de résistivité de surface dans des atmosphères plus humides montrent que l'eau est capable de contrôler le comportement de la charge électrique. Avec l'augmentation de l'humidité, de petites quantités d'eau peuvent, soit former des couches d'adsorption sur les surfaces de polymères, soit gonfler la surface des polymères. La formation de couches contenant de l'eau est liée à l'introduction d'espèces ioniques, ce qui augmente la conductivité de la surface et favorise in fine le chargement triboélectrique [189].

Plusieurs études ont été effectuées concernant ce phénomène [190, 191]. Des chercheurs ont pu déterminer la valeur de travail d'extraction (« Work function » ; i.e., la valeur minimale du travail thermodynamique nécessaire pour extraire un électron d'un solide à un point dans le vide immédiatement à l'extérieur de la surface de celui-ci ; ce paramètre est donc spécifique pour chaque matériau). Ils ont constaté un changement significatif des valeurs du travail d'extraction en modifiant les taux d'humidité. Lors du tribochargement, les différences entre les valeurs du travail d'extraction modifient la probabilité que les électrons se déplacent entre les surfaces. Toutefois il existe des preuves que la charge triboélectrique pourrait être aussi

causée par les ions d'eau et que les électrons ne peuvent pas être les seuls responsables de la charge triboélectrique [87].

En conclusion, la densité des ions présents dans l'eau lors des expériences de tribochargement impacte d'une façon directe le comportement triboélectrique des polymères. Cependant, chaque polymère réagit de manière différente à des changements d'humidité.

L'augmentation de l'humidité a influencé une ou plusieurs caractéristiques des polymères en leur permettant de maintenir la charge électrique après tribochargement. Pour approfondir l'étude des effets de la teneur en eau sur le chargement triboélectrique des polymères d'autres expériences devront être réalisées en mesurant la résistivité électrique de ceux-ci, et surtout celle du PVC, lorsque l'humidité ambiante est supérieure à 70 % et en la comparant avec sa résistivité lorsque l'humidité est inférieure à 30 %.

IV.4 Conclusions

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence l'influence Les résultats montrent que la variation des conditions ambiantes a peu d'influence sur la capacité du PP à maintenir le potentiel électrique sur sa surface. Le déclin du potentiel a été presque la même pour toutes les valeurs d'humidité, soit environ 100 V. Le PP a une bien meilleure capacité que le PVC à conserver la charge électrique acquise par tribochargement, quelle que soit la valeur de l'humidité relative ambiante. de l'humidité relative de l'air ambiant sur la quantité de charge électrique et le déclin du potentiel électrique sur la surface des plaques en PVC et PP, tribochargées contre des barres parallélépipédiques en Al.

(1) La charge électrique générée par effet triboélectrique à la surface des plaques de PP change de signe avec l'augmentation de l'humidité ambiante, passant de négative pour une humidité relative inférieure à 30 % à positive pour une humidité relative supérieure à 60 %.

(2) Contrairement au cas du PP, le potentiel électrique généré sur la surface des plaques de PVC tribochargées contre l'aluminium est négatif pour toutes les valeurs de l'humidité ambiante, mais il diminue en valeur absolue avec l'augmentation de l'humidité relative.

(3) La capacité du PVC à conserver la charge de surface acquise par effet triboélectrique se détériore drastiquement lorsque l'humidité relative de l'air ambiant augmente de 20 % à 80 %.

(4) La variation de la décroissance du potentiel électrique de surface des échantillons de PP est très lente, quel que soit le niveau d'humidité relative de l'air ambiant.

(5) Selon leur nature, les polymères peuvent présenter un comportement triboélectrique différent par rapport à l'humidité relative de l'air ambiant.

Des expériences similaires devraient être réalisées sur plusieurs autres polymères, afin de mieux comprendre les mécanismes physiques qui pourraient expliquer l'influence de l'humidité ambiante sur leur comportement triboélectrique.

Une étude sur l'influence des variations de température sur le comportement triboélectrique des polymères doit également être réalisée.



« La vérité scientifique sera toujours plus belle que les créations de notre imagination et que les illusions de notre ignorance. »

- Claude Bernard (1813 – 1878)

Conclusions générales

Dans l'industrie, de plus en plus de pièces mécanique qui sont utilisées sont faites à partir de matériaux polymères, puisque jusqu'à nos jours, les polymères demeurent l'une des meilleures solutions et l'une des moins chers pour résister au contact fréquent entre les pièces ainsi que les chocs thermiques et les changement d'humidité suivant leur milieu d'utilisation. En plus du fait que les polymères sont les matériaux idéales pour être utiliser du point de vue technique et économique, ils sont aussi dotés de très bonnes propriétés mécanique (résistance à la corrosion, résistance à la fatigue, faible coefficient de frottement...etc.). Ils sont aussi utilisés pour leur bonne isolation électrique.

L'objectif premier de cette thèse a été d'approfondir les connaissances sur le comportement triboélectrique des matériaux polymères pour les contacts glissants. L'utilisation de diverses configurations de tests simplifiées a permis d'effectuer des études spécifiquement ciblées sur la charge électrique des polymères générée dans après tribochargement. Dans ce but, l'étude s'est d'abord portée sur l'influence de la DBD et ses paramètres sur l'état de surface et le comportement triboélectrique des polymères ; en relevant la distribution de la charge électrique à la surface de polymères après frottements. Ensuite, une étude sur l'influence de l'humidité relative sur le comportement triboélectrique des polymères a été réalisé pour tester la résistance de ces matériaux dans des milieux plus ou moins humides.

Pour ces travaux, nous avons utilisé trois systèmes de test, un système de chargement triboélectrique linéaire, un système de traitement par décharge à barrières diélectrique et un système de contrôle d'humidité et de la température ambiante. Les dispositifs avancés et les expériences contrôlées avec précision permettent une étude complète du comportement triboélectrique des surfaces de polymères.

Les conclusions générales de ce travail peuvent être formulées comme suit : Le traitement par plasma froid (DBD) influence directement l'état de surface des polymères en modifiant les paramètres de rugosité des échantillons traités, les degrés de cette modifications se produisent selon l'ajustement des différents paramètres qui caractérise la configuration de la cellule DBD. L'humidité relative ambiante a une influence directe sur le comportement triboélectrique des polymères, ces derniers n'ont pas eu tous la même réaction face aux changement importants de l'humidité ambiante.

Dans les conditions de l'étude, les conclusions suivantes ont pu être tirées :

Conclusions générales et perspectives

1. Le comportement triboélectrique des polymères est directement influencé par un traitement par plasma froid, un polymère traité ne génère pas un potentiel électrique avec la même distribution et la même quantité qu'un polymère non traité.
2. Le traitement par plasma froid influence directement l'état de surface des polymères, c'est cette modification de l'état de surface qui est le principal facteur sur le changement du comportement triboélectrique des matériaux traités.
3. Chaque paramètre de la cellule DBD influant sur l'intensité de la génération du plasma froid, est directement influant sur l'état de surface des échantillons traités, et conséquemment un facteur influant sur le comportement triboélectrique de l'échantillon.
4. L'humidité relative ambiante joue un rôle important dans la génération de potentiel, le comportement triboélectrique d'un polymère ne reste pas le même lors des modifications des taux d'humidité, et chaque polymère réagit différemment à ces fluctuations d'humidité.
5. Le déclin du potentiel électrique est influencé par les modifications dans les taux d'humidité ambiante, une humidité élevée peut accélérer le décroissement du potentiel sur la surface du polymère, mais cela dépend de la nature du polymère.

En conclusion, ce travail permet de mieux comprendre le comportement triboélectrique des matériaux polymères couramment utilisés et identifie la génération, la distribution et la dissipation des potentiels électriques générés dans différentes conditions dans lesquelles le mouvement relatif des matériaux en contact (force de contact, vitesse de déplacement, et temps de charge) ainsi que l'état de leur surface, qui peut être modifié par l'exposition à une décharge à barrière diélectrique. La détermination des amplitudes, des polarités, de la distribution et de la dissipation du potentiel électrique due au contact glissant sec est très importante pour éviter les risques électrostatiques dans les applications industrielles et domestiques en éliminant ces charges de différentes manières. La réduction de la charge causée par le frottement est importante dans la fabrication électronique, ainsi que dans les industries chimiques, pétrochimiques et textiles. D'autre part, ces charges triboélectriques peuvent être utilisées du côté positif comme source d'énergie électrique dans des systèmes avec leur propre alimentation à partir de générateurs triboélectriques.

Perspectives

Les études menées dans le cadre de cette thèse ouvrent plus perspectives prometteuses et intéressantes, ce qui permettra de bien comprendre et maîtriser encore plus le comportement triboélectriques des matériaux isolants.

Les futurs travaux qui suivront cette thèse devront se focaliser sur les aspects suivants ;

1. Etude du chargement par effet couronne sur des polymères traités par plasma froid, cette étude nous permettra de mieux comprendre le comportement électrique des polymères après chargement par effet couronne. Une comparaison pourra être faite par la suite entre l'influence de la DBD sur le chargement triboélectrique et le chargement par effet couronne respectivement.
2. Etude de l'influence de la température ambiante sur la charge électrique généré par tribochargement, en effet, comme l'étude sur l'effet de l'humidité a déjà été réalisée, un travail complémentaire visant à mieux comprendre l'influence des paramètres météorologiques est primordial.
3. Modélisation expérimentale de la charge électrique générée par effet triboélectrique sur plusieurs matériaux polymères devrait permettre de mieux maîtriser ce phénomène.
4. Etude sur l'anisotropie des différents polymères, pour mieux comprendre l'influence de l'état de surface sur le comportement triboélectrique des matériaux isolants.
5. Etude de l'influence de la DBD sur le contact glissant lubrifié entre polymères, une comparaison pourra ensuite être réalisée entre l'influence du plasma froid sur le contact sec et le contact lubrifié des matériaux.

Contributions scientifiques

O. Tilmatine, T. Zegloul, K. Medles, L. Dascalescu, A. Fatu, Effect of ambient air relative humidity on the triboelectric properties of Polypropylene and Polyvinyl Chloride slabs, *Journal of Electrostatics*, 115 (2022) 103651.

O. Tilmatine, L. Dascalescu, T. Zegloul, K. Medles, A. Fatu, Study of the influence of the different parameters of the atmospheric DBD treatment on the surface roughness and the electric potential distribution generated after the tribocharging of polypropylene. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 57(4) (2021) 4162-4169.

O. Tilmatine, T. Zegloul, A. Fatu, L. Dascalescu, K. Medles, Study of the effect of the duration of the cold plasma treatment on the triboelectric properties of polymers. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2020 1-4.

O. Tilmatine, T. Zegloul, A. Fatu, L. Dascalescu, K. Medles, Effect of Ambient Air Relative Humidity on the Surface Electric Potential Decay of Tribocharged Polypropylene and Polyvinyl Chloride Slabs. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS) (2021) 1-4.

K. Hazadji, **O. Tilmatine**, T. Zegloul, M.B. Neagoe, L. Dascalescu, Study of the effect of plasma treatment on the triboelectric properties of Polyethylene (PE) and Polypropylene (PP) slabs. In *Journal of Physics: Conference Series*, 1322(1) (2019) 012011.

Table des figures

Figure I.1 Schéma de Polymérisation du PVC [32].	14
Figure I.2 Les différents groupes de thermoplastiques classés selon leurs propriétés thermiques ainsi que les différents secteurs d'utilisation des polymères [50].	15
Figure I.3 Frottement statique (a) et dynamique (b)	16
Figure I.4 Schéma de l'aire de contact apparente par rapport à l'aire de contact réelle [67].	18
Figure I.5 Approche simplifiée de la classification de l'usure des polymères [68].	19
Figure I.6 Transfert de charge par effet triboélectrique entre deux matériaux [80].	20
Figure I.7 Mécanismes possibles de transfert de charge [56].	22
Figure I.8 Différentes applications du chargement par effet triboélectrique ; (1) La photocopie [115] ; (2) La peinture électrostatique [116] ; (3) La séparation électrostatique [117] ; (4) La filtration électrostatique [118].	28
Figure I.9 Système de triboélectrification et de mesure de charge [121].	29
Figure I.10 Tribomètre linéaire ou va-et-vient [68].	30
Figure I.11 Tribomètre pion-disque [3].	31
Figure I.12 Tribomètre à deux cylindres [21].	32
Figure I.13 Banc de tribochargement sphère/Plan [22].	33
Figure I.14 Banc d'essai triboélectrique ; (1) Moteur électrique linéaire ; (2) Système de contrôle de la force verticale ; (3) Porte échantillon supérieur ; (4) Porte échantillon inférieur ; (5) Capteurs de forces normale et tangentielle ; (6) Système de guidage h.	34
Figure I.15 Principe de fonctionnement du plasma sur le matériau traité [131].	35
Figure II.1 Structure chimique du polychlorure de vinyle (PVC) [148].	43
Figure II.2 Structure chimique du Polyéthylène (PE) [149].	44
Figure II.3 Structure chimique du Polypropylène (PP) [150].	45
Figure II.4 Structure chimique du Polytétrafluoroéthylène (PTFE) [151].	45

Table des figures

Figure II.5 Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.	48
Figure II.6 Résultats spectrométriques de quelques polymères utilisés lors de cette étude.	49
Figure II.7 Dispositifs pour la métrologie des surfaces : a) rugosimètre interférométrique confocal ; b) rugosimètre avec contact.....	50
Figure II.8 Géométrie et dimensions en mm des éprouvettes utilisées.	51
Figure II.9 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.....	52
Figure II.10 Banc d'essai tribomètre plan/plan : A- L'échantillon supérieur reste fixe ; B- L'échantillon inférieur est soumis à une translation alternative ; 1- Moteur linéaire ; 2- Système de contrôle de la force normale ; 3- Thermomètre et hygromètre ; 4- Support de l'échantillon supérieur ; 5- Support de l'échantillon inférieur ; 6- Guidage supporté par un roulement linéaire ; 7- Capteur de force normale ; 8- Capteur de force tangentielle ; 9- Capteur de déplacement linéaire ; 10- Conditionneur de capteur de déplacement ; 11- Conditionneur de capteur de force ; 12- Carte d'acquisition de données ; 13- Interface d'acquisition LabView ; 14- Interrupteur de fin de course ; 15- Moteur rotatif. [64].....	55
Figure II.11 Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.....	56
Figure II.12 Photographie (a) et principe de fonctionnement (b) du voltmètre électrostatique.....	57
Figure II.13 Banc de mesure et de cartographie du potentiel électrique.	58
Figure II.14 Schématisation de l'installation expérimentale de génération 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.....	59
Figure II.15 Photographie de l'installation complète de la cellule de traitement par DBD.	60
Figure II.16 a) Photographie de la machine de contrôle de l'humidité et de la température. b) Panneau de contrôle de la machine.	63

Table des figures

Figure III.1 Evolution de la tribo-charge des granules en fonction du temps d'exposition à la DBD [164].	67
Figure III.2 Schéma des réactions du contact d'un plasma à la surface d'un polymère [165].	68
Figure III.3 Schéma global du montage expérimental utilisé pour le traitement de plaques de polymères par la DBD.	69
Figure III.4 Pilotage de l'amplificateur haute tension.	70
Figure III.5 Photographie d'un traitement DBD en cours sur un échantillon en PP.	70
Figure III.6 Photographie des échantillons utilisés dans les expériences ; (1) échantillon d'aluminium ; (2) échantillon de PP non traité ; (3) échantillon de PP traité.	71
Figure III.7 Réacteur DBD ; (1) Diélectrique (verre) ; (2) électrode à plaque mise à la terre ; (3) électrode haute tension ; (4) plasma ; (5) échantillon de polymère (PP) ; (6) Haute tension AC ; (7) Distance inter-électrode ; (8) Temps de traitement.	72
Figure III.8 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après différents temps de traitement au plasma froid. $f = 2000$ Hz ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; $U = 30$ kV ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.	75
Figure III.9 Configuration de la cellule DBD ; (a) Configuration double barrière diélectrique ; (b) Configuration une seule barrière diélectrique.	76
Figure III.10 Rugosité de surface de deux échantillons PP différents dans deux configurations de cellules DBD atmosphériques différentes (simple diélectrique et double diélectrique) $t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; $U = 30$ kV ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.	77
Figure III.11 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après traitement par plasma froid avec différentes distances inter-électrodes. $t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; $U = 30$ kV ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.	79
Figure III.12 Rugosité de surface de deux échantillons de PP différents après traitement par plasma froid avec différentes tensions ; $t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm.	80

Table des figures

- Figure III.13** Rugosité de surface de deux échantillons différents en PP après traitement par plasma froid sous différentes fréquences ; $t = 20$ min ; $U = 30$ kV ; distance inter-électrodes = 12,5 mm ; épaisseur de la barrière diélectrique = 4 mm. 81
- Figure III.14** Rugosité de surface de deux échantillons différents en PP après traitement par plasma froid sous différentes épaisseurs du diélectrique ; $U = 30$ kV ; $t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; distance inter-électrodes = 12,5 mm. 82
- Figure III.15** Images comparatives prises avec un microscope Keyence VHX-7000 d'une surface brute (non traitée) et d'une surface traitée au plasma froid du même échantillon de PP. (a) Surface non traitée ; (b) Surface traitée au plasma ($t = 20$ min ; $f = 2000$ Hz ; Distance inter-électrode = 4 mm ; fréquence = 2000 Hz ; $U = 30$ kV ; épaisseur du diélectrique = 4 mm). .. 83
- Figure III.16** Cartographie du potentiel électrique mesuré à la surface d'échantillons de PP non traités, après tribochargement ; (a) premier échantillon ; (b) second échantillon. 86
- Figure III.17** Cartographie du potentiel électrique généré par tribochargement sur la surface d'un échantillon de PP traité par DBD "rugueux", caractérisé par une rugosité de $R_a = 0,22 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$) et $R_q = 0,25 \mu\text{m}$ ($\pm 0,03 \mu\text{m}$). Le cercle rouge en pointillé indique la position de l'électrode d'aluminium pendant le traitement DBD. 88
- Figure III.18** Cartographie du potentiel électrique généré par tribochargement sur la surface d'un échantillon de PP traité par DBD "lisse", caractérisé par $R_a = 0,10 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$) et $R_q = 0,13 \mu\text{m}$ ($\pm 0,02 \mu\text{m}$). Le cercle rouge en pointillé indique la position de l'électrode d'aluminium pendant le traitement DBD. 88
- Figure III.19** Diagramme comparatif entre les valeurs du potentiel électrique généré par tribochargement à la surface des échantillons de PP ayant des rugosités différentes dues au traitement par DBD 90
- Figure IV.1** Photos des échantillons utilisés dans les expériences ; (1) échantillon en PP ; (2) échantillon en PVC ; (3) échantillon en aluminium. 95
- Figure IV.2** Panneau de contrôle de la température de l'humidité dans la chambre d'essais. 95
- Figure IV.3** Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon EN PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 20 % 98
- Figure IV.4** Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 20 % 98

Table des figures

Figure IV.5 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 50 %.....	99
Figure IV.6 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 50 %.....	100
Figure IV.7 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PP tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 80 %.....	101
Figure IV.8 Cartographie du potentiel électrique sur la surface d'un échantillon en PVC tribochargé avec de l'aluminium à une humidité de 80 %.....	102
Figure IV.9 Graphique comparatif entre deux séries d'expériences sur l'influence de l'humidité sur le potentiel généré sur des plaques de PP après tribochargement.	104
Figure IV.10 Graphique comparatif entre deux séries d'expériences sur l'influence de l'humidité sur le potentiel généré sur des plaques de PVC après tribochargement.....	104
Figure IV.11 Graphique montrant trois déclinés de potentiel après tribochargement des échantillons de PVC contre de l'aluminium pour trois niveaux d'humidité différents pendant une durée d'une heure.	106
Figure IV.12 Graphique montrant trois déclinés de potentiel après tribochargement des échantillons de PP contre de l'aluminium pour trois niveaux d'humidité différents pendant une durée d'une heure.....	107

Bibliographie

- [1] C. K. Park, C. D. S. Kan, W. T. Hollowell, S. I. Hill, "Investigation of Opportunities for Lightweight Vehicles using Advanced Plastics and Composites," National Highway Traffic Safety Administration, (2012), Document ID: DOT HS 811 692.
- [2] B. Cantor, P. Grant, C. Johnston, "Automotive Engineering: Lightweight, Functional, and Novel Materials," CRC Press, (2008), pp. 29- 35.
- [3] P. M. Hergenrother, "The Use, Design, Synthesis, and Properties of High Performance/High Temperature Polymers: An Overview," High Performance Polymers, (2003)? Vol. 15, No. 1, pp. 3-45.
- [4] A. S. Al-Hussaini, "Synthesis and Characterization of New Thermally Stable Polymers as New High-Performance Engineering Plastics," High Performance Polymers, (2014), Vol. 26, No. 2, pp. 166-174.
- [5] Q. M. Zhang, H. Li, M. Poh, F. Xia, Z. Y. Cheng, H. Xu, C. Huang, "An all-organic composite actuator material with a high dielectric constant." *Nature* vol. 419,6904 (2002): 284-7. doi:10.1038/nature01021
- [6] R. P. Ortiz, A. Facchetti, T. J. Marks, "High-k organic, inorganic, and hybrid dielectrics for low-voltage organic field-effect transistors." *Chemical reviews* vol. 110,1 (2010): 205-39. doi:10.1021/cr9001275.
- [7] J. Henniker, "Triboelectricity in polymers." *Nature* 196.4853 (1962), 474-474.
- [8] D. J. Lacks and R. M. Sankaran, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 44, (2011), 453001.
- [9] M. W. Williams, "Triboelectric charging of insulating polymers—some new perspectives." *Aip Advances* 2.1 (2012): 010701.
- [10] [A. Tilmatine, K. Medles, S. E. Bendimerad, F. Boukholda, L. Dascalescu, "Electrostatic separators of particles: Application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures," *Waste management*, (2009), 29(1), 228-232.
- [11] A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, L. Dascalescu, "Electrostatic separation of metals and plastics from granular industrial wastes," *IEE Proceedings-Science, Measurement and Technology*, , 2001, 148(2), 47-54.
- [12] A. Ohsawa, "Computer simulation for assessment of electrostatic hazards in filling operations with powder," *Powder Technology*, 135–136, (2003). [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(03\)00162-1](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(03)00162-1).
- [13] Jones, B. Thomas, King, L. Jack L, Yablonsky, F. Jack, "Powder Handling and Electrostatics: Understanding and Preventing Hazards," 1991.

Bibliographie

- [14] J. R. Cox, "Technology's promise, the copying of records, and the archivist's challenge: A case study in documentation rhetoric." (2011): 131-149.
- [15] M. R. Pendar, J. C. Páscoa, "Numerical modeling of electrostatic spray painting transfer processes in rotary bell cup for automotive painting." *International Journal of Heat and Fluid Flow* 80 (2019): 108499.
- [16] S. Yoshida, K. Hagiwara, T. Hasebe, A. Hotta, "Surface modification of polymers by plasma treatments for the enhancement of biocompatibility and controlled drug release," *Surface and Coatings Technology*, (2013), 233, 99-107.
- [17] A. Jordá-Vilaplana, V. Fombuena, D. García-García, M. D. Samper, L. Sánchez-Nácher, "Surface modification of polylactic acid (PLA) by air atmospheric plasma treatment," *European polymer journal*, (2014), 58, 23-33.
- [18] N. Vandencastele, F. Reniers, "Plasma-modified polymer surfaces: Characterization using XPS," *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*, (2010), 178, 394-408.
- [19] J. Kolehmainen, P. Sippola, O. Raitanen, A. Ozel, C. M. Boyce, P. Saarenrinne, S. Sundaresan, "Effect of humidity on triboelectric charging in a vertically vibrated granular bed: experiments and modeling," *Chemical Engineering Science*, (2017), 173, 363-373.
- [20] R. D. Cruise, K. Hadler, S. O. Starr, J. J. Cilliers, "The effect of particle size and relative humidity on triboelectric charge saturation," *Journal of Physics D: Applied Physics*, (2022), 55(18), 185306.
- [21] K. Hiratsuka, K. Hosotani, "Effects of friction type and humidity on triboelectrification and triboluminescence among eight kinds of polymers," *Tribol. Int.* 55 (2012) 87–99.
- [22] A. Alahmadi, Influence of triboelectrification on friction coefficient, *Int. J. Sci. Eng. Res.* 5 (2014) 22–29.
- [23] 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.* 40 (2007) 1253–1257. doi:10.1016/j.triboint.2006.11.006.
- [24] E. Nemeth, V. Albrecht, G. Schubert, "Polymer Tribo-electric Charging: Dependence on Thermodynamic Surface Properties and Relative Humidity," *J. Electrostat*, 3 (2003) 16.

Bibliographie

- [25] L. Ning, L. Jian, S. Yang, J. Wang, J. Ren, J. Wang, Effect of carbon black on triboelectrification electrostatic potential of MC nylon composites, *Tribol. Int.* 43 (2010) 568–576. doi:10.1016/j.triboint.2009.09.005.
- [26] T.A.L. Burgo, T.R.D. Ducati, K.R. Francisco, K.J. Clinckspoor, F. Galembeck, S.E. Galembeck, Triboelectricity: Macroscopic charge patterns formed by self-arraying ions on polymer surfaces, *Langmuir*. 28 (2012) 7407–7416. doi:10.1021/la301228j.
- [27] G.S.P. Castle, Contact charging between insulators, *J. Electrostat.* 40–41 (1997) 13–20. doi:10.1016/S0304-3886(97)00009-0.
- [28] N. Maeda, N. Chen, M. Tirrell, J.N. Israelachvili, Adhesion and Friction Mechanisms of Polymer-on-Polymer Surfaces, *Science* (80-.). 297 (2002) 379–382. doi:10.1126/science.1072378.
- [29] S.R. Pearson, P.H. Shipway, J.O. Abere, R.A.A. Hewitt, The effect of temperature on wear and friction of a high strength steel in fretting, *Wear*. 303 (2013) 622–631. doi:10.1016/j.wear.2013.03.048.
- [30] J.S. Bergstrom, *Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling*, Elsevier Science, 2015. <https://books.google.fr/books?id=DfucBAAAQBAJ>.
- [31] C. Oudet, *Polymères- structure et propriétés introduction*, Masson, 1994.
- [32] « Schéma de Polymérisation du PVC » https://www.seilnacht.com/Lexikon/k_pvc.html
- [33] B.-B. Bin Jia, T.-S.S. Li, X.-J.J. Liu, P.-H.H. Cong, Tribological behaviors of several polymer-polymer sliding combinations under dry friction and oil-lubricated conditions, *Wear*, 262 (2007) 1353–1359. doi:10.1016/j.wear.2007.01.011.
- [34] B.J. Briscoe, J.K. Lancaster, *Tribology of Plastic Materials - Their Characteristics and Applications to Sliding Components*, Elsevier Science, 1990. doi:10.1016/S0167-8922(08)70106-8.
- [35] N.S. Eiss, J. Hanchi, Stick–slip friction in dissimilar polymer pairs used in automobile interiors, *Tribol. Int.* 31 (1998) 653–659. doi:10.1016/S0301-679X(98)00092-9.
- [36] N.K.K. Myshkin, M.I.I. Petrokovets, A.V. V. Kovalev, Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer, *Tribol. Int.*, 38 (2005) 910–921. doi:10.1016/j.triboint.2005.07.016.
- [37] J. Rojsatean, P. Larpsuriyakul, N. Prakymoramas, D. Thanomjittr, S. Kaewket, T. Singsom, D. Srinun, Friction characteristics of self-lubricating ABS under different surface roughnesses and temperatures, *Tribol. Int.* 109 (2017) 229–237. doi:10.1016/j.triboint.2016.12.055.

Bibliographie

- [38] D.H. Cho, B. Bhushan, Friction and wear of various polymer pairs used for label and wiper in labeling machine, *Tribol. Int.*, 98 (2016) 10–19. doi:10.1016/j.triboint.2016.02.019.
- [39] Z. Rymuza, Tribology of Polymers, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, 7 (2007) 177–184. doi:10.1016/S1644-9665(12)60235-0.
- [40] A. Kumar, R.K. Gupta, *Fundamentals of Polymer Engineering*, Second Edition. New York, CRC Press. 2003.
- [41] J.A. Brydson, *Plastics Materials*, 7th ed., Butterworth Heinemann, Oxford, 1999
- [42] M.F. Ashby, K. Johnson, *Materials and Design: The Art and Science of Material Selection in Product Design*, Elsevier Science, 2013. doi:10.1073/pnas.0703993104.
- [43] D.M. Nuruzzaman, M.A. Chowdhury, Friction and Wear of Polymer and Composites, in: N.B.T.-C. and T.P. Hu (Ed.), *InTech*, Rijeka, 2012: p. Ch. 14. doi:10.5772/48246.
- [44] S.K. Sinha, B.J. Briscoe, *Polymer Tribology*, Imperial College Press, 2009. doi:10.1142/9781848162044.
- [45] B.J. Briscoe, S.K. Sinha, Tribological applications of polymers and their composites – past, present and future prospects, in: *Tribol. Polym. Nanocomposites*, Elsevier, 2013: pp. 1-22. doi:10.1016/B978-0-444-59455-6.00001-5.
- [46] G. Stachowiak, A.W. Batchelor, *Experimental Methods in Tribology*, Elsevier Science, 2004.
- [47] B. Bhushan, *Modern Tribology Handbook*, Two Volume Set, CRC Press, 2000.
- [48] K. Friedrich, A. Schlarb, Tribology of Polymeric Nanocomposites, Friction and Wear of Bulk Materials and Coatings (*Tribology and Interface Engineering*), 55 (2008).
- [49] B.J. Briscoe, *Physicochemical Aspects of Polymer Surfaces*, Ed. K. Mittal, Plenum Press, New York 1983.
- [50] « Les matériaux polymères en quelques clics », <https://fr.slideserve.com/elkan/les-mat-ri-iaux-polym-res-en-quelques-clics-1>
- [51] L. Liu, A.M. Seyam, W. Oxenham, Frictional electrification on polymeric flat surfaces, *J. Eng. Fiber. Fabr.*, 8 (2013) 126–136. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84875394479&partnerID=40&md5=b8af10d1b698bed066e5bca5bc550dea>
- [52] J. Lowell, A. C. Rose-Innes, “Contact electrification,” *Adv. Phys.*, 296 (1980) 947–1023.

Bibliographie

- [53] C. Guerret-Piécourt, J. Vallayer, D. Tréheux, Limitation induced by electrical charges effects on micromechanisms, *Wear.* 254 (2003) 950–958. doi:10.1016/S0043-1648(03)00299-0.
- [54] G. Xie, D. Guo, J. Luo, Lubrication under charged conditions, *Tribol. Int.*, 84 (2015) 22–35.
- [55] C. Guerret-Piecourt, S. Bec, D. Treheux, Electrical charges and tribology of insulating materials, *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences - Ser. IV Physics, Astrophys.*, 2 (2001) 761–774. doi:10.1016/S1296-2147(01)01218-5.
- [56] 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.* 4 (2014) 1166–1169.
- [57] K.C. Ludema, D. Tabor, The friction and visco-elastic properties of polymeric solids, *Wear*, 9 (1966) 329–348.
- [58] W.J. Bartz, History of Tribology - The bridge between the classical antiquity and the 21st Century, in: *Proceedings 2nd World Tribol. Congr.*, Vienna, (2001) 3–12.
- [59] N. Fulleringer, Contribution à l'étude des phénomènes de friction : application au matériau papier, Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2015.
- [60] M.A. Chowdhury, M.M. Helali, The effect of amplitude of vibration on the coefficient of friction for different materials, *Tribol. Int.*, 41 (2008) 307–14.
- [61] L.-H. Lee, *Advances in Polymer Friction and Wear*, Plenum Press, New York and London, 1974.
- [62] B.J. Briscoe, *Interfacial Friction of Polymer Composites. General Fundamental Principles*, Elsevier, 1985. doi:10.1016/B978-0-444-42524-9.50006-5.
- [63] F.P. Bowden, D. Tabor, F. Palmer, The Friction and Lubrication of Solids, *Am. J. Phys.* 19 (1951) 428–429. doi:10.1119/1.1933017.
- [64] V.L. Popov, *Contact mechanics and friction: Physical principles and applications*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010. doi:10.1007/978-3-642-10803-7.
- [65] K. Shooter, D. Tabor, "The frictional properties of plastics," *Proc R Soc*, 65 (1952) 661.
- [66] B. Bhushan, "Introduction to Tribology," John Wiley & Sons, 2002.
- [67] « Les forces de l'escalade : les frottements »
https://gblanc.fr/spip.php?page=forum&id_article=467
- [68] Y.E. Prawatya, « Multivariate optimisation and statistical process control of polymer triboelectric charging », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2018.

Bibliographie

- [69] G. M. Sessler, "Charge storage in dielectrics," *IEEE Trans. Electr. Insul.*, 24 (1989) 395-402.
- [70] L.B. Schein, "Color Electrophotography," in: *Electrophotogr. Dev. Phys.*, Springer Berlin Heidelberg, (1992) 245–274. doi:10.1007/978-3-642-77744-8_11
- [71] A.G. Bailey, "The charging of insulator surfaces," *J. Electrostat.* 51–52 (2001) 82–90. doi:10.1016/S0304-3886(01)00106-1.
- [72] S. Matsusaka, H. Maruyama, T. Matsuyama, M. Ghadiri, "Triboelectric charging of powders: A review," *Chem. Eng. Sci.*, 65 (2010) 5781–5807.
- [73] D.K. Davies, "Charge generation on dielectric surfaces," *J. Phys. D.*, 2 (1969) 1533-1537.
- [74] J.-S. Chang, A.J. Kelly, J.M. Crowley, "Handbook of Electrostatic Processes," CRC Press, New York, Basel, Hong Kong, 1995. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- [75] P. Iversen, D.J. Lacks, "A life of its own: The tenuous connection between Thales of Miletus and the study of electrostatic charging," *J. Electrostat.* 70 (2012) 309–311. doi:10.1016/j.elstat.2012.03.002.
- [76] J.F. Keithley, "Story of electrical and magnetic measurements: from 500 B.C. to the 1940s," IEEE Press, New York, 1999.
- [77] A.K. Chakraborty, S.C. Bhattacharya, B.G. Varma, "The story of electricity," New Delhi, 1985.
- [78] K.L. Kaiser, *Electrostatic Discharge*, Taylor & Francis, Boca Raton, FL, 2006.
- [79] S.H. Carr, D.K. Davies, P. Fischer, "Electrical of Polymers Properties," Academic Press, Orlando, FL, 1982.
- [80] D.M. Taylor, P. E. Secker, "Industrial electrostatics: Fundamentals and measurements," Research Studies Press, John Wiley 1994.
- [81] W.R. Harper, "Contact and Frictional Electrification," The Lapacian Press, Morgan Hill, 1967. doi:10.1049/ep.1967.0352.
- [82] C.Y. Liu, A.J. Bard, "Electrons on dielectrics and contact electrification," *Chem. Phys. Lett.* 480 (2009) 145–156. doi:10.1016/j.cplett.2009.08.045.
- [83] D.K. Davies, "The examination of the electrical properties of insulators by surface charge measurement," *J. Sci. Instrum.* 44 (1967) 521–524. doi:10.1088/0950-7671/44/7/308.
- [84] J. Fuhrmann, "Contact electrification of dielectric solids", *J. Electrostat.* 4 (1978) 109–118. doi:10.1016/0304-3886(78)90067-0.

Bibliographie

- [85] J. Fuhrmann, R. Lamour, „Gleichstromleitfähigkeit und Polarisationsströme des Polystyrols,“ 140 (1977) 131–140.
- [86] A.R. Akande, J. Lowell, “Charge transfer in metal/polymer contacts,” *J. Phys. D. Appl. Phys.* 20 (1987) 565. <http://stacks.iop.org/0022-3727/20/i=5/a=002>.
- [87] L.S. McCarty, G.M. Whitesides, “Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets,” *Angew. Chemie - Int. Ed.* 47 (2008) 2188–2207. doi:10.1002/anie.200701812.
- [88] Hammi, T. "Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles." Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2005.
- [89] J. Lowell, W. S. Truscott, "Triboelectrification of identical insulators: I. an experimental investigation," *J. Phys. D.*, 19 (1986) 1273-1280.
- [90] K.M. Forward, D. J. Lacks, R. M. Sankaran, "Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle– Particle Interactions." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48-5 (2008) 2309-2314.
- [91] P.E. Shaw, "Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series." *Proc. R. Soc. Lond. A*, 94-656 (1917) 16-33.
- [92] Y. Matsushita, N. Mori, T. Sometani, "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades." *Electrical engineering in Japan*, 127-3 (1999) 33-40.
- [93] V.K. Jasti, “Electrostatic charge generation and dissipation on woven fabrics treated with antistatic and hydrophilic surface finishes,” North Carolina State University, 2012.
- [94] M. Ando, J. Sukumaran, "Effect on Friction for Different Parameters in Roll–Slip of Polyamide–Steel Nonconformal Contacts," *Tribol. Trans.*, 55-1 (2012) 109–116.
- [95] A.C. Rose-Innes, K.P. Homewood, "An Accumulation of Contact Charge on Insulators Repeatedly Touched by Metals," *J. Phys. D., Appl. Phys.*, 15-2 (1982) 2283.
- [96] J.W. Kwek *et al.*, « High speed imaging with electrostatic charge monitoring to track powder deagglomeration upon impact », *Journal of Aerosol Science*, 65 (2013) 77-87.
- [97] S. Karner, E. M. Littringer, N. A. Urbanetz, “Triboelectrics: The influence of particle surface roughness and shape on charge acquisition during aerosolization and the DPI performance,” *Powder Technology*, 262 (2014) 22-29.
- [98] S. Naik, R. Mukherjee, B. Chaudhuri, « Triboelectrification: A review of experimental and mechanistic modeling approaches with a special focus on pharmaceutical powders », *International Journal of Pharmaceutics*, 510-1 (2016) 375-385.

Bibliographie

- [99] M.B. Neagoe, Y.E. Prawatya, T. Zegloul, L. Dascalescu, "Influence of surface roughness on the tribo-electric process for a sliding contact between polymeric plate materials." IOP In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 174-1 (2017) 012003, IOP Publishing, 2017. doi:10.1088/1757-899X/174/1/012003.
- [100] A.E. Wang *et al.*, « Dependence of triboelectric charging behavior on material microstructure », *Physical Review Materials*, 1-3 (2017) 035605.
- [101] Y.G. Chung, D. J. Lacks, "Atomic mobility in strained glassy polymers: The role of fold catastrophes on the potential energy surface," *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, 50-24 (2012)1733-1739.
- [102] S. Naik *et al.*, "A combined experimental and numerical approach to explore tribocharging of pharmaceutical excipients in a hopper chute assembly," *International Journal of Pharmaceutics*, 491-1 (2015) 58-68.
- [103] M. Lungu, « Electrical separation of plastic materials using the triboelectric effect », *Minerals Engineering*, vol. 17, n° 1, p. 69-75, 2004.
- [104] G. Rowley, L. A. Mackin, "The effect of moisture sorption on electrostatic charging of selected pharmaceutical excipient powders," *Powder Technology*, 135 (2003) 50-58.
- [105] M.P. Grosvenor, J.N. Staniforth, "The influence of water on electrostatic charge retention and dissipation in pharmaceutical compacts for powder coating," *Pharmaceutical Research*, 13-11 (1996) 1725-1729.
- [106] 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.
- [107] M. Barletta, A. Gisario, "Electrostatic spray painting of carbon fibre-reinforced epoxy composites," *Prog. Org. Coatings*. 64 (2009) 339–349.
doi:10.1016/j.porgcoat.2008.07.020.
- [108] C. Schmitt, M. Lebienu, "Electrostatic painting of conductive composite materials," *J. Mater. Process. Technol.* 134 (2003) 303–309. doi:10.1016/S0924-0136(02)01114-7.
- [109] 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*, (2010) 1-7.
- [110] T. Hemamalini, V.R. Giri Dev, "Comprehensive review on electrospinning of starch polymer for biomedical applications," *Int. J. Biol. Macromol.* (2017). doi:10.1016/j.ijbiomac.2017.08.079.

Bibliographie

- [111] M. Bilici, L. Dascalescu, C. Dragan, O. Fati, A. Iuga, A. Samuila, "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 18 (2011) 1476–1483. doi:10.1109/TDEI.2011.6032818.
- [112] S.A. Moshkin, A. A.; Moshkina, "Electrical filters made of polymer materials," J. Electrostat. 41 (1997) 681–685. doi:10.1016/S0304-3886(97)00115-0.
- [113] A. Fatihou, N. Zouzou, G. Iuga, L. Dascalescu, "Measurement of the electric potential at the surface of nonuniformly charged polypropylene nonwoven media," J. Phys. Conf. Ser. 646 (2015). doi:10.1088/1742-6596/646/1/012035.
- [114] A. Fatihou, L. Dascalescu, N. Zouzou, L.M. Dumitran, "Interpretation of surface potential measurements performed with the vibrating capacitive probe of an electrostatic voltmeter," 2014 IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. IAS 2014. (2014) 1–6. doi:10.1109/IAS.2014.6978354.
- [115] [Following Physics 12](#)
- [116] [Pourquoi la peinture électrostatique est-elle meilleure que la peinture liquide ? | Entreprise sans fautes \(entreprise-sans-fautes.com\)](#)
- [117] [H. S. Jeon, S. M. Shin, B. G. Kim](#), "Electrostatic separation system for removal for fine metal from plastic", U.S Patent, No 7,767,924 B2.
- [118] [Quels sont les filtres d'un purificateurs ? \(masquepollution.com\)](#)
- [119] 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. 17 (1979) 2961-2974.
- [120] M.B. Neagoe, « Modélisation expérimentale de phénomènes électrostatique et tribologique aux interfaces solide/solide », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2017.
- [121] W.D. Greason, "Investigation of a test methodology for triboelectrification," J. Electrostat. 49 (2000) 245–256.
- [122] K. Ohara, "Relationship Between Frictional Electrification and Molecular Motion of Polymers," J. Electrostat., 9 (1980) 107–115.
- [123] Y.P. Chang, J.P. Yur, H.M. Chou, H.M. Chu, "Tribo-electrification mechanisms for self-mated carbon steels in dry severe wear process," Wear. 260 (2006) 1209–1216. doi:10.1016/j.wear.2005.09.001.
- [124] T. Zeghloul, « Etude des phénomènes d'adhérences et de glissements dans un contact entre solides : approche expérimentale et modélisation », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 1992.

Bibliographie

- [125] B. Held, "Physique des plasmas froids," physique fondamentale et appliquée, Edition Masson, 1994.
- [126] K.D. Kostov et al., "Treatment of PET and PU polymers by atmospheric pressure plasma generated in dielectric barrier discharge in air," *Surface and Coatings Technology*, 204 (2010) 3064-3068.
- [127] Z. Niu, C. Zhang, T. Shao, Z. Fang, Y. Yu, P. Yan, "Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers," *Surface and Coatings Technology*, 228 (2013) S578-S582.
- [128] T. Shao, C. Zhang, K. Long, D. Zhang, J. Wang, P. Yan, Y. Zhou, "Surface modification of polyimide films using unipolar nanosecond-pulse DBD in atmospheric air." *Applied Surface Science*, 256-12 (2010) 3888-3894.
- [129] N. Zouzou, K. Takashima, A. Mizuno, 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.
- [130] B. Dramane, N. Zouzou, E. Moreau G. Touchard, "Electrostatic Precipitation of Submicron Particles using a DBD in axisymmetric and planar configurations," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, 16-2 (2009) 343–351.
- [131] 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.
- [132] N. Benard, N. Zouzou, A. Claverie, J. Sotton, E. Moreau, "Optical visualization and electrical characterization of fast-rising pulsed dielectric barrier discharge for airflow control applications." *Journal of Applied Physics*, 111-3 (2012) 033303.
- [133] S.B. Kwon, H. Sakurai, T. Seto, Y.J. Kim, "Charge neutralization of submicron aerosols using surface-discharge microplasma." *Journal of aerosol science*, 37-4 (2006) 483-499, 2006.
- [134] A. Moussaoui, M. Kachi, A. Zouaghi, N. Zouzou, "Neutralization of charged dielectric materials using a dielectric barrier discharge." *Journal of Electrostatics*, 87 (2017) 102-109.
- [135] X. Wang, Q. Fan, Z. Chen, Q. Wang, J. Li, A. Hobiny, X. Wang, "Surface modification of graphene oxides by plasma techniques and their application for environmental pollution cleanup." *The Chemical Record*, 16-1 (2016) 295-318.

Bibliographie

- [136] N. Dorraki, N.N. Safa, M. Jahanfar, H. Ghomi, O.S. Ranaei-Siadat, "Surface modification of chitosan/PEO nanofibers by air dielectric barrier discharge plasma for acetylcholinesterase immobilization." *Applied Surface Science*, 349 (2015) 940-947.
- [137] R. Sharma, S. Trigwell, M. Mazumder, R. Sims, "Modification of electrostatic properties of polymer powders by atmospheric pressure plasma treatment," *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, 3 (2004) 25.
- [138] R. Sharma, S. Trigwell, M. K. Mazumder, R. A. Sims, "Modification of electrostatic properties of polymer powders by atmospheric pressure plasma treatment," in *Polymer Surface Modification: Relevance to Adhesion*, 3 (2001) 25-37.
- [139] M. Chongqi, Z. Shulin, H. Gu, "Anti-static charge character of the plasma treated polyester filter fabric," *Journal of Electrostatics*, 68-2 (2010)111-115.
- [140] Y. Murata, Y. Hara, "Enhancement of frictional charging characteristics of polymer powder by plasma treatment," *Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129)*, 2 (2000) 847-850.
- [141] A. Nadjem, « Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques », Thèse de Doctorat, Université de Guelma 2018.
- [142] 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," *The European Physical Journal Applied Physics*, 81(1) (2018) 10801.
- [143] A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, "Surface treatment of granular materials by dielectric barrier discharge in view of triboelectric charging improvement." In *Journal of Physics: Conference Series* 1322(1) (2019) 012005.
- [144] A. Mercado-Cabrera, B. Jaramillo-Sierra, R. López-Callejas, R. Valencia-Alvarado, A. de la Piedad-Beneitez, R. Peña-Eguiluz, B. Rodríguez-Méndez, "Surface modification of polypropylene fiber for hydrophilicity enhancement aided by DBD plasma." *Progress in Organic Coatings*, 76-12 (2013) 1858-1862.
- [145] C.M. Chan, T.M Ko, H. Hiraoka, "Polymer surface modification by plasmas and photons." *Surface science reports*, 24 (1996) 1-54.

Bibliographie

- [146] M. Haïdopoulos, "Étude expérimentale d'optimisation de procédés de modifications de surface de l'acier inoxydable 316 pour application aux dispositifs endovasculaires." Thèse de doctorat, Université, Université Laval, 2003.
- [147] Carrega, Marc. "Aide-mémoire - Matières plastiques," Paris : Dunod, 2011.
- [148] [Polychlorure de vinyle \(chimica-online.it\)](http://chimica-online.it)
- [149] [Polyethylene Chemistry and Molecular Structure - study.amaze1990.com](http://study.amaze1990.com)
- [150] [Polypropène \(u-helmich.de\)](http://u-helmich.de)
- [151] [Understanding Fluoropolymers \(azom.com\)](http://azom.com)
- [152] P. Cartwright, S. Singh, A.G. Bailey, L.J. Rose, Electrostatic Charging Characteristics of Polyethylene Powder During Pneumatic Conveying, *IEEE Trans. Ind. Appl.* IA-21 (1985) 541–546. doi:10.1109/TIA.1985.349702.
- [153] R. Mukherjee, V. Gupta, S. Naik, S. Sarkar, V. Sharma, P. Peri, B. Chaudhuri, Effects of particle size on the triboelectrification phenomenon in pharmaceutical excipients : Experiments and multi-scale modeling, *Asian J. Pharm. Sci.* 11 (2016) 603–617. doi:10.1016/j.ajps.2016.04.006.
- [154] K.W. Biegaj, M.G. Rowland, T.M. Lukas, J.Y.Y. Heng, Surface Chemistry and Humidity in Powder Electrostatics: A Comparative Study between Tribocharging and Corona Discharge, *ACS Omega.* 2 (2017) 1576–1582. doi:10.1021/acsomega.7b00125.
- [155] A. Borjesson, A method for measurement of triboelectric charging, in: *Electr. Overstress / Electrostatic Discharge Symp.*, 1995: pp. 1–9. doi:10.1109/EOSESD.1995.478293.
- [156] J. Chubb, Measurement of tribo and corona charging features of materials for assessment of risks from static electricity, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 36 (2000) 1515–1522. doi:10.1109/28.887201.
- [157] S. Sahli, A. Bellel, Z. Ziari, A. Kahlouche, Y. Segui, Measure and analysis of potential decay in polypropylene films after negative corona charge deposition, *J. Electrostat.* 57 (2003) 169–181. doi:10.1016/S0304-3886(02)00138-9.
- [158] P. Llovera, P. Molinié, New methodology for surface potential decay measurements: Application to study charge injection dynamics on polypropylene films, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 11 (2004) 1049–1056. doi:10.1109/TDEI.2004.1387828.
- [159] L. Herous, M. Nemamcha, M. Remadnia, L. Dascalescu, Factors that influence the surface potential decay on a thin film of polyethylene terephthalate (PET), *J. Electrostat.* 67 (2009) 198–202. doi:10.1016/j.elstat.2009.01.028.

Bibliographie

- [160] Y. Liu, Z. An, Q. Yin, F. Zheng, Y. Zhang, Q. Lei, Rapid potential decay on surface fluorinated epoxy resin samples, *J. Appl. Phys.* 113 (2013) 164105. doi:10.1063/1.4803505.
- [161] B. Neagoe, H. N. Teodorescu, Y. Prawatya, L. Dascalescu, T. Zeghloul, Experimental bench for studying the relation between the dynamic characteristics of the frictional motion and the electric potential at the surface of polymer slabs in sliding conformal contact. *Tribology International*, 111, 107-115. 2017.
- [162] B. Neagoe, Y. Prawatya, T. Zeghloul, D. Souchet, L. Dascalescu, Laboratory bench for the characterization of triboelectric properties of polymers. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 646, No. 1, p. 012058). IOP Publishing. 2015.
- [163] 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.
- [164] 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.
- [165] C. Sarra-Bournet, « Fonctionnalisation de surface de polymères par plasma à la pression atmosphérique. Amination de surface et dépôt de couches minces par un procédé de décharge par barrière diélectrique », Thèse de doctorat université de Toulouse III - Paul Sabatier pp.1 241, 2009.
- [166] A. Nadjem, M. Kachi, F. Bekkara, K. Medles, T. Zeghloul, L. Dascalescu, "Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment." *Journal of Electrostatics*, 86, 18-23. 2017.
- [167] A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu. "Effect of dielectric barrier discharge exposure on the triboelectric charging of granular plastics." In *2019 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-4). IEEE. 2019.
- [168] 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 *2017 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting* (pp. 1-4). IEEE. 2017.
- [169] G. Richard, A. Tilmatine, A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, et L. Dascalescu, "Factors that affect tribocharging of Polyethylene (PE) granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD)," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 55, no 1, p. 812 816, 2018. DOI: [10.1109/TIA.2018.2866969](https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2866969)

Bibliographie

- [170] A. Benabderrahmane, T. Zeghloul, K. Medles, A. Tilmatine, et L. Dascalescu, “*Triboelectric charging of granular polymers previously exposed to dielectric barrier discharges in atmospheric air,*” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no 3, p. 3061-3067, 2020. DOI: [10.1109/TIA.2020.2976788](https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2976788).
- [171] G. Richard, « Étude expérimentale et optimisation fonctionnelle des installations de séparation électrostatique de mélanges de matériaux granulaires », Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2018.
- [172] M. W. Williams, Triboelectric charging of insulators–Mass transfer versus electrons/ions, *Journal of Electrostatics*. 70 (2012) 233-234.
- [173] M. W. Williams, Triboelectric charging in metal–polymer contacts–How to distinguish between electron and material transfer mechanisms, *Journal of Electrostatics*. 71 (2013) 53-4.
- [174] E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, F. Simon, Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity, *Journal of Electrostatics*. 58 (2003) 3–16.
- [175] T. Nomura, T. Satoh, H. Masuda, The environment humidity effect on the tribo-charge of powder, *Powder Technology*, 43-49 (2003) 135–136.
- [176] C. H. Park, J. K. Park, H. S. Jeon, B. C. Chun, Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger, *Journal of Electrostatics*, 66 (2008) 578–583.
- [177] D. W. Howell, I. S. Aronson, G. W. Crabtree, Dynamics of electrostatically driven granular media: Effects of humidity, *Physical review E: Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 63 (2001) 050301.
- [178] L. Xie, N. Bao, Y. Jiang, J. Zhou, Effect of humidity on contact electrification due to collision between spherical particles, *AIP Advanced*, 6 (2016) 035117.
- [179] A. Diaz, R. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties, *Journal of Electrostatics*, 62 (2004) 277–290.
- [180] S. Pence, V. J. Novotny, A. F. Dia, Effect of Surface Moisture on Contact Charge of Polymers Containing Ions, *Langmuir*, 10 (1994) 592-596.
- [181] J. A. Wiles, M. Fialkowski, M. R. Radowski, G. M. Whitesidesand, B. A. Grzybowski, Effects of Surface Modification and Moisture on the Rates of Charge Transfer Between

Bibliographie

- Metals and Organic Materials, *Journal of Physical Chemistry B*, 108 (2004) 20296–20302.
- [182] O. Knoblauch, Versuche über die Berührungselektrizität, *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, 39 (1902) 225–244.
- [183] H. T. Baytekin, B. Baytekin, S. Soh, B. A. Grzybowski, The Mosaic of Surface Charge in Contact Electrification, *Angewandte Chemie International Edition*, 50 (2011) 6766–6770.
- [184] T. A. d. L. Burgo, C. A. Rezende, S. Bertazzo, A. Galembeck, F. Galembeck, Electric potential decay on polyethylene: Role of atmospheric water on electric charge build-up and dissipation, *Journal of Electrostatics*, 69 (2011) 401–409.
- [185] L.G. Britton, Static hazards using flexible intermediate bulk containers for powder handling, *Process Safety Progress*. 12 (1993) 240–250.
- [186] A. G. Bailey, Charging of solids and powders, *Journal of Electrostatics*. 30 (1993) 167–180.
- [187] H. Zhang, R. Hackam. "Electrical surface resistance, hydrophobicity and diffusion phenomena in PVC." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 6 (1999) 73-83.
- [188] Y. Huang, T. Gancheva, B.D. Favis, A. Abidli, J. Wang, C.B. Park, Hydrophobic porous polypropylene with hierarchical structures for ultrafast and highly selective oil/water separation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 13 (2021) 16859-16868.
- [189] E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, F. Simon, "Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity," *Journal of Electrostatics*, 58, (2003) 3-16,
- [190] J. Kolehmainen, P. Sippola, O. Raitanen, A. Ozel, M. Boyce, P. Saarenrinne, S. Sundaresan, "Effect of humidity on triboelectric charging in a vertically vibrated granular bed: Experiments and modeling," *Chemical Engineering Science*, 173 (2017) 363–373, doi: [10.1016/j.ces.2017.08.006](https://doi.org/10.1016/j.ces.2017.08.006).
- [191] A. Schella, S. Herminghaus, M. Schröter, "Influence of humidity on tribo-electric charging and segregation in shaken granular media," *Soft Matter*, 13, 2, 394–401, (2017) doi: [10.1039/C6SM02041K](https://doi.org/10.1039/C6SM02041K).