



HAL
open science

Modélisation expérimentale de phénomènes électrostatiques et tribologiques aux interfaces solide/solide

Marian-Bogdan Neagoe

► **To cite this version:**

Marian-Bogdan Neagoe. Modélisation expérimentale de phénomènes électrostatiques et tribologiques aux interfaces solide/solide. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Poitiers, 2017. Français. NNT : 2017POIT2294 . tel-02064651

HAL Id: tel-02064651

<https://theses.hal.science/tel-02064651>

Submitted on 12 Mar 2019

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, Energétique et
Aéronautique

Secteur de Recherche : Sciences pour l'ingénieur

Spécialité : Mécanique des solides, des matériaux, des structures et des surfaces

Présentée par :

Marian-Bogdan NEAGOE

MODELISATION EXPERIMENTALE DE PHENOMENES ELECTROSTATIQUES ET TRIBOLOGIQUES AUX INTERFACES SOLIDE/SOLIDE

Directeur de thèse : **Lucien DASCALESCU**

Co-directeur : **Dominique SOUCHET**

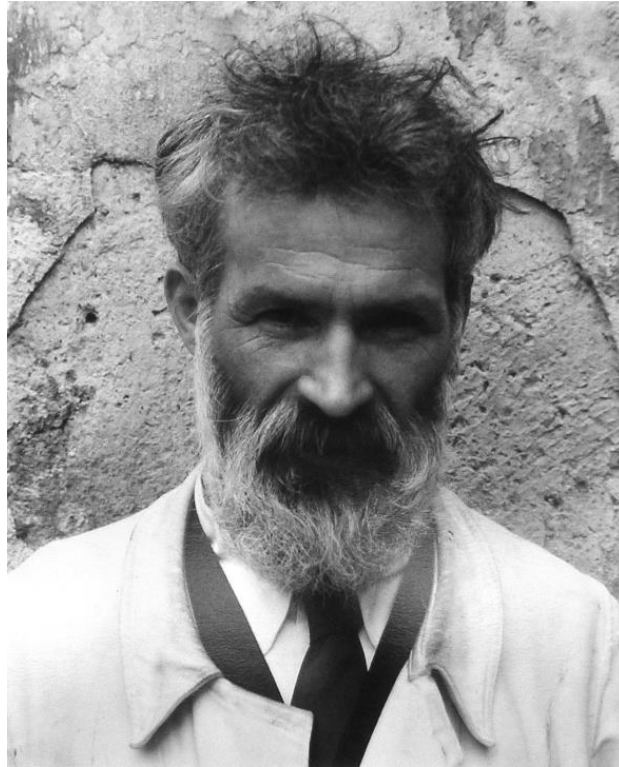
Co-encadreur de thèse : **Thami ZEGHLOUL**

Soutenue le 5 décembre 2017
devant la Commission d'Examen

JURY

M.	Benyebka BOU-SAID	PU	INSA de Lyon	Rapporteur
M.	Petru NOTINGHER	PU	Université de Montpellier	Rapporteur
M.	Sorin CANANAU	PU	Université Politehnica de Bucarest	Examinateur
Mme.	Khouira SENOUCI	MCU	Université de Sidi-Bel-Abbes	Examinateur
M.	Olivier BONNEAU	PU	Université de Poitiers	Examinateur
M.	Thierry PAILLAT	PU	Université de Poitiers	Examinateur
M.	Thami ZEGHLOUL	MCU	Université de Poitiers	Examinateur
M.	Lucien DASCALESCU	PU	Université de Poitiers	Examinateur

-A ma famille-



Constantin Brancusi

« La simplicité est la complexité résolue »

Avant-propos

Cette étude a été effectuée aux seins des deux départements « Fluide Thermique Combustion » et « Génie Mécanique et Systèmes Complexes » de l'Institut Pprime et a été soutenue financièrement par une bourse dans le cadre du programme LABEX INTERACTIFS.

Je voudrais remercier énormément mes directeurs de thèse, M. Lucian DASCALESCU, M. Thami ZEGHLOUL et M. Dominique SOUCHET pour toute leur aide. Je suis ravi d'avoir travaillé à leurs côtés car outre leur appui scientifique, ils ont toujours été là pour me soutenir, me conseiller, m'offrir leur précieux temps et la bonne humeur au cours de l'élaboration de cette thèse.

Je voudrais exprimer mes sincères reconnaissances envers M. Benyebka BOU-SAID et M. Petru NOTINGHER, pour avoir accepté de juger cette étude et avoir consacré du temps à la lecture de ce document en tant que rapporteurs de ce travail.

J'adresse mes respectueux remerciements à M. Sorin CANANAU, Mme. Khouira SENOUCI, M. Olivier BONNEAU et M. Thierry PAILLAT pour avoir accepté d'examiner la thèse.

Je tiens à remercier grandement M. Karim Medles pour les nombreux conseils et les très bons échanges d'ordre scientifique et non scientifique.

Je voudrais remercier mon collègue Yopa Eka PRAWATYA avec qui j'ai partagé les bancs d'essais, la science et des bons moments.

Je souhaiterais exprimer ma gratitude à M. Horia Nicolai TEODORESCU de l'Université Technique de Iasi 'Georghe Asachi', M. Jean- Charles LAURENTIE, de l'Université de Montpellier et M. Ahmed MELAHI, de l'Université de Béjaia pour les collaborations et discussions fructueuses.

Je tiens à remercier de manière générale les équipes de recherche de l'IUT Angoulême et du Futuroscope pour la bonne collaboration, leur aide, leurs conseils et toutes les discussions.

Mes remerciements sont envoyés également à tous les doctorants, jeunes docteurs et stagiaires, des collègues et aussi de bons amis. Merci à Sara, Gotran, Yopa, Ali, Serguei, Alex, Catalin, Jalil, Kader, Fethi, Hanane, Bhanu, Mohamed, Abdou, Arthur, Ana, Florin, Nabil, Hamza, Imed, Alin, Ahlem, Andrei, Anais, Alexandre...

Je voudrais remercier chaleureusement le personnel administratif, technique, enseignant et chercheur de l'IUT d'Angoulême pour leur disponibilité et les nombreux services.

Qu'ils soient localisés en France, en Roumanie en Algérie ou dans un autre lieu au monde je remercie tous les chercheurs avec qui j'ai eu l'occasion de collaborer ou d'avoir des discussions qui m'ont ouvert l'esprit scientifique pendant les trois ans de thèse.

En fin je remercie avec toute mon affection ma mère, mon père et mon frère pour m'avoir soutenu et aidé à poursuivre mes études. Des remerciements particuliers à ma mère qui m'a transmis la puissance et le courage pour les réussites de ma vie. Malgré mon éloignement depuis des années je trouve un soutien moral et humain toujours au sein de ma famille pour laquelle je dédie cette thèse.

Sommaire

Introduction.....	- 9 -
Chapitre I Etat de l'art	- 12 -
I-1 Processus tribologiques pour les polymères.....	- 13 -
I-1.1 Types de frottements	- 14 -
I-1.2 Adhésion et mesure d'angle de contact pour les polymères.....	- 14 -
I-2 Charge électrostatique des polymères.....	- 16 -
I-2.1 Génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères par effet triboélectrique.....	- 16 -
I-2.2 Génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères par effet couronne	- 21 -
I-3 Influence de la charge électrique sur les phénomènes tribologiques	- 25 -
I-3.1 Influence de la charge électrique sur le contact sec	- 25 -
I-3.2 Influence de la charge électrique sur le contact lubrifié.....	- 27 -
I-4 Conclusions.....	- 30 -
Chapitre II Mise en œuvre expérimentale	- 32 -
II-1 Dispositif expérimental pour la génération de la charge par effet triboélectrique	- 32 -
II-1.1 Banc expérimental.....	- 33 -
II-1.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle	- 36 -
II-1.3 Acquisition et traitement des signaux.....	- 38 -
II-2 Dispositifs expérimentaux de génération de charge électrostatique par effet couronne	- 44 -
II-2.1 Banc expérimental.....	- 44 -
II-2.2 Présence d'un lubrifiant sur une surface chargé par effet couronne	- 45 -
II-3 Instrumentation additionnelle	- 47 -
II-3.1 Dispositif expérimental pour la mesure de la température de surface.....	- 47 -
II-3.2 Instrumentation pour la métrologie de surface.....	- 48 -
II-3.3 Instrumentation pour la neutralisation de la charge résiduelle.....	- 48 -
II-3.4 Spectrométrie FTIR.....	- 49 -
II-4 Caractérisation et préparation des éprouvettes et des échantillons.....	- 50 -
II-4.1 Matériaux polymères	- 50 -
II-4.2 Préparation des éprouvettes.....	- 55 -
II-4.3 Lubrifiants.....	- 56 -
II-5 Conclusions.....	- 58 -
Chapitre III Caractérisation de l'état de charge électrique des plaques polymères	- 59 -
III-1 Dispositifs de mesure	- 60 -
III-1.1 Dispositifs de mesure de la charge électrique totale	- 60 -

III-1.2	Dispositifs de mesure du potentiel électrique de surface.....	- 61 -
III-2	Mesure du potentiel électrique de surface.....	- 65 -
III-2.1	Mesure du potentiel électrique à la surface des conducteurs.....	- 66 -
III-2.2	Détermination du potentiel électrique réel en fonction du potentiel mesuré.....	- 70 -
III-2.3	Validation des calculs	- 71 -
III-3	Mesure de la densité surfacique de charge électrique	- 73 -
III-3.1	Relation entre le potentiel électrique mesuré et la densité surfacique de charge électrique.....	- 73 -
III-3.2	Exemples de mesure de densité surfacique de charge électrique.....	- 76 -
III-4	Conclusions.....	- 77 -
Chapitre IV	Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation	- 78 -
IV-1	Caractérisation de l'état de charge des éprouvettes	- 79 -
IV-1.1	Mesure du potentiel électrique de surface.....	- 79 -
IV-1.2	Mesure de charge globale	- 81 -
IV-2	Comparaison entre les charges générées par effet triboélectrique et par effet couronne -	82
IV-3	Influence de quelques facteurs sur la génération de la charge par effet triboélectrique -	89 -
IV-3.1	Saturation de la charge. Influence de l'usure de la surface et du temps de frottement .-	89 -
IV-3.2	Influence de la rugosité	- 91 -
IV-3.3	Influence de la force normale de contact et de la vitesse de glissement	- 96 -
IV-4	Corrélation entre la charge électrique et la température produite par frottement.....	- 98 -
IV-5	Effet de la charge électrique sur le frottement sec.....	- 103 -
IV-5.1	Effet de la charge électrique générée par effet triboélectrique sur le frottement sec....-	103 -
IV-5.2	Effet de la charge électrique générée par effet couronne sur le frottement sec ...-	105 -
IV-6	Conclusions.....	- 107 -
Chapitre V	Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide	- 108 -
V-1	Effet de la charge électrique sur l'angle de contact.....	- 108 -
V-2	Influence de la charge électrique sur le contact glissant lubrifié.....	- 113 -
V-3	Conclusions.....	- 118 -
Conclusions et Perspectives	- 119 -
TABLE DES FIGURES	- 122 -
Bibliographie.....	- 127 -

Introduction

Lorsque nous examinons les évolutions de la technologie, de l'ingénierie et du savoir-faire, elles sont souvent associées aux progrès des techniques expérimentales, ainsi qu'au dynamisme de la recherche dans différents domaines. Les développements liés aux polymères sont en constante progression. Leurs choix comme composants glissants ou roulants de divers mécanismes se justifient grâce à leurs bonnes propriétés mécaniques et leurs caractéristiques autolubrifiantes. De nombreuses études visent une meilleure compréhension et utilisation des polymères, cependant l'effet triboélectrique généré par le glissement ou le roulement entre les organes n'est que rarement pris en considération [1–7].

Les polymères sont des matériaux bons isolants électriques qui peuvent générer une charge électrique par frottement et la garder un certain temps. Dans la plus part des cas l'effet de la charge électrique est ignoré, il est toutefois non négligeable puisque il peut être à l'origine d'accidents dans des milieux inflammables à cause des arcs électriques [8]. D'autre part, les forces générées par les charges électriques atteignent des valeurs suffisantes qui permettent la séparation électrostatique des polymères des déchets granulaires [9,10]. Comprendre et quantifier la charge générée par effet triboélectrique qui se produit au contact entre polymères est donc crucial pour une conception appropriée des différents équipements [1,11,12].

Le projet LABEX INTERACTIFS, programme de recherche pluridisciplinaire combinant les domaines mécanique, matériaux et énergétique, a comme objectif la maîtrise des phénomènes physiques aux interfaces fluides - solides. Les couplages entre phénomènes mécaniques, thermiques, électrostatiques et fluidiques aux interfaces [13–19] sont abordés dans une approche multi-physique et multi-échelles, bâtie sur l'expertise de l'Institut PPRIME dans la physique et la mécanique des surfaces, en électro-fluido-dynamique, ainsi que dans le domaine des transferts thermiques et massiques en milieux fluides et solides (figure 1).

Ces phénomènes complexes nécessitent l'analyse des interactions spécifiques jusqu'aux échelles les plus fines des mécanismes physiques élémentaires. Peu de travaux sont consacrés aux couplages solide-solide et solide-fluide aux interfaces puisqu'ils exigent la collaboration de communautés scientifiques diversifiées.

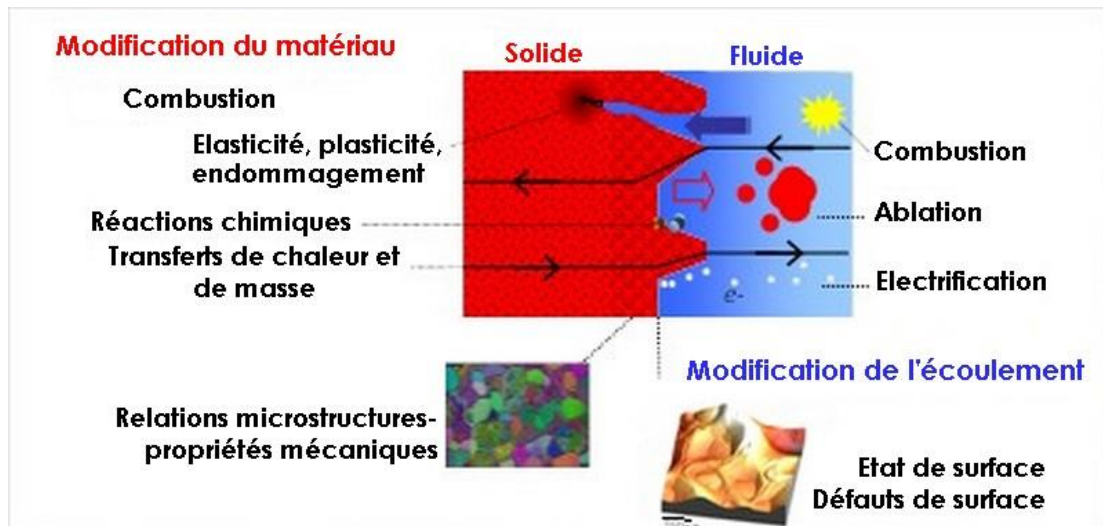


Figure 1. Différents phénomènes identifiés à l'interface solide-liquide [20].

L'une des actions du programme LABEX vise l'élaboration d'un modèle multi-physique capable de refléter d'une façon cohérente les propriétés et les phénomènes mécaniques (élastiques, tribologiques), thermiques, électrostatiques, fluïdo-dynamiques des contacts entre des solides, dans des milieux liquides ou gazeux. Cette action s'appuie sur les compétences des chercheurs de l'Institut PPRIME travaillant sur le site de l'IUT d'Angoulême dans le domaine de la mécanique des contacts lubrifiés ou non, ainsi que dans la modélisation expérimentale des phénomènes électro-fluïdo-dynamiques. Elle devrait apporter des réponses à deux questions fondamentales : (1) quel est le comportement des couches de liquide très minces (micro-, voir nanométriques), en présence de contraintes mécaniques, thermiques et électriques sévères ? (2) dans quelle mesure l'état des surfaces (textures, défauts de structure, traitements physiques et chimiques) modifie les phénomènes électriques à l'interface (formation de la double couche électrique, génération de charge par effet tribo-électrique) ?

Dans ce contexte, le but de cette thèse est d'explorer la possibilité d'utilisation de la charge électrostatique pour améliorer les conditions de glissement entre matériaux polymères. Le champ d'investigation est centré sur deux configurations : le contact glissant sec et le contact glissant lubrifié. L'étude s'est déroulée en trois phases : (1) mise au point des dispositifs expérimentaux pour la génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères et mesures du potentiel électrique et de la charge des éprouvettes; (2) caractérisation de l'état de charge et de son influence dans le frottement sec entre polymères; (3) influence d'une surface électriquement chargée sur l'angle de contact entre un liquide et la surface d'un polymère, ainsi que sur le frottement lubrifié.

Le mémoire de thèse est organisé autour de cinq chapitres. Pour mieux décrire l'état actuel de la recherche dans le domaine de la triboélectricité, le premier chapitre est une synthèse bibliographique sur l'état de l'art. Aussi, évoquerons-nous les principales études liées à la triboélectricité, à la génération de la charge sur la surface de polymères et à l'influence de la charge électrique sur le comportement des contacts glissants secs et lubrifiés.

Le deuxième chapitre apporte les informations essentielles concernant la composition des bancs expérimentaux, l'instrumentation et les procédures établies pour mener à bien les campagnes d'essais. Il contient aussi la description et la caractérisation des éprouvettes utilisées.

La mise au point des protocoles expérimentaux et des techniques pour la caractérisation de la charge électrique fait l'objet du troisième chapitre. L'étude du mode de fonctionnement de la sonde de mesure du voltmètre électrostatique utilisé pour la mesure du potentiel électrique de surface est décrite ; elle est précieuse pour l'interprétation des mesures. La technique de conversion du potentiel de surface en densité de charge de surface est exposée et appliquée aux polymères utilisés dans cette étude.

Le quatrième chapitre est entièrement dédié à l'étude de la caractérisation et de l'influence de la charge électrique générée dans un contact glissant sec entre polymères. L'étude porte également sur la comparaison de la charge générée par effet triboélectrique avec la charge déposée par effet couronne. L'influence de différents paramètres sur le niveau de charge, la corrélation entre la charge électrique et la température produite par dissipation énergétique lors du glissement avec frottement et l'influence de la charge sur le glissement sec sont examinées.

Le cinquième chapitre est consacré à l'étude de l'influence que peuvent avoir des surfaces chargées électriquement sur les liquides. Deux études sont conduites. La première concerne la modification de l'angle de contact de gouttes de différents liquides déposées sur une surface chargée. La seconde étude traite de l'influence d'une surface chargée dans un contact glissant lubrifié.

L'association de cet ensemble de dispositifs et procédures nous a aidés à mieux comprendre les phénomènes triboélectriques et l'influence de la charge électrique sur les contacts glissants secs où lubrifiés.

Chapitre I Etat de l'art

Né le 14 juin 1736 à Angoulême (France), Charles-Augustin Coulomb est un des pionniers dans les domaines de la tribologie et de l'électrostatique. Son travail a apporté une grande contribution pour la science dans ces deux domaines.

Coulomb a apporté une contribution exceptionnelle, pertinente et toujours d'actualité à l'examen du frottement sec. Il a établi une loi de frottement qui porte son nom, la loi de frottement de Coulomb. Coulomb a confirmé les résultats d'Amontons et établit que le frottement de glissement est indépendant de la vitesse de glissement dans une première approximation. Il a mené des expériences quantitatives très précises pour le frottement sec entre des corps solides en relation avec le type de matériaux, les états de surface, la lubrification, la vitesse de glissement, la durée de repos pour le frottement statique, l'humidité et la température. Ce n'est que depuis la parution de son livre « Théorie des Machines simples » (1781), qu'une différenciation entre frottement statique et frottement dynamique a pu être quantifiée et établie. Coulomb a utilisé la même idée d'origine du frottement d'Euler, mais a ajouté une autre contribution au frottement que nous appellerions aujourd'hui la contribution de l'adhérence. C'est également Coulomb qui a établi les écarts par rapport à la simple loi connue de frottement. Il a découvert, par exemple, que la force statique augmente avec le temps pendant lequel l'objet est resté stationnaire. Son livre contenait pratiquement tout ce qui allait devenir les fondements de la tribologie. Le nom même de l'instrument d'étude du frottement, le tribomètre vient de Coulomb [21].

Entre 1785 et 1787 Coulomb a effectué une série d'expériences portant sur les charges électriques et parvint à établir ce qui est aujourd'hui connu comme Loi de Coulomb en électrostatique. Selon cette loi basée principalement sur l'observation, les charges s'attirent si elles ont des polarités opposées et se repoussent si elles ont la même polarité. La force générée entre les charges est proportionnelle à la charge. Une autre remarque est que la force diminue de façon quadratique avec l'augmentation de la distance entre les charges. La force se manifeste le long de la ligne qui passe par les centres des charges. La loi de Coulomb a la même forme mathématique que la loi de gravité de Newton. Il a mis à jour cette nouvelle notion par l'introduction de la constante diélectrique pour que le rapport du produit de deux charges électriques à la permittivité du vide soit une unité de mécanique.

Dans ce contexte, cette étude bibliographique est centrée sur les interactions des phénomènes tribologiques et électrostatiques. Cette étude concernera les propriétés tribologiques et électrostatiques des polymères et se divisera en trois parties. La première partie définira les polymères, les procédés et méthodes de caractérisation tribologique. La deuxième partie présentera les matériaux polymères et leurs propriétés électrostatiques ainsi que les techniques de génération de la charge électrique par effet couronne et effet tribologique. La troisième partie fera une synthèse des travaux réalisés sur la triboélectrification et sur l'effet de la charge électrique sur le frottement sec ou lubrifié.

I-1 Processus tribologiques pour les polymères

Il s'avère que les matériaux solides peuvent être classés selon trois types de base: métaux, céramiques et polymères. En plus de ces types de base, il y a aussi deux groupes qui peuvent être considérés comme des sous-ensembles ou des combinaisons de ces types: matériaux composites et semi-conducteurs. Les polymères objets de cette étude sont organisés sur plusieurs niveaux structuraux. À l'échelle des atomes, ces derniers sont arrangés dans des unités de monomères en liaisons covalentes. Les unités de monomères sont alors connectées selon de longues structures semblables à des chaînes. Les macromolécules différentes, appelées aussi chaînes de molécules, peuvent être arrangées dans une structure de réseau par des enchevêtrements qui interagissent par de faibles forces de Van der Waals. Les atomes de la base polymère sont tenus par des liaisons covalentes qui partagent des électrons entre les atomes aboutissant à de très forts liens avec très peu de mobilité électronique. Les polymères sont généralement de mauvais conducteurs de chaleur et d'électricité. Les liens faibles entre les molécules créent des propriétés mécaniques très intéressantes caractérisées par une faible rigidité et une ductilité élevée. [22]

Récemment l'utilisation des polymères a significativement augmenté dans plusieurs technologies et également comme matériaux pour des composants en frottement dans divers machines et dispositifs. Ceci est en particulier lié au faible coût des matériaux et à la fabrication en grandes séries des composants. Les polymères utilisés dans les contacts tribologiques n'ont pas souvent de lubrification [1–7]. Le coefficient de frottement peut être semblable aux contacts métalliques ou en céramique lubrifiées. Les polymères présentent une énergie libre de surface très faible et possèdent également les propriétés viscoélastiques. Bien qu'ils présentent tous ces avantages, les caractéristiques tribologiques ne sont pas complétement maîtrisées.

I-1.1 Types de frottements

La définition technique du frottement est la résistance au mouvement relatif des corps en contact. Les types de frottements rencontrés couramment sont secs, lubrifiés, mixtes ou limites. L'amplitude du frottement est habituellement exprimée par un coefficient de frottement μ , qui est le rapport de la force F_T nécessaire pour initier ou maintenir un mouvement tangentiel et de la force normale F_N qui plaque les deux surfaces en contact.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (\text{I.1})$$

Dans les premières études technologiques, la valeur de F_T / F_N a été considérée constante pour chaque paire de matériaux. Aujourd'hui, μ est considéré largement variable, en fonction des variables opérationnelles, des lubrifiants, des propriétés du substrat et des films de surface.

Il y a deux composantes principales du frottement sec à savoir l'adhérence et la déformation [23]. Cette idée est fondamentale dans le modèle de frottement à deux termes, bien que l'indépendance de ces composantes ne soit qu'une question de convention. Une telle approche est correcte pour tous les matériaux, y compris les polymères. Le comportement des polymères a des caractéristiques particulières dont certaines sont décrites par Briscoe [24]. Le concept se compose de trois éléments de base impliqués dans le frottement : l'adhésion, les liaisons interfaciales, leur type et leur résistance au cisaillement et la rupture des matériaux en frottement à l'intérieur et autour de la région de contact; la zone de contact réelle et les déformations [4,25]. Dans la suite, nous nous intéresserons à ces composantes et aux méthodes pour les déterminer.

I-1.2 Adhésion et mesure d'angle de contact pour les polymères.

Si les matériaux en contact ont des structures de bandes d'électrons différentes, il peut y avoir un déplacement ou même un flux de charge à l'interface, conduisant à la formation d'une double couche de charges électriques [23]. Quelques expériences très intéressantes de Kruppl et Derjaguin et al [26,27] sur le contact entre les particules polymères et certains matériaux semi-conducteurs montrent l'influence de cette double couche électrique sur la force d'adhésion. Une autre source d'adhésion moléculaire dans le cas des polymères est représentée par les forces de van der Waals. Ces forces d'adhésion sont réalisées grâce à l'attraction des dipôles générés par la présence d'atomes polaires.

Le mécanisme de liaison moléculaire n'est pas encore entièrement compris et il y a eu beaucoup de théories proposées pour l'expliquer. Mutsuda et Komada ont étudié la liaison poly (oxy-2,6-diméthyl-1,4-phénylène) (PPE) au caoutchouc et ont montré que le mécanisme d'adhésion était basé sur une réaction d'extraction d'hydrogène. Cela se produit lorsque la séparation entre deux substrats polymères devient négligeable, permettant aux radicaux produits en surface d'un substrat d'attaquer les autres, entraînant la formation de plus de radicaux. La recombinaison de ces radicaux avec le polymère permet une liaison chimique entre les substrats. D'autres observations ont confirmé cette hypothèse et montré que la liaison interfaciale est un facteur crucial de la force d'adhésion entre les silanes et les métaux [28,29].

Deux autres mécanismes peuvent expliquer les phénomènes d'adhésion: les liaisons mécaniques et les effets thermodynamiques [29].

Un important corpus de recherches a été rapporté en considérant le modèle d'adsorption thermodynamique de l'adhésion. Les auteurs soutiennent que les autres mécanismes discutés ci-dessus n'ont que peu d'impact. L'avantage du mécanisme thermodynamique par rapport aux autres mécanismes est qu'il ne nécessite pas d'interactions moléculaires pour une bonne adhésion, mais seulement un processus d'équilibre à l'interface. Dans les environnements neutres tels que l'air, le système thermodynamique du polymère tentera de minimiser l'énergie libre de surface en orientant la surface vers la région non polaire du polymère. Lorsque la surface du polymère est en contact avec une substance polaire telle que l'eau une bonne adhérence nécessite que la tension interraciale soit minimisée. Young considère que la force d'adhésion pour un système simple comme celui représenté sur la figure I-1 peut être estimée par le travail d'adhésion W_a (équation I.2) [29].

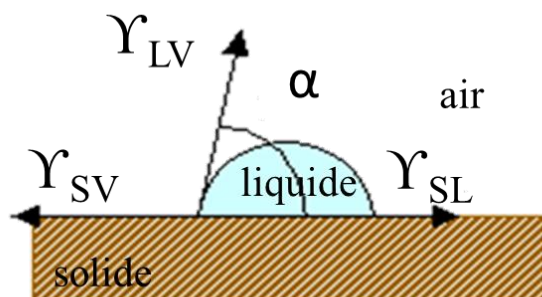


Figure I-1. Goutte sur une surface indiquant l'angle de contact et les tensions de surface pour les trois milieux (solide, liquide et air) [29].

$$W_a = \gamma_{LV} + \gamma_{SV} - \gamma_{SL} \quad (I.2)$$

Il montre qu'il y a une relation directe entre la tension superficielle aux interfaces solide / vapeur, solide / liquide et liquide / vapeur (γ_{SV} , γ_{SL} , γ_{LV})

$$\cos \alpha = \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LV}} \quad (I.3)$$

L'équation I.3 peut être utilisée pour montrer une modification sur une de tension de système. Cette équation a eu plusieurs évolutions pendant des années pour prendre en compte différents phénomènes.

I-2 Charge électrostatique des polymères

Les domaines d'application de l'électrostatique incluent la photocopie [30], la peinture électrostatique [31,32], l'électro-filage [33], la séparation des mélanges de particules [34], la filtration électrostatique [35–37]. Ainsi, la séparation électrostatique des résidus plastiques après avoir été chargés par effet triboélectrique est une technologie de plus en plus utilisée dans le recyclage des polymères. Cependant, malgré une longue histoire, qui démarre au VI^{ème} siècle avant Jésus Christ par les expériences de Thalès de Milet, l'électrostatique reste une discipline scientifique qui continue à se développer, car des nombreux problèmes n'ont pas encore été résolus et la littérature est pleine de rapports pas toujours concordants. Par exemple, Schein a recueilli trois résultats contradictoires sur la charge acquise par le téflon frotté avec de l'or [30]. De nombreux autres controverses scientifiques existent dans ce domaine [38]. Ces questions concernant la nature des charges électriques dans les isolants ainsi que les mécanismes de leur production par effet triboélectrique restent ouvertes. Cependant, les concepts électrostatiques fondamentaux sont bien établis pour les semi-conducteurs et les métaux. Lorsque deux métaux caractérisés par des travaux de sortie différentes sont mis en contact, les électrons migrent à travers l'interface, en créant une différence de potentiel entre eux. Le dépôt de charge par effet couronne est également mieux maîtrisé.

I-2.1 Génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères par effet triboélectrique

Lorsque deux isolants différents sont mis en contact, un transfert de charges électriques se produit. L'électrification par contact des polymères est un phénomène complexe. Elle dépend essentiellement de la nature chimique des surfaces [39] en contact et du type de frottement.

L'échange de charge entre deux surfaces métalliques est proportionnelle à la différence entre les travaux de sortie efficace des deux matériaux [40–42]. Plusieurs travaux montrent que pour tous les matériaux, la charge transférée est dépendante de l'énergie mécanique générée à l'interface [42,43]. Selon Shaw et Hanstock [44,45] les propriétés triboélectriques d'une surface pourraient être influencées par son état de contrainte. Ainsi, pour Shaw le frottement asymétrique entraînerait une contrainte des deux surfaces en contact, de sorte qu'elles se chargent avec des polarités différentes. Le transfert de charge change graduellement si le frottement continue sur une longue période. L'hypothèse de Saw a été confirmée par Lowell et Truscott [46,47].

Les recherches concernant l'électrification du contact visent en premier lieu l'acquisition de connaissances sur les mécanismes de charge électrostatique. Elles doivent être conduites pour des surfaces bien définies, dans des atmosphères contrôlées et en s'assurant de la reproductibilité des conditions de contact [48–50]. Il convient cependant de noter que dans les applications industrielles, les surfaces ne sont ni propres ni toujours bien définies. Les contacts sont rarement bien caractérisés pour l'étude et la compréhension de la physique de base [51].

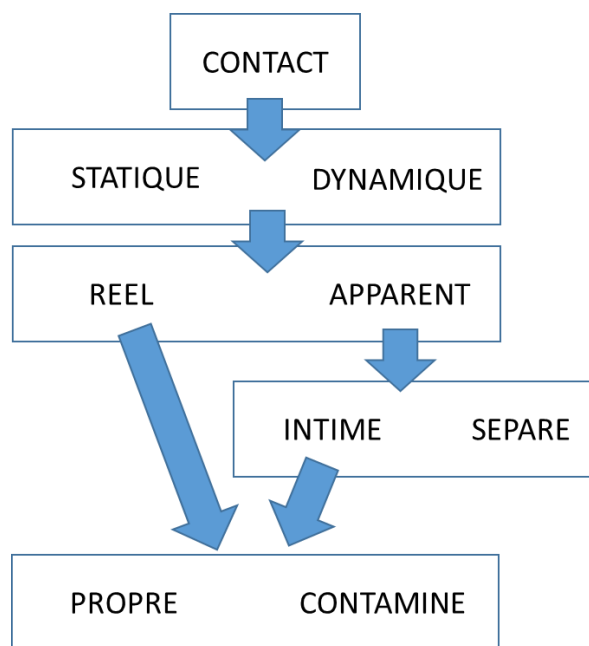


Figure I-2. Nature des évènements de contact

Malgré les nombreuses recherches sur la compréhension du mécanisme d'électrification par contact, il y a peu de consensus sur la façon dont la charge électrostatique est transférée d'un matériau à un autre pendant le contact. Lowell et Rose-Innes [41] expliquent qu'il y a des preuves expérimentales suggérant que la charge transférée entre deux isolants est provoquée par le même mécanisme de

base que la charge entre isolant-métal. Le transfert de charge a été attribué à trois mécanismes différents [40,51,52].

- Transfert de charge dû aux électrons
- Transfert de charge dû aux ions
- Transfert de charge dû au transfert de matière

L'électrification par contact entre métal-métal s'est révélée être due au transfert d'électrons [40]. La nature du porteur de charge pour les polymères n'est pas totalement claire. Certains chercheurs ont supposé que le transfert de charge entre les polymères implique le transfert d'électrons. Liu et Bard [53] ont proposé le mécanisme de transfert d'électrons, validé par des expériences sur la charge du téflon. Davies [54,55] et après Fuhrmann [56,57] ont montré qu'il existe une relation linéaire entre la charge et la travail de sortie du métal. Ceci implique que les électrons sont les principales espèces transférées lors de l'électrification par contact. Cependant, Akande et Lowell [58] ont constaté que la charge transférée est indépendante de la travail de sortie du métal pour certains polymères. Par ailleurs, les travaux de sortie des polymères mesurés par différents chercheurs ne sont pas les mêmes. Harper[59] a passé aussi en revue les divers mécanismes de charge. Selon lui, la charge de contact des isolants implique des ions et non des électrons. Récemment, Whitesides et McCarthy [53] ont apporté des preuves que le transfert de charge dans les polymères est possible et qu'il est dû au déplacement d'ions.

Il n'y a aucun doute que le contact de deux corps peut entraîner le transfert de matière de l'un à l'autre; non seulement des particules de poussière, mais aussi des morceaux réels des deux corps. Castle [40] a précisé que, même si le transfert de matière entre les deux corps n'est pas le principal mécanisme de charge, ce phénomène peut se produire. Le transfert de matière entre les surfaces des corps en contact explique la double polarité de charge électrostatique qui coexiste sur la même surface [60]. La figure I-3 montre les mécanismes de charge électrostatique pour des contacts entre isolants.

La difficulté de trouver le mécanisme dominant de transfert de la charge entre isolants de même que la superposition de mécanismes de charge rend difficile la formulation d'un modèle expliquant complètement la génération de charge entre isolants.

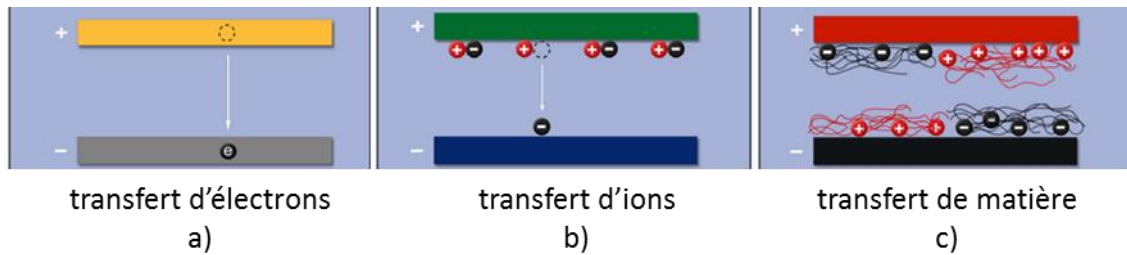


Figure I-3. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ;
b) Transfert d'ions ; c) Transfert de matière. [60]

Le niveau de charge électrostatique est influencé par différents facteurs. Il a été établi que l'humidité et la température ambiantes réduisaient le niveau de charge électrostatique générée [50,61]. La force normale à la surface de contact et le temps de glissement entre les deux corps augmentent le niveau de charge [12,62–65]. La vitesse ne semble pas avoir un effet important dans l'évolution du niveau de la charge électrostatique [12,65–67]. En fonction de la nature des matériaux mis en contact, la polarité et le niveau de charge peuvent varier [11]. Une série triboélectrique est la classification des matériaux en rapport avec leur tendance à se charger plus ou moins positivement ou négativement en contact avec d'autres. Plusieurs chercheurs ont proposé des séries triboélectriques. Diaz [11], montre que la position de certains isolants peut varier d'une série triboélectrique à l'autre, en fonction du type d'expérience choisie pour générer la charge (contact statique ou contact glissant). Une série tribologique récente réalisé par Bill Lee [68] est donnée dans le Tableau I.1.

Tableau I-1 : Série triboélectrique établie par Bill Lee en 2009 [9,68].

Nom d'isolant	Rapport de la charge [nC/J]	Charge acquise si frotté avec du métal (F : faible, N : normal)	Remarques
Polyuréthane solide	+40	+N	Un peu conducteur
Nylatron (nylon + MoS ₂)	+28	+N	/
Verre	+25	+N	Un peu conducteur
Papier	+10	-F	Un peu conducteur
Bois (pin)	+7	-F	/
Silicone	+6	+N	/
Coton	+5	+N	Légèrement conducteur
Caoutchouc nitrile	+3	-F	/
Laine	0	-F	/
Polycarbonate	-5	-F	/
ABS	-5	-N	/
Acrylique (Poly méthacrylate de méthyle)	-10	-N	/
Époxy (circuit imprimé)	-32	-N	/
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35	-N	/
PET (mylar) solide	-40	+F	/
Polystyrène	-70	-N	/
Polyamide	-70	-N	/
Silicone	-72	-N	/
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90	-N	/
PVC (vinyle rigide)	-100	-N	/
Latex (naturel) en caoutchouc	-105	-N	/
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140	-N	Un peu conducteur
Téflon	-190	-N	Très électronégatif

I-2.2 Génération de la charge électrostatique sur la surface de polymères par effet couronne

L'effet couronne est une décharge électrique provoquée par l'ionisation d'un fluide, généralement de l'air, autour d'un conducteur à faible rayon de courbure porté à un potentiel électrique élevé. Des systèmes ont été conçus pour diriger et contrôler le niveau de charge générée. Le système d'électrodes montré sur la figure I-4 est le plus utilisé pour la charge des médias fibreux. Il sera également utilisé dans ce travail.

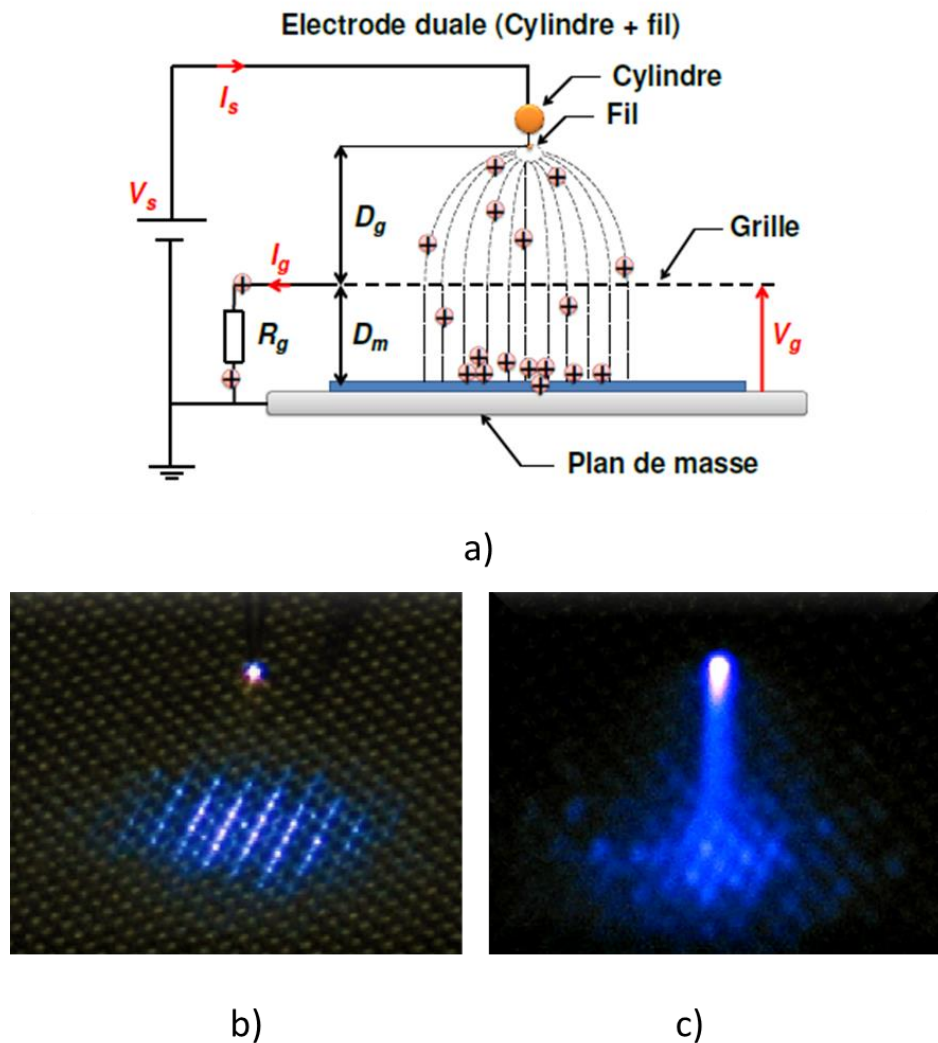


Figure I-4 : a) Système triode de génération de charge électrostatique par effet couronne b) Polarité négative c) Polarité positive.

Plusieurs types de configurations d'électrodes capables de produire la décharge couronne sont décrites dans la littérature: pointe – plan, peigne – plan ; fil – plan ; fil– cylindre [69–72]. La décharge couronne trouve de nombreuses applications dans l'industrie, dans la médecine et dans la vie quotidienne. Ainsi, elle est utilisée dans les précipitateurs électrostatiques [42], dans les

séparateurs électrostatiques des matériaux granulaires [73], dans les équipements d'électro-photographie et d'impression électro-graphique [74], dans les générateurs d'ozone pour le traitement de l'eau et le contrôle des odeurs [75], dans les dispositifs de chargement par effet couronne des matériaux non-tissés utilisés comme des médias filtrants [76], etc. Dans ce travail, la décharge couronne sera utilisée pour le chargement des polymères plaques en vue des études sur l'effet de la charge électrostatique sur les conditions de frottement.

Le mode de fonctionnement du système d'électrodes de type « triode », qui sera utilisé dans cette étude, a déjà été bien caractérisé par Tabti (2011) [72] et Fatihou (2016) [76] (figure I-4, a). Pendant la décharge une partie des ions produits par l'électrode portée à la haute tension est attirée vers l'électrode plane liée à la terre et traverse les interstices de la grille. L'autre partie des ions rejoignent la terre en passant par la résistance de la grille R_g . Le produit entre la résistance et le courant I_g capté par la grille impose une différence de potentiel V_g entre la grille et le plan de masse métallique. L'intensité du champ électrique créé entre la grille et le plan de masse est contrôlée par ce potentiel. Au début du processus, la grille se trouve au potentiel 0 V, c'est-à-dire une différence de potentiel $V_g = 0$ V. La charge qui s'accumule dans le temps sur la surface de l'éprouvette a comme effet l'annulation du champ électrique entre la grille et le plan de masse, ce qui arrête le processus de chargement. Cette configuration d'électrodes a le rôle d'orienter les lignes du champ électrique du fil vers le plan de masse. La géométrie définit l'espace de dépôt de charge en tenant compte de deux distances, D_g (la distance entre le fil et la grille) et D_m (la distance entre la grille et le plan de masse). Les deux distances permettront d'uniformiser l'état de la charge électrique déposée sur la surface des échantillons.

La décharge couronne peut être positive ou négative selon la polarité d'alimentation de l'électrode. La physique de ces deux types de décharges couronnes est radicalement différente. A une valeur absolue donnée de la tension appliquée, la décharge couronne négative produit beaucoup plus de courant qu'une décharge couronne positive ; par contre le claquage intervient à des tensions plus faibles en polarité positive qu'en polarité négative [77]. Un phénomène de décharges inverses est observé dans le cas des matériaux fibreux, matériaux à haute résistivité volumique (figure I-4 b et c.) Les deux polarités favorisent la formation de porteurs de charge différents.

La formation de charge au tour du fil ou de la zone pointue est influencée par plusieurs facteurs physico-chimiques. Une température plus élevée diminue la rigidité diélectrique de l'air, ce qui favorise la décharge couronne [78]. L'humidité a une influence très importante sur la quantité

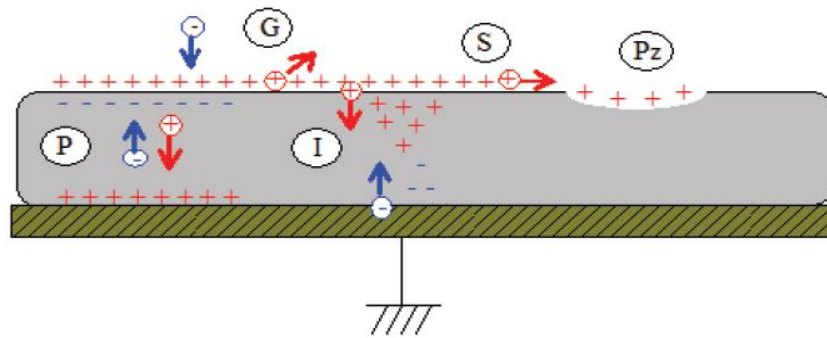
des espèces d'ions produits [79]. L'effet de la pression est proportionnel à la tension d'amorçage et inversement proportionnel au courant [78].

Reguig (2017) [80] résume très bien la formation des ions dans les décharges couronne positives et négatives. Ainsi, les types d'espèces générés par la décharge couronne dépendent de la composition du gaz présent au voisinage de la pointe. Dans l'air atmosphérique, une décharge couronne positive est dominée par les ions hydratés $(H_2O)_nH^+$ où n est un nombre entier qui augmente avec l'humidité relative. Pour une humidité basse, les ions dominants sont $(H_2O)_nNO^+$ et $(HO)_n(NO_2)^+$. Pour la décharge couronne négative dans l'air, les ions les plus importants sont des CO_3^- . Pour une humidité relative de 50%, environ 10% d'ions sont hydratés, $(H_2O)_nCO_3^-$ [81]. Les autres types d'ions qui peuvent être générés sont [79,82]:

- Couronne positive: CO^+ , C^+ , C_2O^+ , $C_3O_2^+$, CO_2^+ , H_3O^+ , CHO^+ , CHO_2^+
- Couronne négative: O^- , O_2^- , O_3^- , CO_3^- , CO_4^- , H^- , OH^- .

I-1.1. Déclin de la charge et du potentiel de surface

Une densité de charge déposée à la surface d'un isolant crée un potentiel électrique local. Au cours du temps, la valeur de ce potentiel diminue. Les porteurs de charge sont éliminés par plusieurs mécanismes (figure I-5).



- P** : polarisation interne (incluant la conductivité intrinsèque)
I : injection de charge
G : neutralisation par le gaz
S : conduction de surface
Pz : phénomènes piézoélectriques

Figure I-5. Différents mécanismes possibles pour expliquer le déclin de potentiel. [83]

Le champ électrique généré par les charges déposées en surface crée un phénomène de polarisation dipolaire où les dipôles déjà existants s'orientent de telle manière à compenser la charge surfacique. [84]. La conduction surfacique intervient aussi dans le déclin de charge. Ce phénomène se manifeste en particulier dans le cas des polymères épais vieillis [84]. Les films minces ou certains types de cristaux peuvent présenter aussi des phénomènes piézoélectriques qui ont un effet sur l'évolution temporelle de la charge de surface. Les porteurs de charge libres provenant de l'atmosphère peuvent neutraliser la charge à la surface de isolants. Ils peuvent aussi traverser l'interface et pénétrer dans le volume, par un phénomène d'injection [85]. Tous ces mécanismes peuvent agir simultanément, et générer le déclin de charge. Les mécanismes prédominants sont la conduction de surface, la conduction de volume et le phénomène de polarisation [80]. Des modèles de déclin de potentiel ont été développés dans la littérature pour décrire le déclin de la charge surfacique. Le premier modèle est celui de Ieda et al (1969) [86], mettant en lumière le phénomène de 'crossover' dans le cas de la surface chargée d'un film en polyéthylène. Tabti (2011) [72] montre le même phénomène pour les textiles non tissés de polypropylène. Le potentiel de surface des isolants chargés à une densité de charge élevée diminue plus vite que celui des surfaces moins chargées.

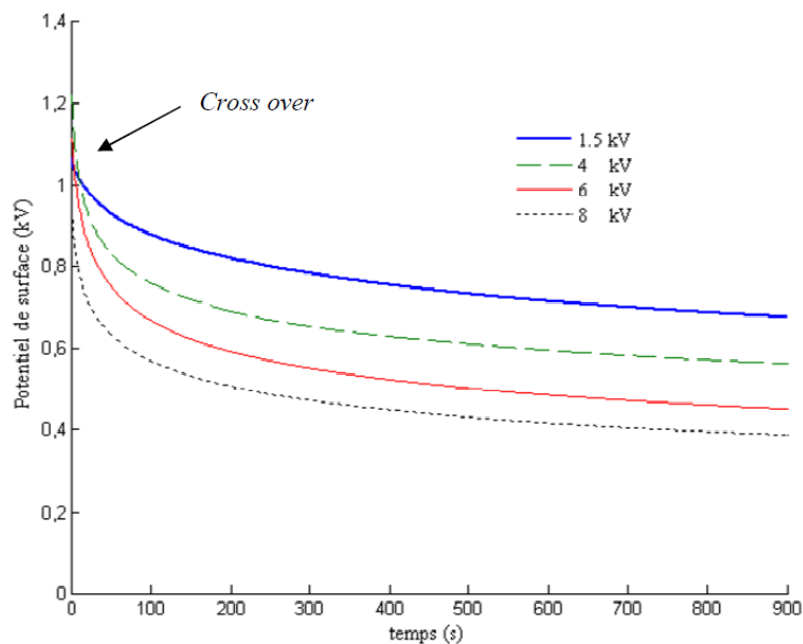


Figure I-6. Courbes de déclin de potentiel surfacique en fonction du potentiel de la grille V_g supérieur ou égal à 1,5kV en polarité positive ($1,5 \text{ kV} \leq V_g \leq 8 \text{ kV}$). [72].

I-3 Influence de la charge électrique sur les phénomènes tribologiques

Les phénomènes triboélectriques présentent encore un défi intellectuel redoutable, malgré le développement d'instruments sophistiqués qui permettent de visualiser la structure des matériaux au niveau atomique. De nombreux mystères subsistent, dont certains devraient être résolus au 21ème siècle [7,12,40,87].

L'influence des charges électriques sur les conditions de frottement sec ou lubrifié n'est généralement pas prise en compte [88]. Ce paragraphe sera destiné à présenter quelques travaux de recherche en rapport avec ce sujet.

I-3.1 Influence de la charge électrique sur le contact sec

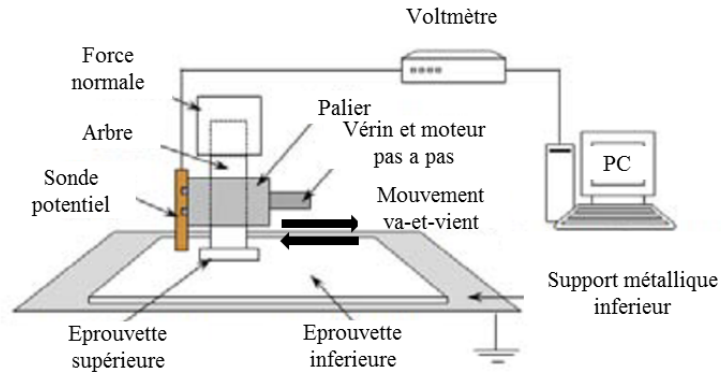
La génération de la charge électrique par contact glissant sec a été étudiée par plusieurs groupes de chercheurs. Leurs recherches ont été réalisées en utilisant des tribomètres qui peuvent être classés selon 3 configurations principales (figure I-7):

- Tribomètre linéaire ou 'va-et-vient' ;
- Tribomètre à 'deux cylindres' ;
- Tribomètre 'pion-disque'.

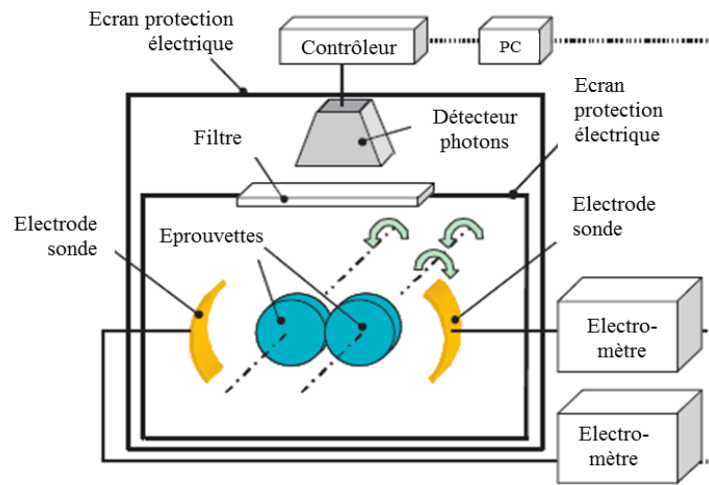
Le premier tribomètre présenté sur la figure I-7 a) est caractérisé par un mouvement de va-et-vient, similaire au dispositif développé pour cette thèse. Ce tribomètre est caractérisé par un mouvement rectiligne. Il permet d'avoir des configurations de contact glissant ponctuel, linéique ou plan. La mesure de la charge électrique en mode online ne peut être réalisée que pour une seule éprouvette [12,87,89].

Le tribomètre de la figure I-7 b) est caractérisé par un seul type de contact, linéique. Cette configuration permet l'étude d'un contact glissant et également d'un contact roulant. La charge des deux éprouvettes peut être mesurée [50].

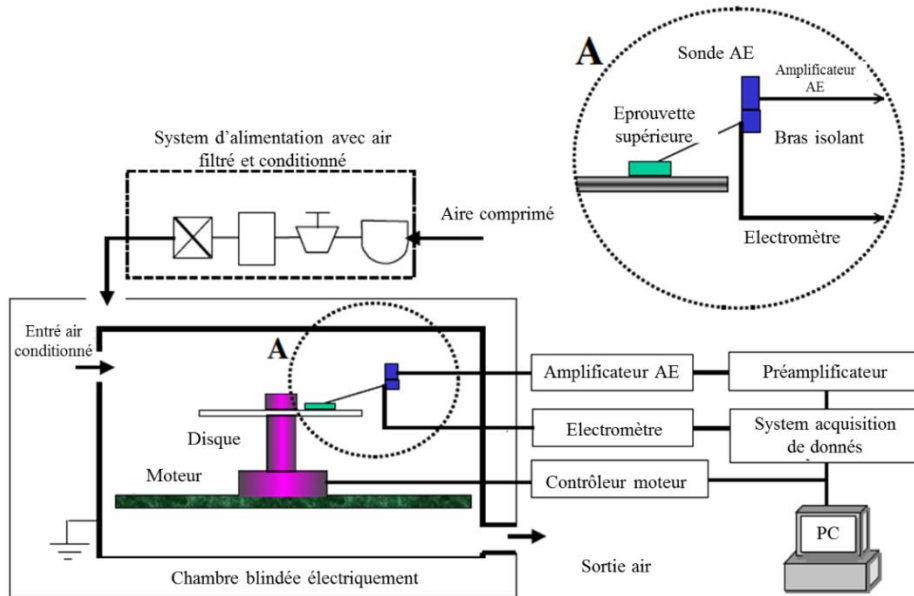
Le troisième tribomètre présenté sur la figure I-7 c) réalise le contact glissant en tournant un disque sur un pion stationnaire. Ce tribomètre présente des caractéristiques similaires au tribomètre à mouvement de va-et-vient et permet l'étude des mêmes types de contacts : ponctuel, linéique ou plan. La mesure de charge en mode online n'est possible que pour l'éprouvette disque [90].



a)



b)



c)

Figure I-7. Types de tribomètres utilisés pour étudier l'effet triboélectrique : a) Tribomètre 'va-et-vient' [12] ; Tribomètre à 'deux cylindres' [50] ; c) Tribomètre 'pion-disque' [90].

La plupart des recherches utilisant ces dispositifs visent la caractérisation de la génération de charge électrique par effet triboélectrique ou l'usure.

Liu et al. (2013) [12] ont étudié le frottement de l'acier avec du nylon, du PP, et du PTFE, ainsi que le frottement de polymères entre eux. Dans son étude il a trouvé que la charge électrique a tendance à se saturer après un certain nombre de cycles. L'analyse montre qu'une augmentation de la force normale de contact (0,5 N - 2 N) favorise la génération de la charge électrique. La gamme de vitesses de l'étude (27 mm/s à 95 mm/s) ne semble pas avoir une influence significative.

Hiratsuka et Hosotani (2012) [50] ont conduit une étude sur le mouvement glissant et roulant de binômes de matières, choisis parmi huit polymères (PA66, POM, ABS, PET, PP, PVC, PE, PTFE). L'analyse montre que la génération de la charge électrique diminue avec l'augmentation de l'humidité ambiante. L'effet triboélectrique est accompagné par un effet de génération de photons proportionnelle à la génération de charge.

Guerret-Piecourt et al (2001) [88] ont étudié le contact entre les cristaux de saphir (α -Al₂O₃). Leur analyse a montré que la capacité du saphir de piéger les charges électriques diminue avec l'augmentation de la température du traitement thermique effectué sur les éprouvettes. Le coefficient de frottement a tendance à diminuer avec la baisse du niveau de charge électrique.

Alahmadi 2014 [87] réalise une étude sur le frottement sec entre PE et PMMA contre PTFE. Il montre une augmentation de la charge si les supports métalliques des deux éprouvettes sont connectés à la terre.

I-3.2 Influence de la charge électrique sur le contact lubrifié

Les études théoriques sur les propriétés de lubrification d'un film de fluide en présence de charges triboélectriques ont principalement visé l'effet électro-visqueux [91–93]. En outre, les conditions de charge externe peuvent modifier les propriétés de mouillabilité à l'interface solide-liquide et affecter également la stabilité interfaciale des fluides diphasiques. Ces facteurs pourraient potentiellement affecter les propriétés de lubrification des films de fluides. La présence des particules solides à l'intérieur des fluides peut ensuite augmenter la viscosité apparente par effet électro-visqueux [94]. Parmi les nombreux phénomènes d'instabilité qui ont un impact sur les propriétés lubrifiantes des films de liquides en présence de charges électriques

les plus importantes sont : la décharge électrique locale, l'émergence des microbulles, la mouillabilité / étalement des films lubrifiants et le flux de lubrifiant instable à travers la zone de contact.

Peu d'études montrent un effet bénéfique de la charge sur la lubrification. Des articles publiés par Gajewski et al. [95–97] montrent qu'un champ électrique appliqué à travers un joint à lèvres lubrifié influence le couple de freinage. Une polarité négative appliquée diminue davantage le couple de freinage (figure I-8).

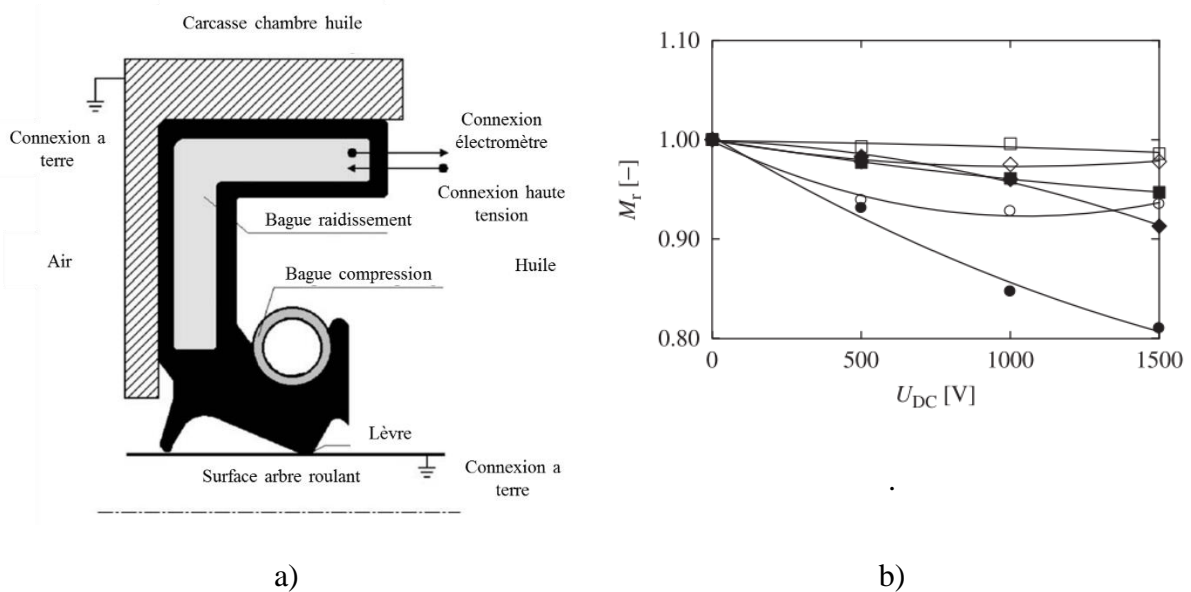


Figure I-8. (a) Joint à lèvres lubrifié, en présence d'un champ électrique ; b) Couple de freinage rapporté au couple de freinage à tension zéro en fonction de la valeur absolue de la tension continue pour le mélange d'huile minérale de base ZDDP pour différents teneurs en ZDDP synthétique: ● (négative) ○(positive) 0%; ◆ (négative) ◇ (positive) 0,1%;■ (négative) □ (positive) 0,5% [95]

L'effet de l'influence du champ électrique sur un liquide est présenté et désigné dans la littérature comme électro-hydro-dynamique. Ainsi, un liquide est mis en mouvement en utilisant un système d'électrodes alimenté par une tension alternative. Ce phénomène est largement étudié par différents équipes de recherche [98–100].

L'effet électrocinétique se manifeste par la résistance au mouvement exercée sur une particule qui se déplace en champ électrique. La lubrification en couche mince est apparemment différente de celle en film épais. Il a été trouvé que près des surfaces solides, la viscosité effective est beaucoup plus grande que la viscosité globale. Il existe quelques théories pour expliquer le phénomène. Des études sur l'effet de la structure moléculaire du lubrifiant ont

montré que lorsque l'épaisseur du film est de la taille d'une molécule, la viscosité induite est beaucoup plus élevée que la viscosité newtonienne [101]. Ceci indique le fait que la structure moléculaire a un effet significatif sur la viscosité du fluide dans le régime de lubrification en couche mince [91,102].

Un autre phénomène qui cause l'électro-viscosité est lié à la formation de la double couche électrique, un phénomène qui existe à l'interface solide-liquide [18,103]. Il s'agit de la présence de deux zones de charge, l'une dans le solide et l'autre dans le liquide. L'étendue spatiale des effets de la double couche électrique est de l'ordre du nanomètre, pour les solutions aqueuses, ou des millimètres, pour les huiles diélectriques utilisées dans les systèmes d'isolation électrique. En conséquence, les performances de lubrification sont influencées de manière significative par la nature et par l'épaisseur du film[93,104].

Le modèle de Stern distingue la présence de deux sous-couches de charge dans le liquide. La première est compacte, formée d'ions fortement attirés par la surface solide et qui devient immobiles. La deuxième sous-couche est diffuse, les charges électriques qui la composent étant susceptibles d'être mises en mouvement soit par l'écoulement du liquide, soit par un champ électrique extérieur. La limite entre la couche compacte et la couche diffuse est généralement appelée plan de glissement. Le potentiel électrique à l'interface solide-liquide est difficile à mesurer directement, mais il est possible de déterminer le potentiel au plan de glissement, nommé potentiel zêta. Selon la théorie de l'électrostatique, la relation entre le potentiel électrique et la densité de charge volumique en tout point de la solution est décrite par l'équation de Poisson (figure I-8) [91]. Les ions proches de l'interface ont une mobilité plus faible qui varie en fonction de la concentration de charges et qui peut induire un changement de viscosité. Le potentiel généré à l'interface a une influence sur les ions de polarité opposée, ce potentiel peut également influencer les particules non-chargées polaires [105].

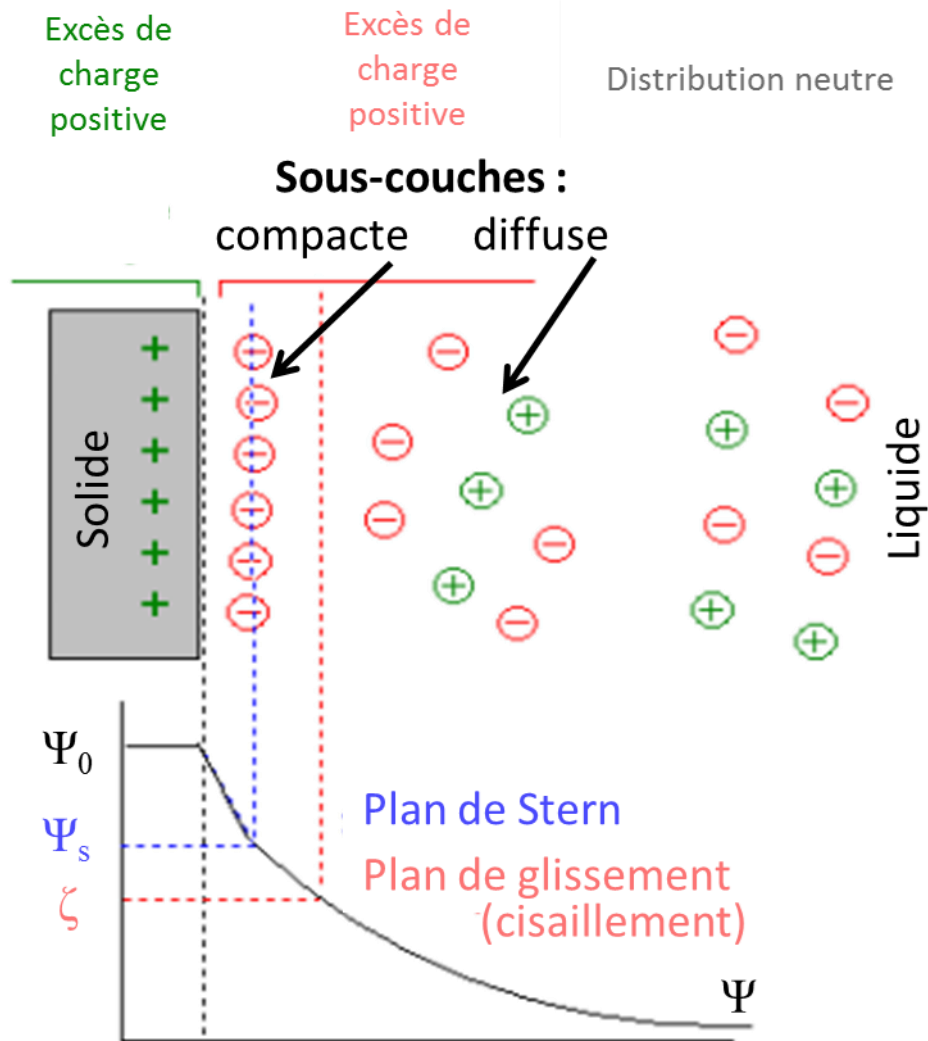


Figure I-9. Formation de la double couche électrique et évolution du potentiel (Ψ) généré par la distribution de charge (ζ : potentiel zêta; Ψ_s : potentiel au plan de Stern ; Ψ_0 : potentiel à l'interface) [91]

I-4 Conclusions

Les interactions charge électrique - frottement de matériaux constituent un sujet d'actualité. L'augmentation significative de l'utilisation des polymères comme matériaux tribologiques ainsi que leurs propriétés de génération et de conservation de la charge électrique par frottement justifient l'intérêt de ces études.

La charge électrique générée par effet tribologique pour les polymères est un phénomène difficile à maîtriser et est influencée par plusieurs facteurs. Si la pression de contact, la vitesse de frottement, la température et l'humidité ambiante constituent des facteurs relativement contrôlables avec une bonne répétabilité, il n'en est pas de même pour le processus de génération

de la charge électrique, de sa répartition dans la zone de contact et sa périphérie, de sa conservation et des polarités des charges électriques selon la nature de matériaux en contact. La même paire de matériaux peut générer des polarités inversées par rapport un comportement antérieur. Par ailleurs, l'identification même de la nature des porteurs de charges n'est pas claire puisque différentes études montrent des résultats contradictoires.

La description des processus tribologiques dans les contacts glissants est un sujet qui est relativement bien maîtrisé actuellement et les modélisations mises au point décrivent correctement les comportements tribologiques de ces types de contact. Cependant, la génération de la charge électrique et de ses effets dans les contacts glissants ne sont pas pris en compte. Quelques études, très peu nombreuses, suggèrent que la présence du champ électrique modifie les conditions de frottement et de lubrification. De même, l'influence de la charge électrique sur les phénomènes d'adhésion reste totalement à approfondir.

Une multitude d'études traitent de la charge électrostatique des polymères. Elles s'appuient sur des mesures sans contact du potentiel électrique mais sans proposer une méthodologie de calcul des charges électriques de surface. Plusieurs configurations géométriques de contact sont décrites avec plusieurs matériaux mais les conditions tribologiques ne sont pas toujours bien caractérisées. In fine, ces études aboutissent à une diversité de conclusions dont certaines sont contradictoires.

Ce sujet de recherche pluridisciplinaire ne peut et ne doit être abordé que du côté tribologique ou que du côté électrostatique mais bien les deux simultanément. L'approche expérimentale avec des analyses phénoménologiques s'impose comme incontournable dans ce sujet où très peu d'études ont été menées. Le chapitre suivant est consacré à la mise en œuvre expérimentale avec une description détaillée des dispositifs expérimentaux conçus et réalisés, de l'instrumentation utilisée et des matériaux.

Chapitre II Mise en œuvre expérimentale

Les expériences décrites dans la littérature indiquent que l'effet triboélectrique dépend d'une multitude de facteurs. Le frottement, la température et l'humidité semblent jouer les rôles les plus prépondérants [50,87,90,106–108]. Castle [40] analyse quelques résultats et précise que les causes principales, sont liées à la complexité des processus physiques [109,110]: variabilité de l'état de surface (présence d'aspérités, du type de prétraitement, présence de particules ou de dépôt, etc.) ; variabilité expérimentale (température, hygrométrie, historique antérieur de l'échantillon), pression de contact, nature du contact (charge statique ou frottement, contact ponctuel, linéique ou plan). Un mécanisme secondaire de génération de charge est lié à la polarisation et à l'ionisation qui peuvent se produire dans un diélectrique solide exposé à l'action d'un champ électrique intense [111]. D'autres phénomènes, telles que la relaxation de la charge, ont été indiqués comme processus de transferts ultérieurs de la charge électrique [63].

Nous présentons dans ce chapitre les installations et instrumentations qui ont été mises en œuvre pour étudier les phénomènes de tribocharge. Ces installations, décrites dans les paragraphes II-1 et II-2, permettent notamment d'étudier les phénomènes de charge des matériaux polymère sous forme de plaques rectangulaires par effet triboélectrique et par décharge couronne. Une préparation soignée des éprouvettes, notamment en éliminant la charge électrique résiduelle, est nécessaire pour une étude précise et fine du phénomène triboélectrique

II-1 Dispositif expérimental pour la génération de la charge par effet triboélectrique

La faible reproductibilité des résultats dans le cas du contact sec avec frottement laisse les portes ouvertes pour mener des investigations sur cette problématique. Conscients de ces difficultés, plusieurs chercheurs ont essayé de définir rigoureusement la méthodologie expérimentale employée pour l'étude de l'effet triboélectrique dans des circonstances spécifiques. La plupart d'entre elles sont liées aux risques électrostatiques dans l'industrie électronique [112–114]. Plusieurs techniques de mesure sont disponibles pour caractériser l'uniformité et la stabilité de la distribution de charge électrique sur une surface plane [115]. La plus utilisée est celle de la mesure du potentiel électrique produit par cette charge extérieure, utilisant une sonde et un voltmètre électrostatique [116]. Cette méthode de mesure non intrusive, est couramment utilisée pour caractériser la charge des films polymères [62,117–120]. Elle a récemment été appliquée pour l'étude de la charge électrique générée par contact glissant entre des matériaux polymères [62,121].

En s'appuyant sur ces études, nous avons conçu et réalisé au sein de l'Institut PPRIME de Poitiers plusieurs installations pour générer et étudier l'effet de la charge électrique. Ce travail de recherche est mené dans le cadre du « Labex Interactifs ». La première installation est un tribomètre linéaire destiné à l'étude des contacts glissants entre solides en frottement sec ou lubrifié. La deuxième installation est un dispositif pour mesurer la distribution de la charge électrique de surface. Ces deux premières installations sont couplées pour étudier l'interconnexion entre les phénomènes tribologiques et les phénomènes électrostatiques. Une troisième installation est destinée à l'étude de l'influence de la charge électrique sur l'angle de contact de gouttelettes déposées en surface. Ces mesures sont complétées par les mesures du champ de température par caméra infrarouge, de la rugosité et de la composition chimique par spectromètre infrarouge.

II-1.1 Banc expérimental

Le but de cette section est de décrire le dispositif et l'instrumentation d'un banc de laboratoire qui permet l'évaluation précise de l'état de tribocharge des polymères en lien avec les caractéristiques dynamiques du contact conforme et glissant qui génère de la charge électrique. L'efficacité du banc est validée par une étude expérimentale des paramètres liés à la charge triboélectrique d'échantillons parallélépipédiques en contact plan/plan. Une fois cette charge électrique générée, sa distribution est ensuite évaluée sur un autre dispositif.

L'installation expérimentale a été conçue pour tester des éprouvettes plates dans un mouvement de translation alternative (figure II-1). Le banc assure le contrôle et la caractérisation du glissement entre deux éprouvettes mises en contact conforme. La conception du banc facilite le déplacement des éprouvettes pour la mesure de la charge électrostatique tout en identifiant la position du contact.

Nous pouvons distinguer cinq principales parties :

- Le poste de pilotage
- La motorisation et la transmission
- Le support et le guidage de l'éprouvette inférieure
- Le support, le guidage et le système de chargement mécanique de l'éprouvette supérieure
- L'instrumentation de mesure des forces normale et tangentielle et du déplacement tangentiel.

L'éprouvette supérieure (A) est fixée sur un support (1) qui permet par l'intermédiaire d'une rotule de régler la planéité du contact entre les éprouvettes. Deux colonnes à billes assurent le déplacement vertical pour le chargement normal du contact. Le support inférieur (2), qui porte l'éprouvette (B), est entraîné dans un mouvement de glissement alternatif dans la direction horizontale assurant ainsi le chargement tangentiel du contact. Un système de levier (3) permet d'ajuster finement l'intensité de la force normale de contact qui est mesurée par un capteur de force à jauges résistives en forme de « S » (4). Le déplacement du support inférieur dans la direction horizontale est assurée par une glissière à billes (5), Le mouvement de la glissière (5) et donc de l'éprouvette (B), est mesuré par un capteur de déplacement. Le mouvement de va-et-vient est fourni par un système bielle-manivelle (8) transmis au guidage (7) et entraîné par un moteur électrique (9). L'amplitude du glissement peut varier en changeant l'excentrique de la manivelle. Dans les évolutions et améliorations que nous avons apportées au dispositif depuis de cette thèse, le système (8-9) a été remplacé par un moteur linéaire (8'). Le capteur de force (10) identique au capteur (4), est inséré dans la chaîne cinématique du mouvement tangentiel. 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 des capteurs 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

L'étude de l'évaluation précise de l'état tribocharge de polymères en état lubrifié est réalisée à l'aide de la même installation. Les paramètres et facteurs qui permettent la caractérisation du régime en contact sec sont également employés pour la caractérisation du régime lubrifié.

La présence du lubrifiant a nécessité quelques modifications sur le banc. La figure II-2 indique les modifications nécessaires pour introduire et maintenir le lubrifiant à l'interface entre les deux éprouvettes. Un joint adhésif (18) assure l'étanchéité autour de l'éprouvette (B). Le lubrifiant est introduit à l'aide de deux seringues graduées (19) et (20).

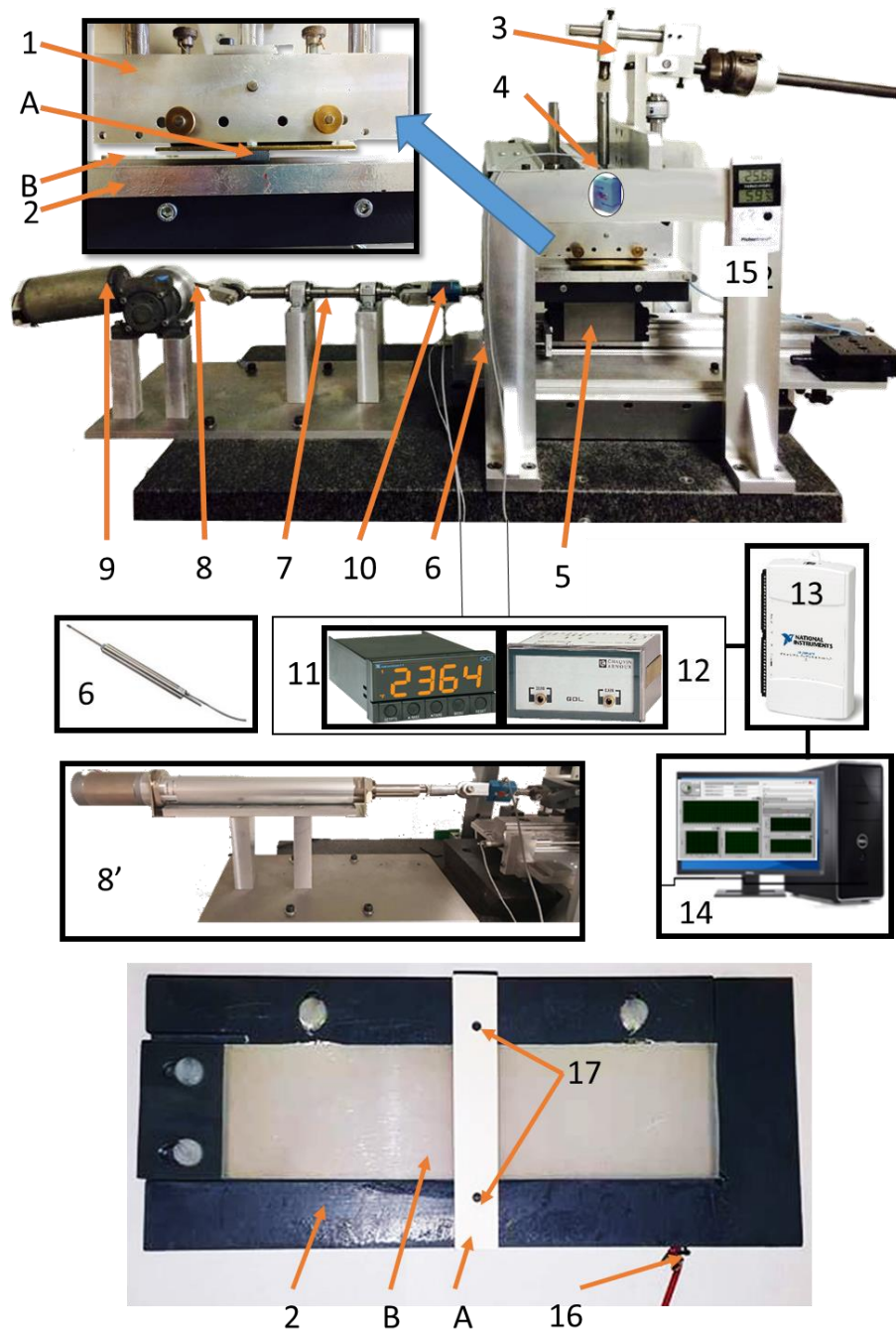


Figure II-1. Dispositif de tribocharge d'un contact plan-plan:

A-Eprouvette soumise à un mouvement vertical ; B- Eprouvette soumise à une translation alternative ; 1- Support porte-éprouvette (A) ; 2- support porte-éprouvette (B); 3 - système de contrôle de la force normale ; 4- Capteur de force normale (N) 5- Glissière à billes du guidage horizontal ; 6 – Capteur de déplacement tangentiel (D) ; 7- Barre de guidage système bielle-manivelle ; 8- Moteur électrique; 8' - moteur linéaire ; 9- Capteur de force tangentielle (T) ; 10 – Conditionneur capteur de force ; 11 – Conditionneur capteur déplacement ; 12 - Carte acquisition de données ; 13 –interface d'acquisition Labview ; 14- mesure de température et d'humidité ambiante ; 16 – Liaison électrique à la terre ;

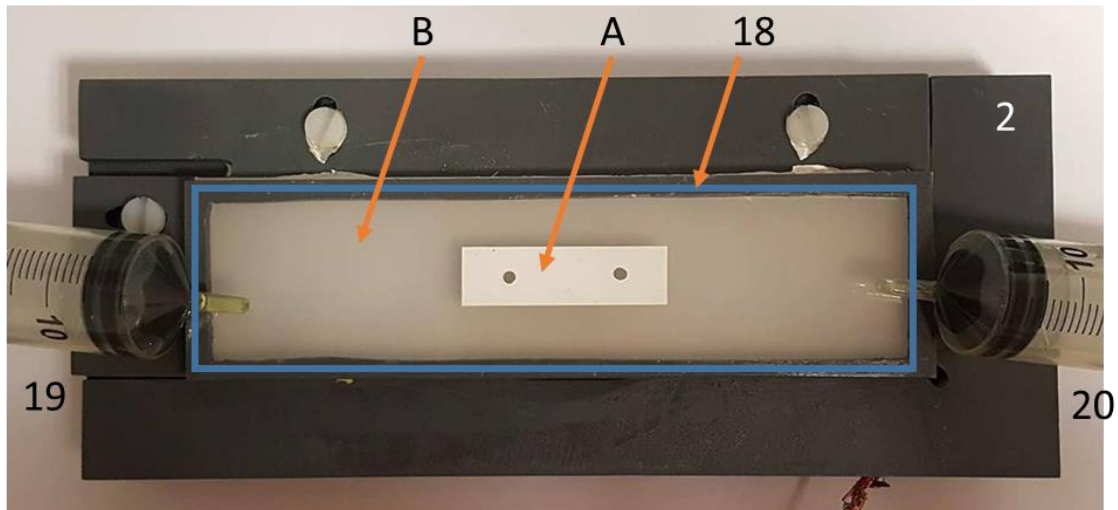


Figure II-2. Préparation de l'éprouvette pour le contact lubrifié :
 A - Epreuve supérieure, B - Epreuve inférieure, 18 - Cadre avec joint adhésif,
 2 - Support éprouvette inférieure, 19, 20- Seringues graduées.

II-1.2 Pilotage du banc et instrumentation virtuelle

Cette installation permet le contrôle de quatre paramètres : l'amplitude et la vitesse de glissement entre les deux éprouvettes, la force normale, et le nombre de cycles de glissement. Plusieurs réponses sont également surveillées et enregistrées pour caractériser l'effet tribologique. Il s'agit des variations des forces tangentielle et normale, du déplacement tangentiel et de la vitesse réelle de glissement.

Le pilotage de l'installation expérimentale est assuré par un poste de contrôle géré par un programme LabVIEW de National Instrument. L'interface utilisateur pour le pilotage du banc est présentée sur la figure II-3. Le programme permet de contrôler le régime de fonctionnement et de visualiser en temps réel les mesures des capteurs de force et déplacement. Le poste de contrôle permet de régler la vitesse de rotation la manivelle ou encore la vitesse de translation du moteur linéaire. Pour une charge normale de 20N, la vitesse maximale du support inférieur coulissant peut atteindre 250 mm/s avec le système bielle-manivelle et 150 mm/s avec le moteur linéaire. La même interface permet la visualisation des cartographies du potentiel électrique de surface après déplacement de l'éprouvette sur l'installation de mesure du potentiel.

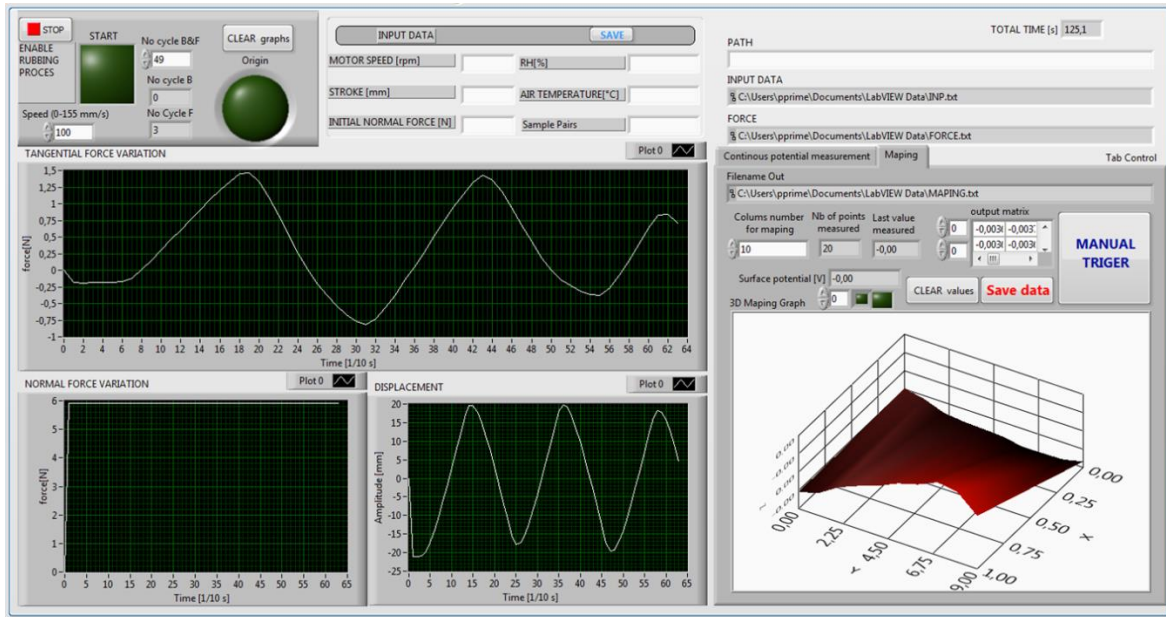


Figure II-3. Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.

L'équipement de mesure des forces est étalonné et calibré pour assurer des mesures de qualité. La force normale est mesurée sur une plage de 0N à 20 N et celle de la force tangentielle 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 5V 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 système bielle-manivelle ou du 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-1.3 Acquisition et traitement des signaux

Des expériences destinées à la validation du nouveau banc expérimental, ont été réalisées avec deux types d'éprouvettes. L'éprouvette supérieure (A) est en ABS (de dimension 6x15x100 mm³ et de rugosité $R_a = 0.46 \pm 0.04 \mu\text{m}$) tandis que l'éprouvette inférieure (B), est en PVC (de dimensions 5x50x180 mm³ et de rugosité $R_a = 1.28 \pm 0.06 \mu\text{m}$). Les éprouvettes sont mises dans une configuration perpendiculaire (figure II-19). L'épaisseur réelle des 4 éprouvettes en PVC, sélectionnée aléatoirement, a été manuellement mesurée en 11 points par éprouvette (Tableau II-1). Les valeurs statistiques globales pour l'épaisseur étaient : moyenne de 4.828 mm, écart type 0.0148 mm, minimum 4.797 mm, maximum 4.865 mm, étendue 0.068 mm. Tous les échantillons ont été neutralisés de sorte que le potentiel électrique de surface demeure inférieur en valeur absolue à 50 V avant l'essai.

Tableau II-1. Epaisseur des éprouvettes

Éprouvette	#1	#2	#3	#4
moyenne [mm]	4,824	4,827	4,841	4,826
écart type [mm]	0,014	0,004	0,016	0,018
min [mm]	4,803	4,823	4,817	4,797
max [mm]	4,840	4,837	4,865	4,852
étendue [mm]	0,037	0,014	0,048	0,055

Un premier ensemble d'expériences a été mené sur une paire d'éprouvettes identifiées E0 pour caractériser le comportement mécanique du banc pendant une longue période de glissement (250 s), à une force normale $F_N = 10$ N et une vitesse relative v de 70 mm/s. Le maintien de la force normale à une valeur constante est très difficile parce que les petites variations de l'épaisseur des éprouvettes en polymères ont induit de petits déplacements du poids pressant engendrant ainsi de petites variations de la force normale. Cependant, ces variations ont au maximum atteint 0,05% de la force normale imposée initialement. Notons toutefois que nous sommes dans une configuration de chargement normal du contact à force imposée et non à déplacement imposé où les variations d'épaisseurs auraient engendré des variations bien plus importantes. Les imperfections mécaniques inévitables (jeux et frottements entre les pièces mobiles) de l'installation et la variation de l'épaisseur d'éprouvette mentionnée ci-dessus mènent

aux fluctuations de la force normale telles que montrées dans figure II-4 (a). Les divers types de bruit électrique (S&P, bruit de fréquence de réseau) [122] peuvent affecter les résultats aussi la gestion et l'élimination des bruits des signaux se révèlent incontournables.

Le bruit impulsif « sel-et-poivre » (S&P) est particulièrement dérangeant. Cette perturbation s'est produite de manière imprévisible et assez fréquemment. Ce problème a été résolu en utilisant un filtre «band-pass» particulièrement adapté aux bruits de type « sel-et-poivre ». La figure II-4 (b) présente le signal traité par ce filtre. Ainsi pour une force normale nominale imposée de 10 N, les variations maximales se situent entre $-10,236$ N et $10,241$ N soit une variation de l'ordre de 0,05% de la force normale nominale. Ces variations, parfaitement acceptables, étaient en bon accord avec la prévision théorique concernant la variation de l'épaisseur d'éprouvettes.

Les rugosités des surfaces et les frottements dans les éléments de guidage vertical engendrent également à des fréquences plus élevées des bruits qui viennent s'ajouter à ceux dus aux variations d'épaisseurs des éprouvettes.

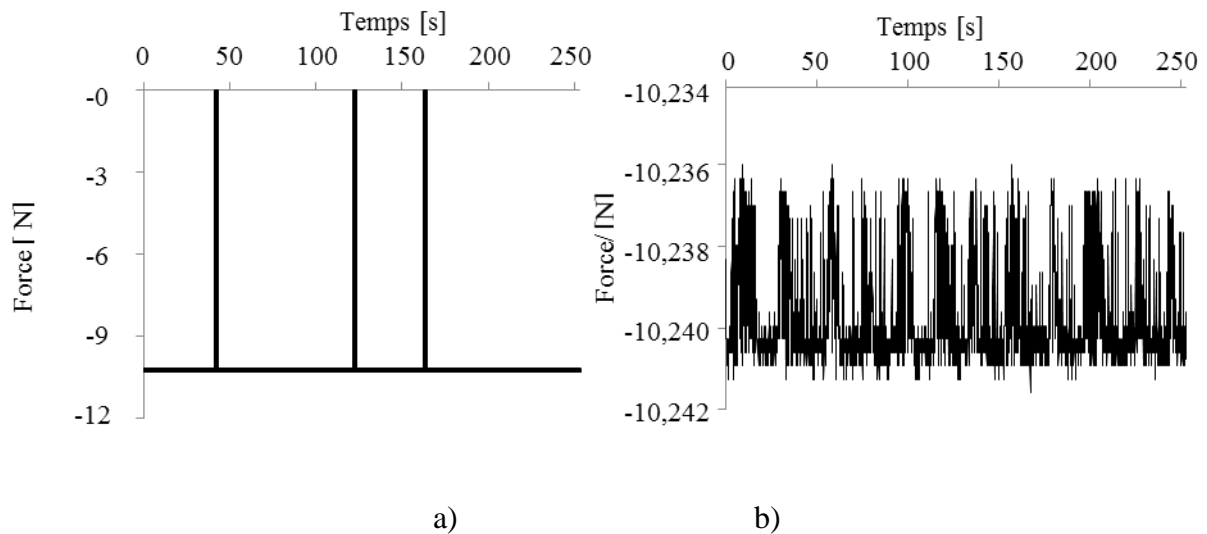


Figure II-4. Elimination du bruit « sel-et-poivre » ($E0$, $F_N = 10$ N, $t = 250$ s, $v = 70$ mm/s) a) Force normale affectée par le bruit S&P ; b) Bruit S&P éliminé et mise à l'échelle du signal pour la visualisation des détails [121].

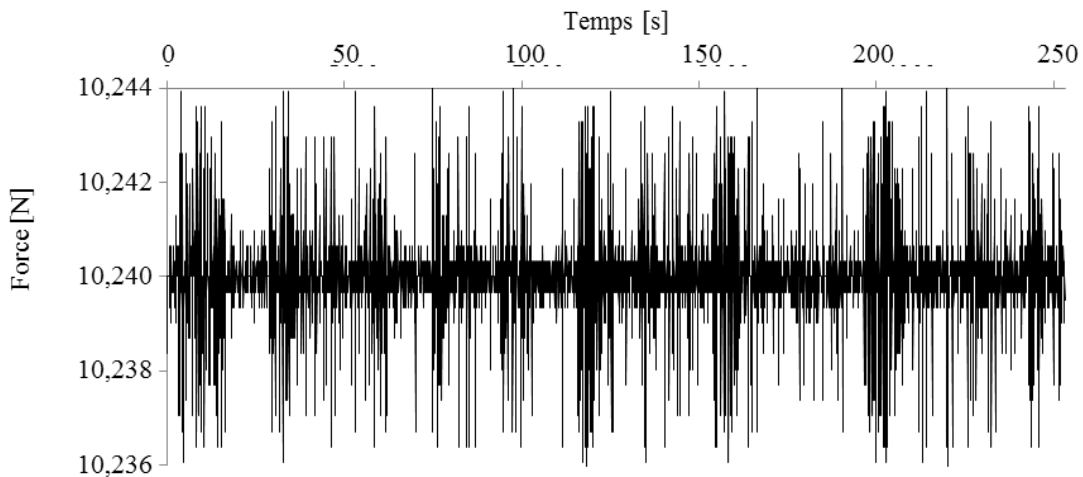


Figure II-5. Résultat de la force normale après le filtrage du signal
(E0, $F_N = 10$ N, $t = 250$ s, $v = 70$ mm/s) [121].

Un changement d'épaisseur de taille δ , sur une distance Δ (pour une pente constante) dans la direction de glissement, avec la vitesse v , produit une accélération normale $a = 2\delta/(\Delta/v)^2$, comme $\delta = a t^2/2$, avec $t = \Delta/v$ (figure II-6). Par conséquent, la force normale deviendra $F_N = m(g + a)$, où le m est la masse créant la force normale, et g est l'accélération de la gravité. Par exemple, un changement d'épaisseur de $\delta = 0,15$ mm au-dessus d'une distance $\Delta = 10$ mm et pour d'une vitesse $v = 100$ mm/s produit une accélération verticale de $a = 3 \cdot 10^{-2}$ m/s² soit environ 0,3% de $g = 10$ m/s². Le bruit de la variation d'épaisseur est du même type que la mesure de rugosité. La figure II-5 représente le signal après l'élimination de ce bruit.

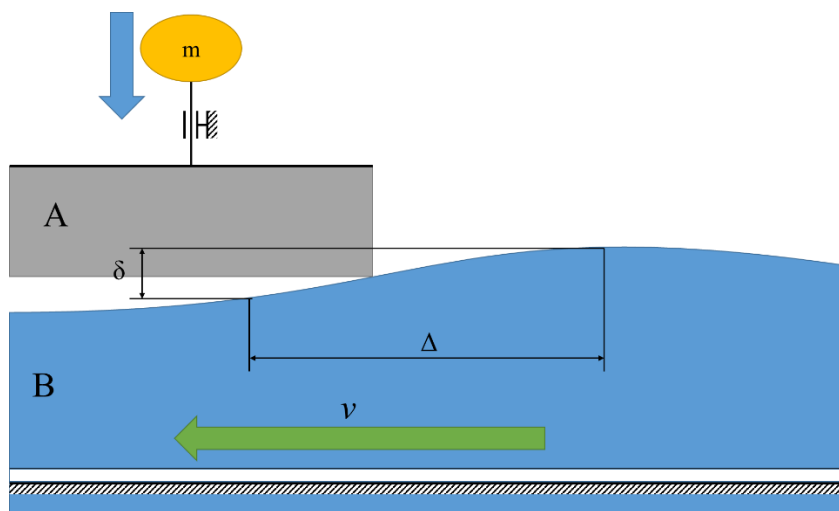


Figure II-6. Schéma pour le calcul de la variation de la force normale.

Les courbes de déplacement montrent une légère déviation de la loi sinusoidale, avec des irrégularités d'un cycle à l'autre cycle (figure II-7). Elles sont dues aux petites imperfections dans le système mécanique de guidage. Cependant, l'effet triboélectrique se produisant principalement aux vitesses maximales, ces déviations d'une loi de mouvement sinusoidale ne changent pas de manière significative les résultats du processus de tribochargement. La loi de mouvement pour le mécanisme bielle-manivelle est donnée par la relation :

$$x = R \sin(\theta) + \sqrt{L^2 - R^2 \cos^2(\theta)} \quad (\text{II.1})$$

Où R est rayon de la manivelle en mouvement de rotation, L est la longueur de la bielle. Dans notre cas, $R = 28 \text{ mm}$ et $L = 107 \text{ mm}$; ω est la vitesse de rotation constante; $\theta = \omega t$ où t est le temps. Par dérivation on obtient la vitesse de translation puis l'accélération (II.2).

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \dot{\theta}^2 R \left(-\sin(\theta) + \frac{\cos 2\theta}{\sqrt{\frac{L^2}{R^2} - \cos^2(\theta)}} - \frac{\sin^2(2\theta)}{4 \left(\sqrt{\frac{L^2}{R^2} - \cos^2(\theta)} \right)^3} \right) \quad (\text{II.2})$$

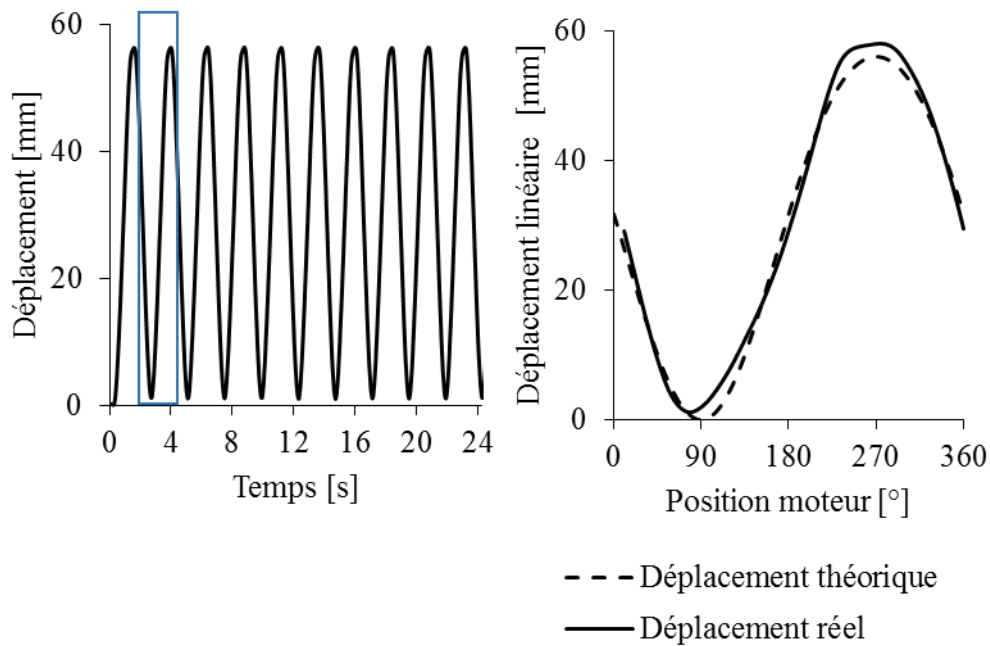


Figure II-7. Mesure du déplacement : a) Premières 24 secondes, paire E0, $F_N = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$ b) Comparaison avec la loi de mouvement sinusoidale pour un cycle.

La force tangentielle a également une variation cyclique non parfaitement sinusoïdale avec une légère augmentation en début d'essai qui se stabilise (figure. II-8 a). Ce comportement peut être dû à l'échauffement qui se produit pendant le contact avec frottement. L'augmentation de la force tangentielle, force de frottement, est due au fait que le coefficient de frottement varie avec la température et avec l'usure [110]. Ceci peut également être une conséquence de l'évolution du processus de charge triboélectrique des deux corps en contact. La contribution de ces charges électriques au comportement du frottement et de l'usure des matériaux isolants a été identifiée par plusieurs groupes de recherche [87,123] .

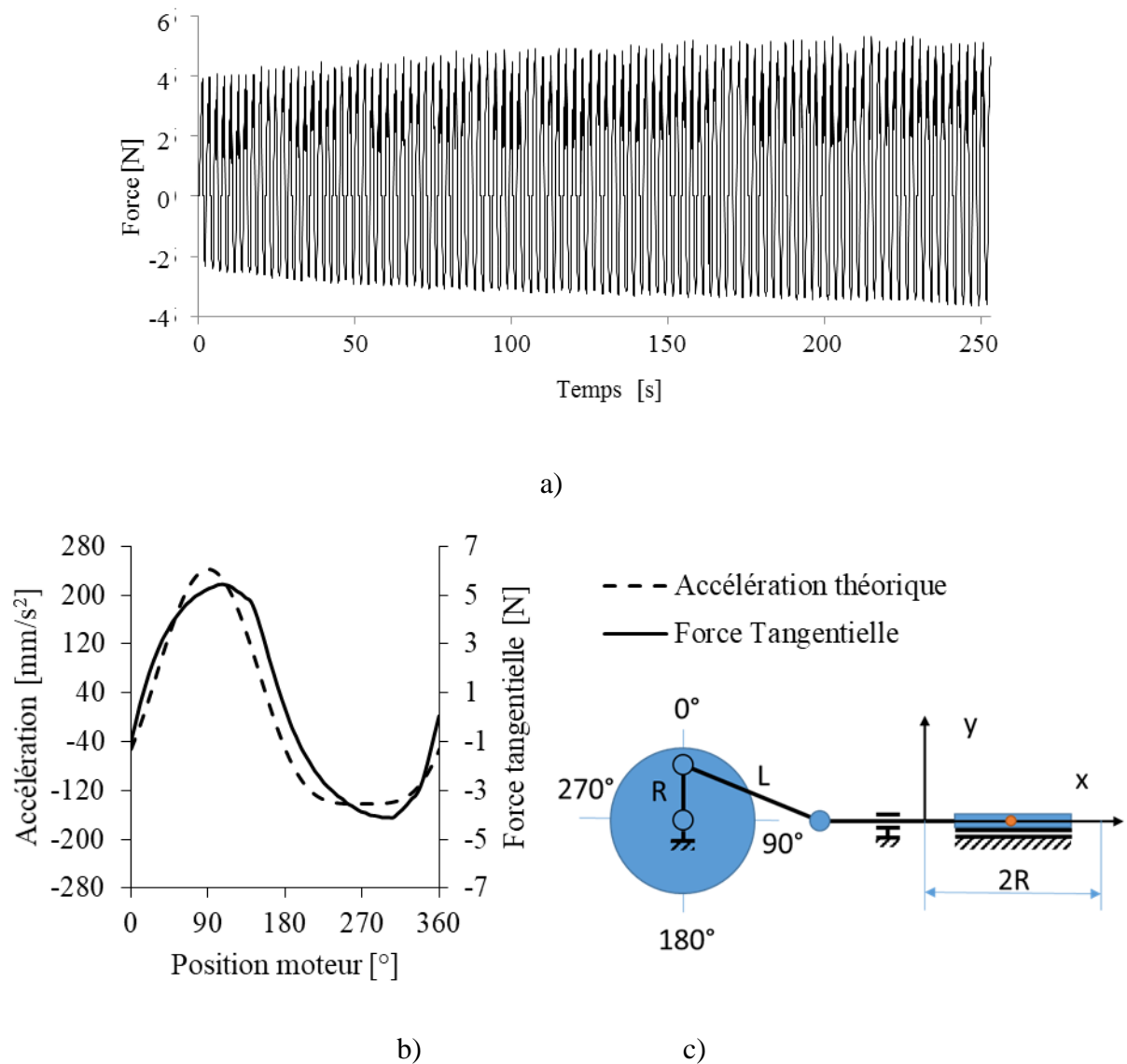
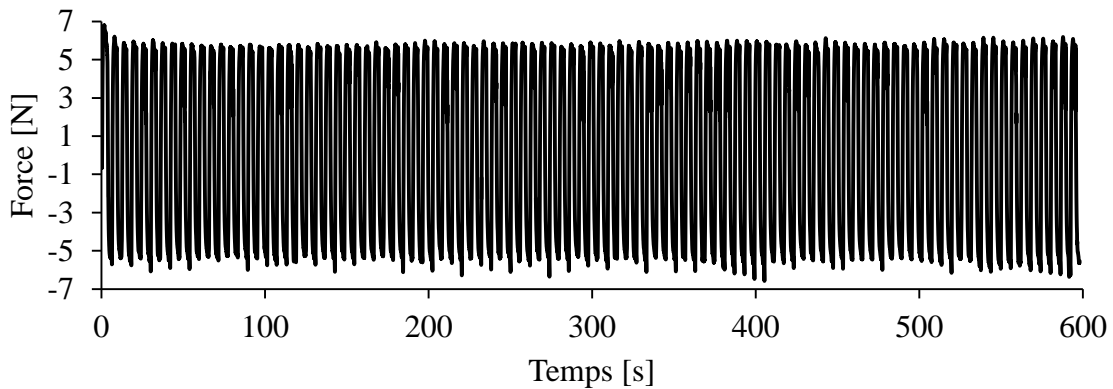
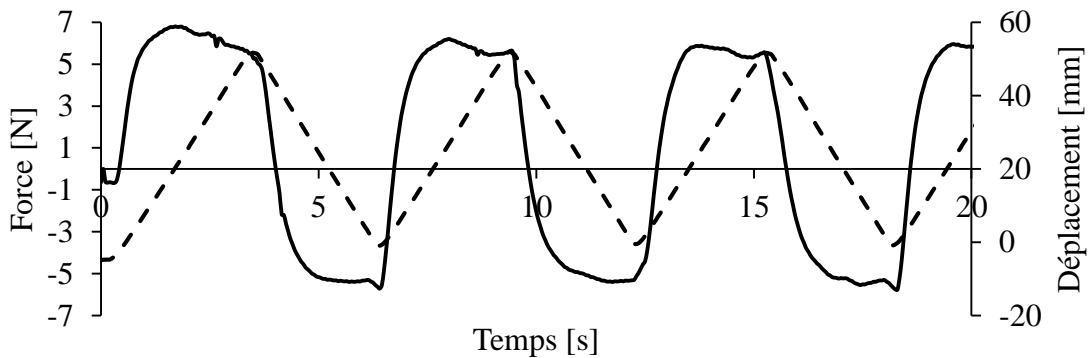


Figure II-8. E_0 , $F_N = 10$ N, $t = 250$ s, $v = 70$ mm/s, $\omega = 2.5$ rad/s ; a) Variation de l'amplitude de la force tangentielle avec le temps b) Comparaison avec la loi d'accélération sinusoïdale pour un cycle. c) Schéma du système bielle-manivelle

L'évolution de cette installation s'est inscrite dans une démarche d'amélioration continue. Le système bielle-manivelle a été remplacé par un moteur linéaire où le mouvement de glissement se fait à une vitesse constante. L'accélération pendant le déplacement est nulle et permet une bonne variation de la force tangentielle. Des expériences ont été réalisées sur une paire d'éprouvettes indiquée comme E1 pour caractériser le comportement mécanique du banc pendant une longue période de glissement (600 s), à une force normale $F_N = 20$ N, une vitesse relative $v = 15$ mm/s. L'accélération est non nulle uniquement à l'instant où le déplacement change de direction ce qui entraîne également un changement de signe de la force tangentielle. L'absence d'accélération pendant le mouvement facilite la visualisation de la force de frottement entre les deux éprouvettes. Après le changement de direction un effet d'hystérésis est identifié pour le premier quart de la course (figure II-9).



a)



b)

Figure II-9. a) Evolution de la force tangentielle pendant une longue durée de frottement :
 b) Zoom pour les premières 20 s ($F_N = 20$ N, $v = 15$ mm/s).

II-2 Dispositifs expérimentaux de génération de charge électrostatique par effet couronne

Ce sous-chapitre est consacré au processus de chargement électrostatique par effet couronne et à la méthodologie expérimentale associée. Cette méthode diffère de la méthode de tribocharge sur plusieurs aspects. Les porteurs de charge sont des molécules de l'air ionisées dirigées vers la surface à charger. Le chargement par effet couronne offre un bon contrôle du niveau et de l'uniformité de la charge électrique. Une description développée du principe de chargement par effet couronne est exposée dans le premier chapitre.

II-2.1 Banc expérimental

Nous présentons sur la figure II-10 le dispositif et l'instrumentation d'un banc de laboratoire de chargement de la surface d'une éprouvette en forme de plaque en polymère par décharge couronne. L'état de charge, son niveau et son uniformité sont évalués ultérieurement. L'électrode couronne et la sonde sont attachées à la partie mobile d'une machine à trois axes pour un positionnement précis lors du chargement et lors des mesures du potentiel électrique. La méthodologie de calcul de la charge est présentée dans le chapitre III.

La décharge couronne est réalisée en configuration d'électrodes de type « triode ». Cette configuration assure une distribution de charges plus uniforme comparée aux autres systèmes d'électrodes couronne, « pointe – plan » ou « fil – plan ». Les modes de charges utilisés ici sont « statique » et par « balayage ». En mode « statique », l'ensemble des électrodes reste fixe. En mode « balayage » une électrode se déplace par rapport à l'autre pour charger la surface souhaitée. Le principe est que toute la surface de l'éprouvette doit se déplacer au-dessous de l'électrode-fil. Le mode « balayage » est préféré pour les surfaces plus grandes, car il assure une distribution de charge électrique plus uniforme.

L'électrode fil (1) est alimentée par une source haute tension (2) permettant le réglage de la tension sur une plage positive ou négative (0 à ±30 kV). L'électrode est déplacée en direction verticale pour augmenter l'uniformité de la charge. La grille est placée équidistante de l'électrode-fil et de la plaque métallique, à une distance de 15 mm. La grille est connectée à la masse à travers un micro-ampèremètre (4) et une résistance (5) avec une valeur constante et réglable. La mesure de courant de la grille I_g à travers la résistance R_g permet de connaître le potentiel initial à la surface de l'éprouvette chargée, qui est égal au potentiel de la grille :

$$V_g = I_g \cdot R_g \quad (\text{II.3})$$

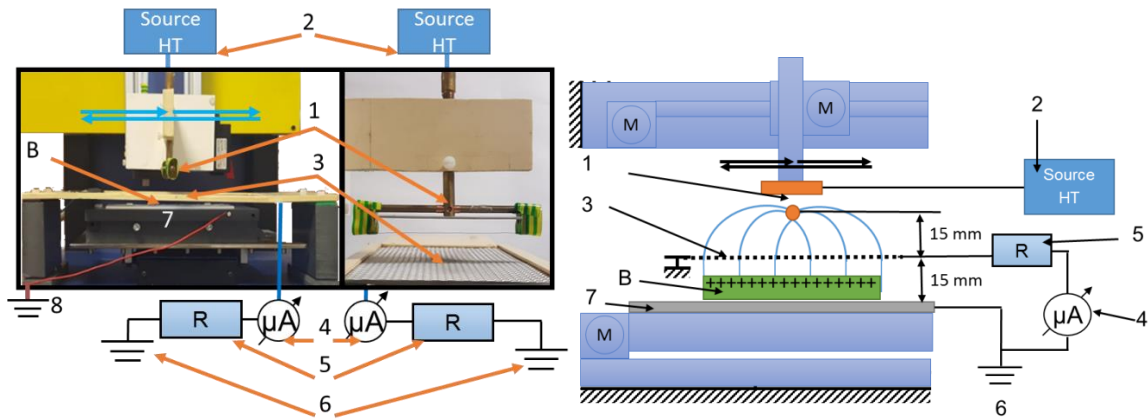


Figure II-10. Chargement par effet couronne :

B – Eprouvette inférieure ; 1 – électrode avec fil ; 2 – source haute tension ; 3 – grille ; 4 – micro-ampèremètre ; 5 – résistance ; 6 – liaison à la terre électrique ; 7 – Support éprouvette ; 8 – liaison à la terre électrique ;

La variation de courant I_g se fait en modifiant la tension d'alimentation de la source haute tension. Le micro-ampèremètre mesure le courant I_g .

Les ions générés à l'interface du fil de l'électrode connectée à la haute tension arrivent à la surface de l'éprouvette à travers la grille. La charge qui arrive à la surface de l'éprouvette isolante est limitée par la grille qui laisse passer un flux de charge proportionnel avec la différence de potentiel entre la grille et l'électrode reliée à la terre. Les charges électriques s'accumulent sur la surface isolante jusqu'à un niveau équivalant au potentiel de la grille. Lorsque l'alimentation de l'électrode-fil est arrêtée, la génération des charges est terminée. Les liaisons entre les charges et la surface isolante sont fortes. Par conséquent, les surfaces restent chargées après l'arrêt de la décharge.

II-2.2 Présence d'un lubrifiant sur une surface chargé par effet couronne

Plusieurs études ont été menées par des chercheurs afin d'analyser les diverses possibilités d'utilisation des mesures de l'angle de contact. Elles fournissent des informations sur la mouillabilité, l'énergie libre et l'état de rugosité de la surface [124–126]. L'installation de la figure II-11 permet d'identifier l'influence de la charge électrique sur l'angle de contact de différentes gouttelettes de liquides déposées sur différents polymères. Cette installation est composée de trois postes. Le premier poste (A) réalise le chargement électrostatique par effet couronne. Ce poste est composé d'une électrode couronne dans une configuration triode « statique » sur le même principe décrit au paragraphe II-1.4 ; il fait le chargement électrostatique

de l'éprouvette (1) qui est placée sur le support métallique (2) lié à la terre. L'éprouvette est déplacée à l'aide d'un convoyeur sur le deuxième poste (B). La sonde électrostatique (10) connectée à un voltmètre électrostatique (11) mesure le potentiel de surface au centre de l'éprouvette.

Le troisième poste permet de déposer une goutte de liquide au centre de la surface chargée électriquement. Une seringue contenant du liquide est actionnée par un système à vis pour déposer des gouttes avec précision. Lorsque la goutte est déposée, il faut attendre 5 secondes pour permettre la relaxation de la goutte. Une caméra commandée à distance prend des photos. Les mesures de l'angle de contact sont faites avec le logiciel ImageJ.

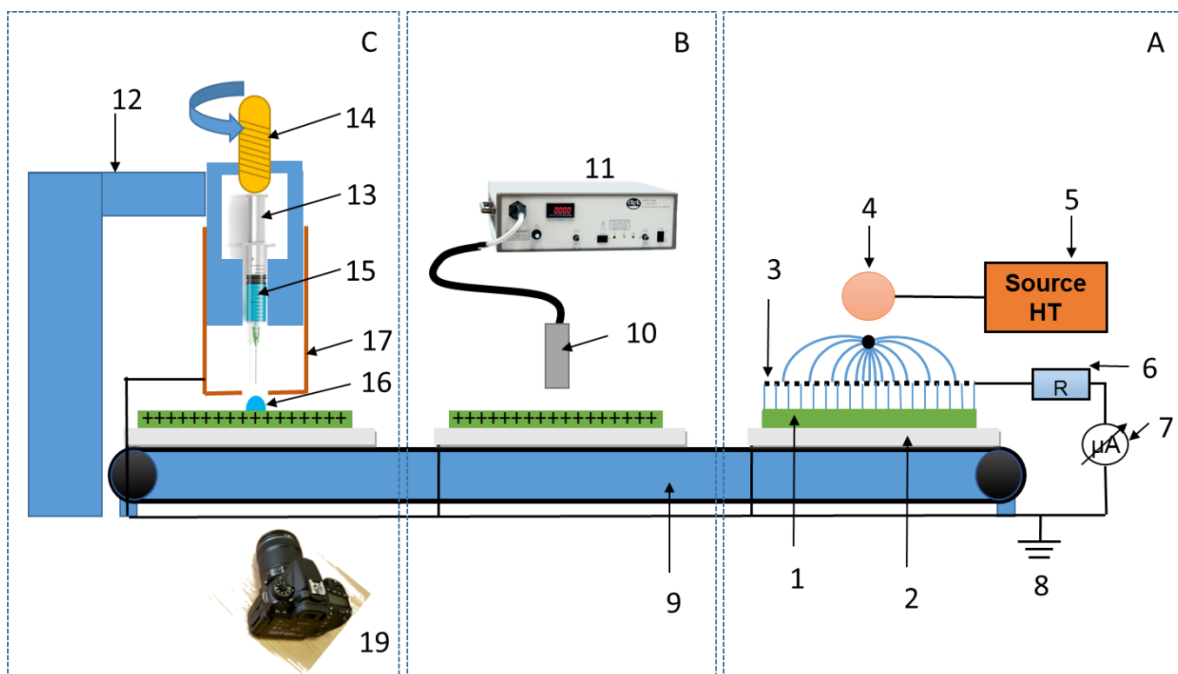


Figure II-11. Installation pour l'étude de l'angle de contact :

- 1 – Eprouvette ; 2 – Support métallique ; 3 – Grille métallique ; 4 – Electrode pour la génération de la charge par effet couronne ; 5 – Source haute tension ; 8 – liaison électrique à la terre ; 9 – Convoyeur ; 10 – Sonde électrostatique ; 11 – Voltmètre électrostatique ; 12 – Support seringue ; 13 – Seringue ; 14 – Système d'alimentation goutte à goutte ; 15 – Liquide ; 16 – Goutte ; 17 – Blindage ;

II-3 Instrumentation additionnelle

Nous décrivons ici les autres dispositifs et appareils utilisés pour caractériser ou encore pour préparer les éprouvettes.

II-3.1 Dispositif expérimental pour la mesure de la température de surface.

L'influence de la température sur l'effet électrostatique est connue [42,59]. La dissipation énergétique dans un contact glissant avec frottement génère une élévation de température. L'examen du champ de température permet d'identifier clairement les zones de contacts et de différences de pressions de contacts. Le comportement thermique sur la surface de l'éprouvette inférieure est scruté par le dispositif montré sur la figure II-12. Une caméra infrarouge FLIR E60 est orientée perpendiculairement à la surface de l'éprouvette. Elle est fixée sur un support (2) pour garder la même distance entre l'éprouvette et le système optique. L'instrument infrarouge est connecté à un ordinateur (3) pour la visualisation en temps réel et l'enregistrement des données. Cette mesure permet d'obtenir une cartographie du champ de température.

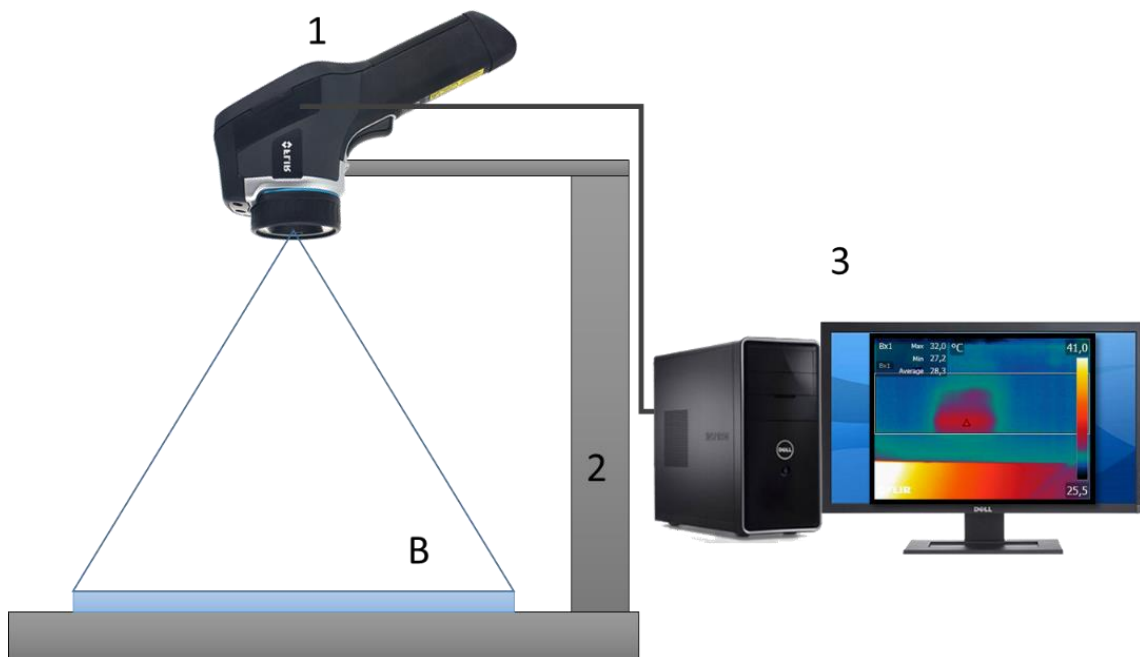


Figure II-12. Mesure de la température de surface :

B – Eprouvette inférieure ; 1 – Caméra infrarouge ; 2 - Support de la caméra ;
3 – Acquisition et visualisation des mesures ;

II-3.2 Instrumentation pour la métrologie de surface

La métrologie des éprouvettes est définie par deux instruments : un rugosimètre interférométrique confocal (Talysurf CCI 6000) et un rugosimètre avec contact, portable (Mitutoyo, model SJ-210) présentés sur la figure II-13. La mesure de rugosité est faite dans la direction du glissement. Les normes pour la mesure de la rugosité sont celles de la norme standard ISO 1997. Les conditions d'évaluation sont pour un profil de type R, avec un filtrage de type Gaussien. Le filtre passe-bas a une longueur d'onde $L_s = 8 \mu\text{m}$, et le filtre passe-haut une longueur $L_c = 2.5 \text{ mm}$. Le nombre d'échantillonnage est $N = 6$. Les mesures sont faites conformément aux recommandations et spécifications du fabricant [127–129].

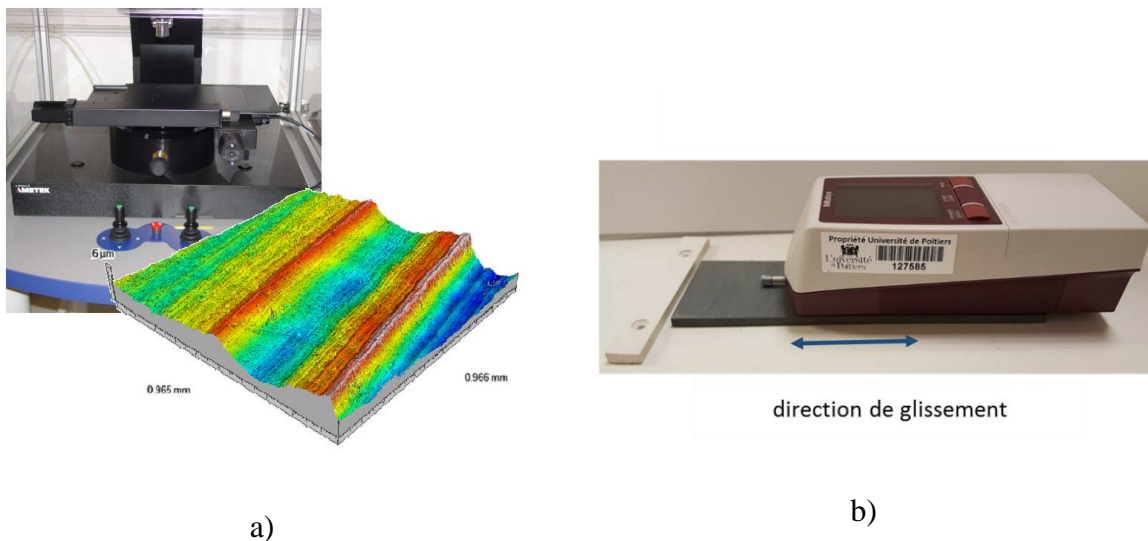


Figure II-13 Dispositifs pour la métrologie de la surface : a) rugosimètre interférométrique confocal ; b) rugosimètre avec contact.

II-3.3 Instrumentation pour la neutralisation de la charge résiduelle.

La manipulation et le transport des éprouvettes peuvent générer de charges électriques involontaires. Avant chaque expérimentation, les éventuelles charges résiduelles des éprouvettes sont éliminées avec le neutralisateur de charge (ELCOWA, model ECA88-BS), équipé d'un générateur à haute tension de 5 kV (ELCOWA model SC04B). Ce type de neutralisateur, présenté sur la figure II-14 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 parasites.

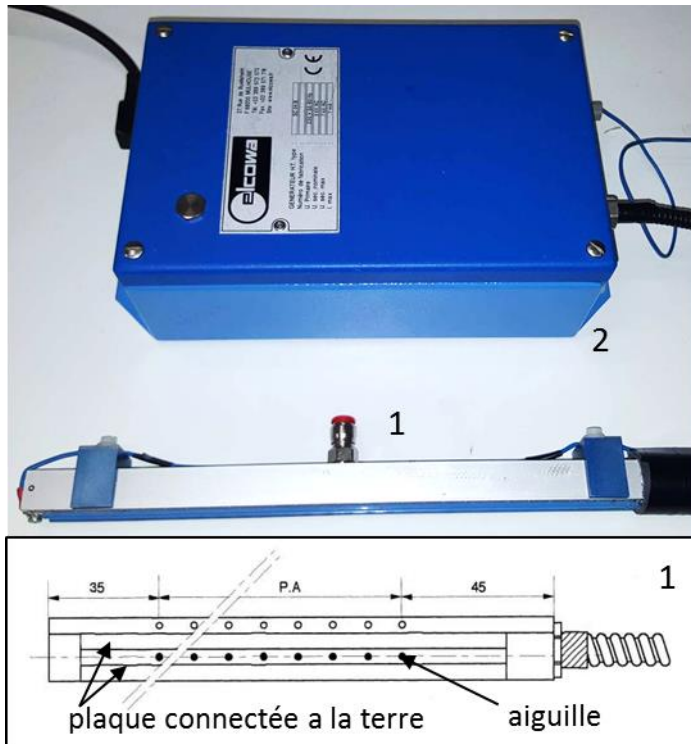


Figure II-14. Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle : 1 – Alimentation haute tension, 2 - Générateur d'ions positifs et négatifs.

II-3.4 Spectrométrie FTIR

La spectrométrie IR est une méthode de caractérisation rapide et sensible de la plupart des molécules existantes dans un échantillon. Très utilisée pour identifier la composition de matériaux non –métalliques, cette méthode donne un spectre de la mesure de la diminution de l'intensité du rayonnement qui traverse un échantillon en fonction de la longueur d'onde. Les structures chimiques des polymères utilisés dans nos travaux ont été identifiées à l'aide d'un spectromètre FTIR (Shimadzu modèle MIRacle 10), présenté sur la figure II-15. Le spectre obtenu est comparé aux spectres de plusieurs bases de données pour identifier le polymère de l'échantillon. Cette technique de spectrométrie a aussi été mise en œuvre pour analyser si la structure des matériaux change pendant les essais et tests réalisés. Les modifications de structure peuvent être dues au transfert de matière par frottement, usure, réaction chimique provoquée par les effets thermiques générés par un frottement local élevé ou encore à cause des porteurs de charges.

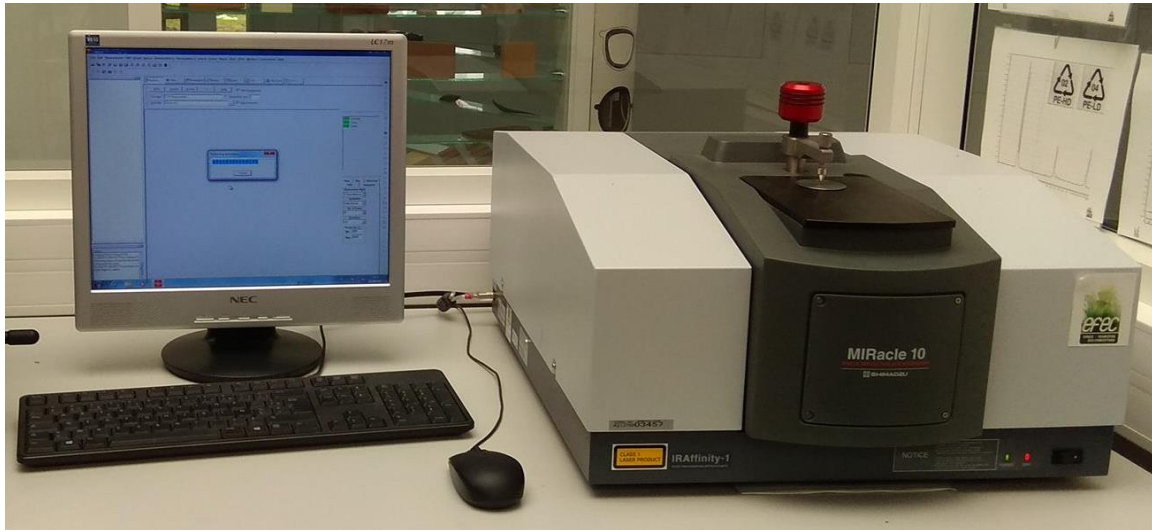


Figure II-15. Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.

II-4 Caractérisation et préparation des éprouvettes et des échantillons

Les choix des matériaux utilisés ont été faits en fonction de différents facteurs, principalement l'étendue de l'utilisation en industrie, l'accessibilité et le prix d'achat. Ils sont divisés en deux types, des éprouvettes polymères solides et des échantillons liquides.

II-4.1 Matériaux polymères

L'utilisation des polymères comme matériaux dans des mécanismes où les pièces sont en mouvement relatifs peut fournir beaucoup d'avantages qui ne peuvent pas être réalisées avec des céramiques ou des couches de revêtements. Les surfaces de contact de polymère peuvent suivre les déformations de substrat provoquées par le chargement mécanique ou thermique dans les paliers tout en réduisant le risque de décollement des matériaux dans le substrat[130]. Une autre caractéristique importante est leur propriété de « auto-lubrifiant » qui permet de supporter de courtes périodes de fonctionnement à sec ou peu lubrifié. Les polymères présentent beaucoup de propriétés favorables à leur utilisation, cependant l'usure, la basse conduction thermique, la déformation viscoélastique et l'absorption d'eau et l'humidité devraient être considérés avec attention lors de leurs choix dans la conception des mécanismes. La recherche présentée dans ce travail est principalement concentrée sur le comportement tribologique et électrostatique des matériaux polymères pour tenter d'aboutir à la compréhension des mécanismes impliqués dans la génération de charges électriques dans les contacts secs avec frottement et dans les contacts lubrifiés. [130]

Un polymère peut être défini simplement comme une matière constituée de plusieurs unités moléculaire dont la base contient du carbone, de l'hydrogène, de l'oxygène, et/ou du silicium [131]. Les matériaux polymères qui font l'objet de la présente étude sont au nombre de 6 (figure II-16) : un polystyrène (PS), deux types de polychlorure de vinyle (PVC), un acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et un polypropylène (PP).

Le PS est un polymère optiquement clair, bon marché, et facilement moulable. Il nous est familier comme matériau standard des boîtiers de CD. Dans sa forme la plus simple, le PS est cassant. En le mélangeant avec du polybutadiène, les propriétés mécaniques sont bien améliorées. Le PS à haute résistance à l'impact est beaucoup plus résistant même à basses températures (c'est à dire jusqu'à -12°C). La plus grande utilisation du PS est la mousse d'emballage.

Le PE est un polymère thermoplastique de masse qui représente une partie majeure de la consommation totale en polymères. Le polyéthylène est inerte et extrêmement résistant à l'eau douce et à l'eau salée, aux aliments et à la plupart des solutions basées sur l'eau. C'est la raison pour laquelle il est largement utilisé pour des articles ménagers, des récipients pour aliments. Le polyéthylène est bon marché et particulièrement facile à mouler et à mettre en œuvre. Il accepte une grande gamme de coloris, peut être transparent, translucide ou opaque. Il a un toucher plaisant, un petit peu cireux. Il peut être texturé ou métallisé.

Le PVC est un des polymères les moins chers et les plus polyvalents. Avec le polyéthylène, il est le plus largement utilisé des polymères. C'est un polymère thermoplastique, rigide et pas très résistant aux chocs. Son bas prix en fait un plastique économique pour des applications où les conditions de service ne sont pas très contraignantes. Il existe du PVC rigide et du PVC flexible qui peuvent tous deux être moussés pour la réalisation des panneaux légers. Le PVC peut également être mélangé avec d'autres polymères pour élargir la gamme des propriétés.

L'ABS est solide, résilient et facile à mouler. Il peut être soumis à des cycles de chauffe et de refroidissement sans dégradation significative. L'ABS est normalement opaque et on peut lui donner des couleurs vives, cependant certains grades peuvent être transparents. Les alliages ABS-PVC sont plus solides que les ABS standards. Il a une multitude d'utilisations : instruments de musique, composants d'automobiles notamment les pare-chocs, boîtiers pour les assemblages électriques et électroniques, valises de voyages, bagages et étuis de protection. Récemment, l'ABS est utilisé pour l'impression 3D.

La PP standard est bon marché, léger et ductile mais il a une faible tenue mécanique. Il est plus rigide que le PE et peut être utilisé à plus hautes températures. Les propriétés du PP sont semblables à celles du PEHD mais il est plus rigide et fond à une température plus élevée (165-170°C). Sa rigidité et sa résistance mécanique peuvent être améliorées en le renforçant avec des fibres de verre, de la craie ou du talc. 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 que le PE, a une bonne transparence et peut accepter une gamme plus large et plus vive de couleurs. Le PP est couramment produit sous forme de feuilles, de produits moulés et de fibres; il peut également être moussé.

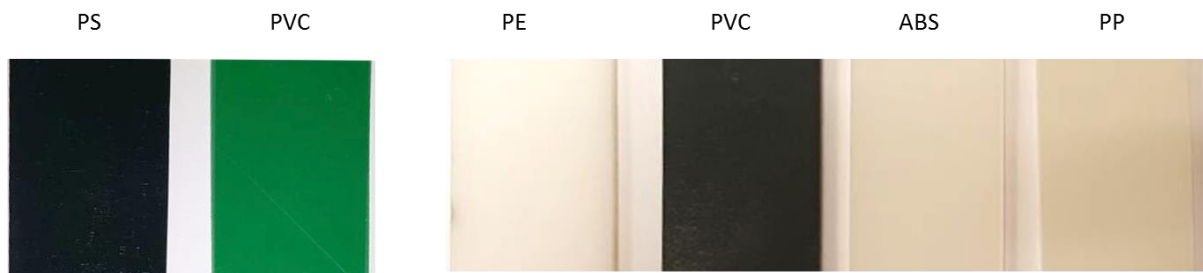


Figure II-16. Polymères utilisés.

Les propriétés mécaniques, électriques et thermiques peuvent influencer les comportements électrostatiques et/ou tribologiques des matériaux. Notons par exemple que la rugosité peut influencer significativement le coefficient de frottement et le niveau de charge générée [59]. Les différentes conductivités thermiques impactent l'état d'échauffement et l'évolution du champ thermique généré par frottement sec. La résistivité électrique a une influence sur le déclin de charges électriques [111].

Tableau II-2. Propriétés mécaniques, électriques et thermiques

	PS	PVC1/ PVC2	PE	ABS	PP
Module de Young [MPa]	1200- 2600	2140- 4140	621-896	1100 - 2900-	896- 1550
Dureté Vickers [HV]		15.29			16,7
Conductivité thermique [W/m.°C]	0,121- 0,131	0,147- 0,293	0,403- 0,435	0,188 -	0,113- 0,167
Résistivité électrique [ohm m]	1e17- 1E19	1E12- 1E14	3,3E14- 3E16	3,3E2 1 3E22-	3,3E14- 3E15
Permittivité relative	3,0 - 3,2	3,1 -4,4	2,2 -2,4	2,8 – 3,2-	2,1-2,3
Rugosité R _a initial [μm]	-	-	-	0,5 ± 0,1	0,1 ± 0,02

Les polymères ont des compositions chimiques différentes qui sont caractérisées par de liaisons des molécules spécifiques pour chacun. Des liaisons carbone-carbone de la chaîne de polymère peuvent être cassées quand le polymère est soumis à une décharge électrique [132], déformé, usé ou encore dégradé. Ces mécanismes peuvent générer des électrons libres qui favorisent la triboélectrification. Une investigation chimique est faite avec un spectromètre FTIR pour analyser les éventuelles changements de la composition de polymères. Les spectres infrarouges des polymères étudiés sont donnés dans la figure II-17.

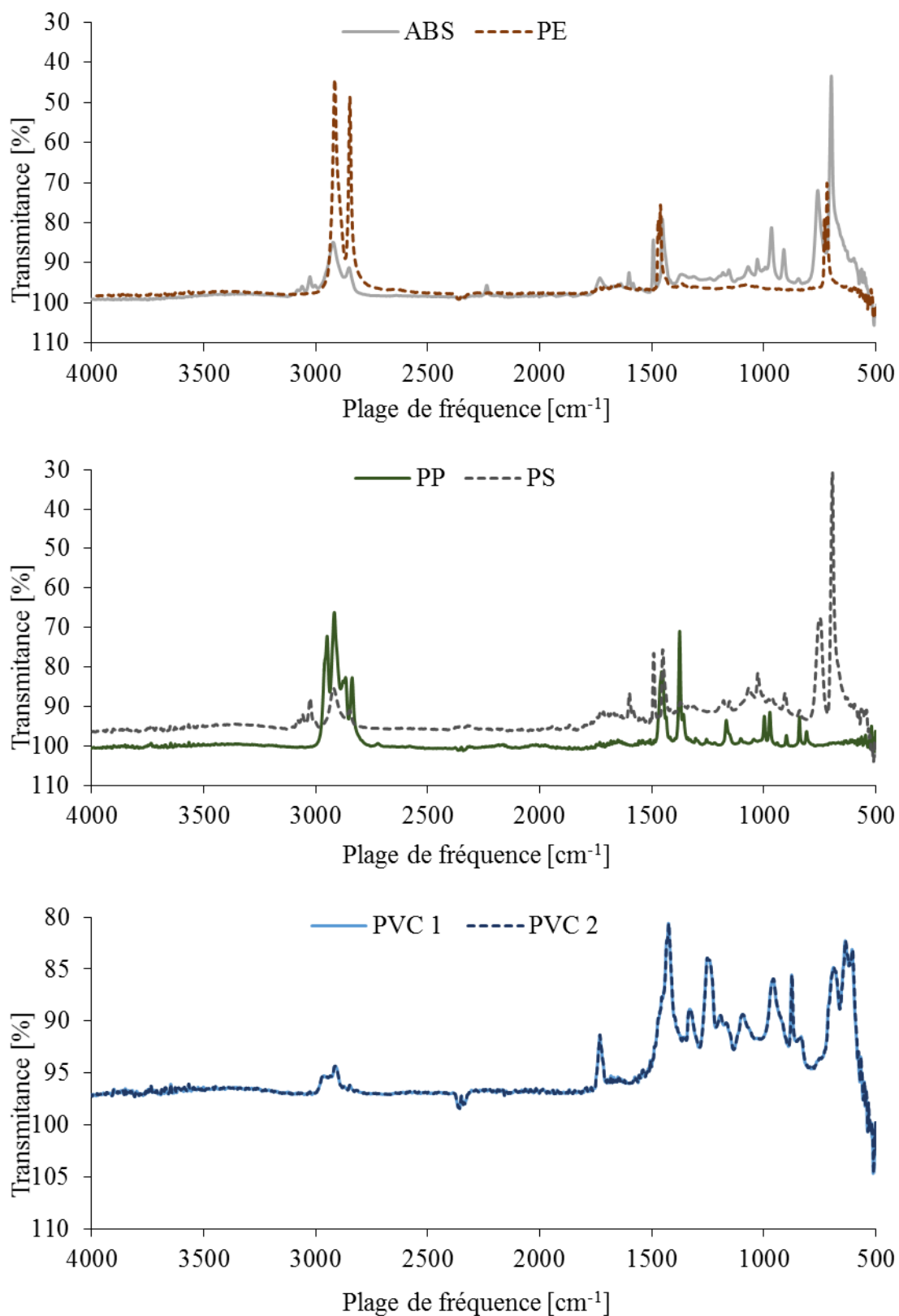


Figure II-17. Spectres infrarouges des polymères utilisés.

II-4.2 Préparation des éprouvettes.

Les polymères utilisés, livrés en plaques de 1 m x 2 m, ont été découpées par jet d'eau en éprouvettes en 5 différentes formes (figure II-18). L'épaisseur de chaque éprouvette est de l'ordre de 5 mm sauf pour l'ABS qui a une épaisseur d'environ 6 mm.

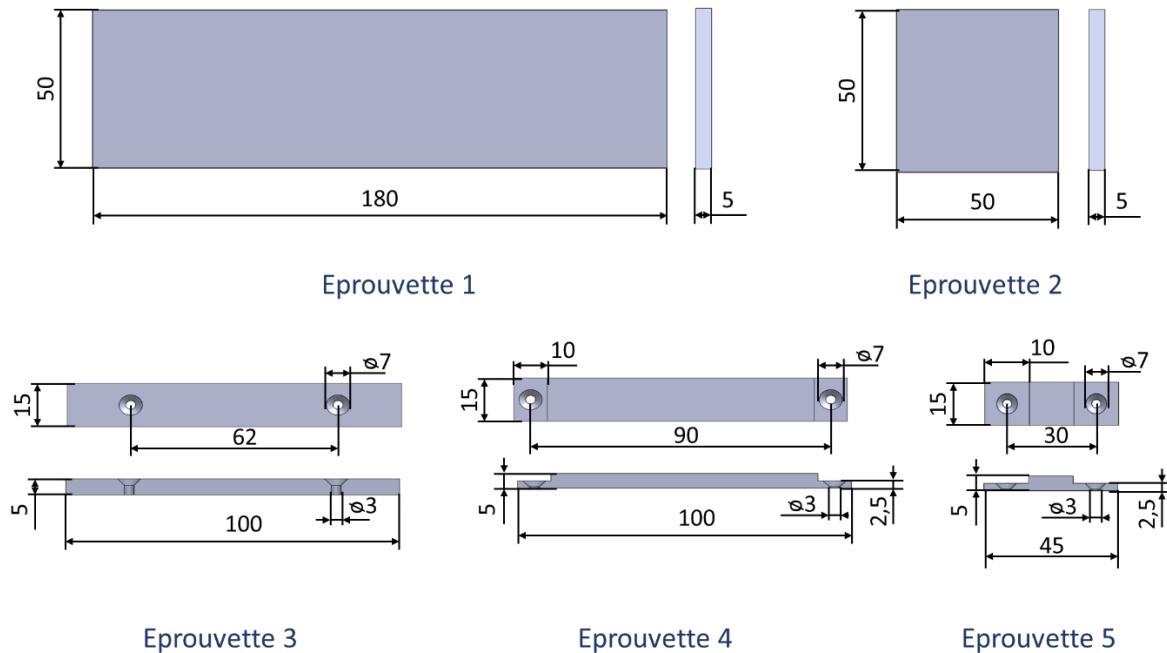


Figure II-18. Géométries et dimensions des éprouvettes utilisées.

La configuration de contact entre les éprouvettes est importante lorsqu'on souhaite étudier différentes étendues de zones de contacts. Quatre configurations ont été utilisées, les éprouvettes 1 et 3, 1 et 4, 1 et 5, et 2 et 3 (figure II-19). L'éprouvette 2 est plus petite pour réduire le temps nécessaire à réaliser la cartographie du potentiel électrique de surface. La configuration c) a la plus grande zone de contact permanent avec l'éprouvette supérieure.

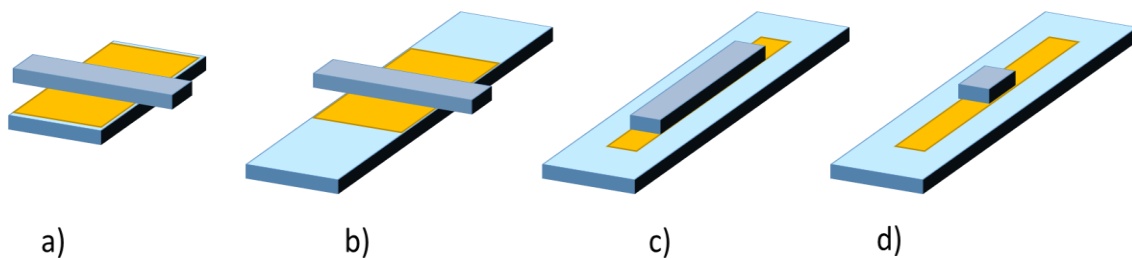


Figure II-19. Configurations de contact entre éprouvettes.

Le nombre de points de contact est aussi un paramètre influant de la génération de charge électrique [59]. Pour obtenir différents états d'aspérités, les surfaces des éprouvettes ont été traitées par des disques abrasifs avec trois types de granulation (425 μm , 201 μm et 125 μm), comme montré sur la figure II-20.

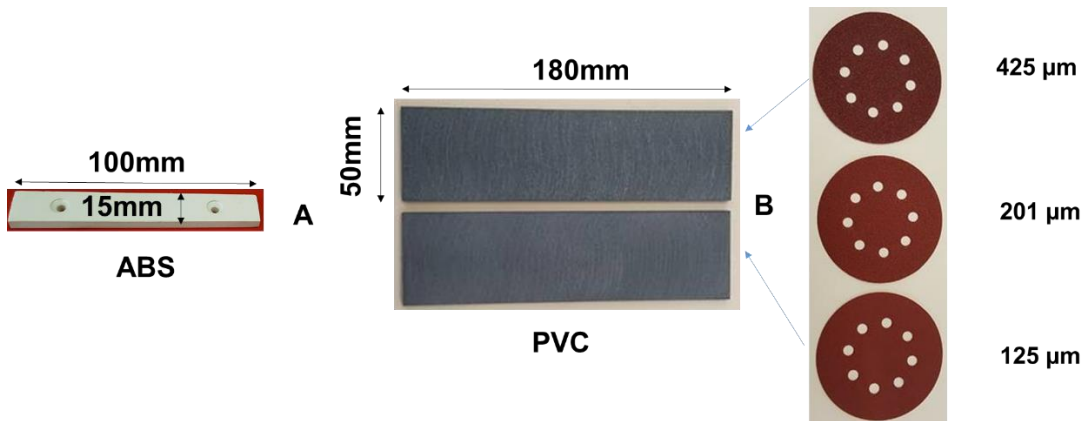


Figure II-20. Génération de différents états d'aspérités.

II-4.3 Lubrifiants

Le comportement triboélectrique des polymères en conditions lubrifiées peut différer de manière significative des contacts secs. Les lubrifiants peuvent interagir avec les surfaces en contact et changer le comportement des contacts entre les polymères. Les phénomènes de surface tels que l'adsorption, l'absorption de lubrifiant, ou encore la plastification, les effets thermiques et la tribo-corrosion en présence de lubrifiant sont quelques facteurs susceptibles d'affecter le comportement triboélectrique des polymères en contacts lubrifiés. Bien que cette configuration de contact constitue un potentiel significatif d'utilisation des polymères peu d'études ont été entreprises en présence d'un lubrifiant. Notons que des bio-lubrifiants sont de plus en plus utilisés [130].

Pour cette étude trois types des lubrifiants ont été envisagés : l'eau distillée et deux types d'huiles ISO VG 46 et Total Activa 5000 15W40. L'eau comme lubrifiant est favorable à l'environnement, non-toxique, facilement disponible et a une capacité de chaleur spécifique plus élevée comparée aux huiles typiques de turbine[133]. Cependant, la faible viscosité de l'eau en limite l'utilisation dans des conditions sévères de fonctionnement (figure II-21). Toutefois, des applications peuvent être trouvées dans des machines utilisées dans l'industrie alimentaire et pharmaceutique, l'exploitation minière, les machines de fabrication de textiles et des dispositifs submergés et pompes pour le traitement des liquides [134].

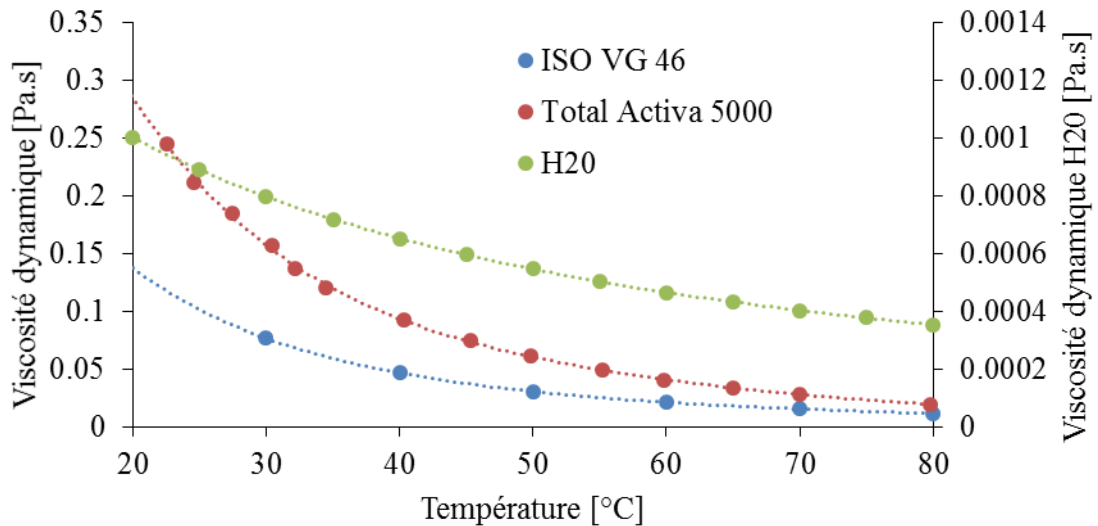


Figure II-21. Viscosité dynamique.

Les ressources limitées des lubrifiants issus du pétrole conjuguées à la pollution de l'environnement mènent à une exigence accrue pour l'utilisation de biolubrifiants. Les caractéristiques de biodégradabilité, de bonnes propriétés lubrifiantes et de bas coûts de production font des huiles végétales une bonne alternative pour remplacer les huiles issues du pétrole [135,136]. Le lubrifiant ISO VG 46 est un lubrifiant végétal utilisé sur de différentes applications de recherche réalisées au sein de l'Institute PPRIME [137].

Les lubrifiants classiques dont les additifs améliorent leurs performances sont très utilisés en raison de remarquables propriétés anticorrosion, anti-rouille, anti-mousse et de protection contre l'usure. Leur excellent niveau de résistance aux hautes températures sans changer leurs propriétés favorise leur utilisation dans beaucoup de domaine de l'industrie notamment dans des conditions sévères de fonctionnement. Le lubrifiant Total Activa 5000 15W40 tel que caractérisé antérieurement [138] présente la meilleure viscosité dynamique dans la plage de température ambiante des essais réalisés.

II-5 Conclusions

Ce chapitre est dédié à la description des installations et de l'instrumentation nécessaires pour caractériser le glissement des polymères, en rapport avec le processus de triboélectrification.

1. Le banc expérimental est capable de caractériser les conditions dynamiques pendant le glissement pour un contact plan/plan pour différentes éprouvettes en polymère. Les expériences peuvent être réalisées avec divers matériaux, pour de larges écarts des forces normales appliquées et des vitesses relatives de déplacement.
2. Les installations permettent d'étudier le contact sec et lubrifié pour différents polymères et lubrifiants.
3. Plusieurs techniques de mesure peuvent être mises en œuvre pour évaluer l'efficacité des dispositifs de génération de charge par effet triboélectrique et pour étudier l'effet de celle-ci sur le frottement.
4. Des dispositifs et des instruments spécifiques facilitent la mesure de l'angle de contact afin de mettre en évidence l'influence de la charge à l'interface solide-liquide.

Chapitre III Caractérisation de l'état de charge électrique des plaques polymères

Les mesures de densité surfacique de charge électrique (DSCE) ont été souvent utilisées par les chercheurs depuis les années 70 pour inspecter le vieillissement de l'isolation électrique, caractériser les propriétés des films en polyéthylène et des diélectriques fibreux, évaluer les risques électrostatiques, développer des électrets ou encore ajuster le processus de Xerox-photographie [116,120,139–143]. Ces mesures sont essentielles pour connaître la distribution de charge produite par le frottement et caractériser le comportement tribologique des contacts glissants dans les constructions mécaniques ou l'efficacité des générateurs triboélectriques [87,144].

Un instrument comme le microscope à force atomique peut réaliser une cartographie très fine de la distribution de charge, mais il serait totalement inefficace pour étudier les grandes plaques de polymères utilisées de cette étude. Des dispositifs de type « cage de Faraday ouverte » pourraient caractériser l'état global de charge électrique, mais pas la distribution surfacique de celle-ci. La solution choisie est de mesurer le potentiel électrique associé à une distribution de charge électrique en utilisant des sondes électrostatiques, avec ou sans contact, ayant des résolutions de l'ordre du mm^2 et la capacité d'examiner des surfaces de l'ordre de plusieurs dizaines de cm^2 . Les sondes électrostatiques sans contact présentent l'avantage de ne perturber que très faiblement l'état électrostatique de l'objet investigué [37,62,145–148].

La technique la plus utilisée pour la mesure du potentiel électrique sans contact avec la surface étudiée fait appel à la sonde vibrante, qui avait été introduite pendant les années 1960 [145] et plus tard développée pour réaliser la cartographie de la densité surfacique de charge électrique [146]. Une électrode de surface connue est vibrée dans le champ électrique produit par la charge. Ceci induit un signal proportionnel à la DSCE.

La sonde à induction électrostatique auto-compensée (SIEAC) est la variante la plus répandue de ce dispositif. Les circuits électroniques du voltmètre électrostatique ajustent le potentiel électrique de la carcasse métallique de la sonde à une valeur qui annule le champ électrique à proximité de l'électrode vibrante. Quand la surface étudiée est un plan équipotentiel (par exemple, une plaque métallique connectée à une certaine tension) et la sonde est proche d'elle (c.-à-d., moins de 3 mm, selon les spécifications du fabricant), le champ électrique peut être considéré comme uniforme.

L'état de champ électrique nul implique que la différence de potentiel entre la carcasse de la sonde et la surface investiguée est nulle. Le potentiel électrique mesuré par le voltmètre électrostatique est égal à celui de la surface [149–152].

La situation est beaucoup plus compliquée quand la sonde est utilisée pour examiner des isolants à la surface desquels la charge électrique est non-uniformément distribuée. La géométrie du système constitué par la sonde et l'objet étudié peut influencer les mesures. Dans ce cas-ci, une principale recommandation est de garder une distance minimum entre le corps mesuré et la sonde [153,154].

La SIEAC étant devenue le standard pour les mesures de potentiel de surface sans contact [155], le but de ce chapitre est d'élaborer une méthodologie d'utilisation de ce dispositif pour évaluer la densité de charge électrique à la surface des plaques en polymère [62]. Le défi est d'interpréter les résultats des mesures faites dans les situations où la charge électrique est non-uniformément distribuée sur la surface des éprouvettes à l'étude.

D'autres méthodes de mesure de la charge électrique ont été développées dont la cage Faraday, des instruments de mesure simultanée de charge et de masse ou encore le microscope à force atomique. Chaque méthode a ses propres avantages et inconvénients. Par exemple la microscopie à force atomique peut sonder la densité de charge localement avec une résolution élevée, mais elle consomme beaucoup de temps et ne peut couvrir qu'une petite surface [156]. La cage Faraday mesure une charge globale.

La démarche adoptée dans notre travail s'appuie sur l'utilisation de deux dispositifs de mesures, la SEIAC et la cage Faraday, décrits dans le sous-chapitre III-1. Les deux méthodes conviennent aux dimensions des éprouvettes. Une méthodologie de mesure du potentiel de surface et de la charge électrique associée avec une méthode de calcul est développée pour le calcul de la charge. La méthodologie qui présente une augmentation de la résolution de densité de charge électrique est détaillée dans les sous-chapitres III-2 et III-3.

III-1 Dispositifs de mesure

III-1.1 Dispositifs de mesure de la charge électrique totale

Un dispositif très utilisé pour la mesure de la charge électrique est la cage de Faraday, grâce notamment à sa simplicité. Elle est constituée de deux récipients métalliques, l'un à l'intérieur de l'autre, séparés par un isolant. Le récipient extérieur est relié à la terre pour isoler le récipient

intérieur des perturbations électriques présentes dans le milieu environnant. Le récipient intérieur est connecté à un électromètre et joue le rôle de capteur de charge. En effet, l'électromètre va indiquer la charge électrique des corps qui sont introduits à l'intérieur de ce deuxième récipient. [157,158]

Les mesures de la charge électrique globale des éprouvettes (A) et (B) sont faites respectivement à l'aide des cages de Faraday (1) et (2), connectées à des électromètres Keithley 6514 (3) et (4), comme montré sur la figure III-1. Les signaux sont envoyés vers la carte d'acquisition (5) qui est connectée à l'ordinateur (6). Cette méthode de mesure globale de la charge présente l'inconvénient de ne pas permettre la mesure de la distribution et du déclin de la charge électrique à la surface des isolants.

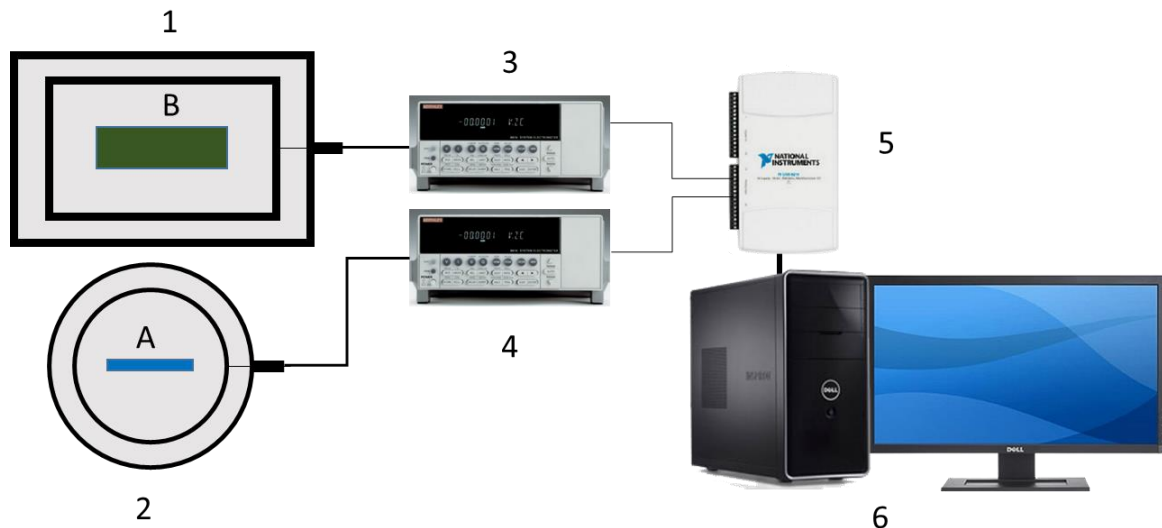


Figure III-1. Mesure de la charge totale :

A – Epreuve supérieure ; B – Epreuve inférieure ; 1,2 – cages de Faraday ; 3, 4 - électromètres Keithley 6514, 5 - carte d'acquisition NI USB 6210 ; 6 – Ordinateur avec interface d'acquisition Labview.

III-1.2 Dispositifs de mesure du potentiel électrique de surface

La mesure du potentiel électrique de surface est une méthode qui permet d'avoir une vision sur la distribution surfacique de la charge électrique [150,159,160].

L'installation pour cette mesure (figure III-2) est composée du support inférieur (1) sur lequel l'éprouvette (B) est placée, pour être en contact avec une plaque métallique liée à la terre et par rapport à laquelle le potentiel électrique est mesuré. Ce support est le même que celui du

tribomètre linéaire; il est mobile et permet ainsi le déplacement de l'éprouvette (B) entre les deux installations, celle qui effectue le chargement électrostatique par frottement et celle qui fait la mesure du potentiel électrique de surface. Le fait de disposer du même support nous permet d'identifier la position de mesure du potentiel électrique de surface par rapport aux zones de contact. Le support (1) est placé sur le module de fixation (2), solidaire avec la table mobile (3), qui a un mouvement de translation sur l'axe Y. La sonde électrostatique (4) entourée d'un support isolant (5) est fixée sur le bras mobile (6). Le bras a des mouvements de translation selon les axes X et Z. La table mobile et le bras font partie d'un système de positionnement 3-axes piloté par l'ordinateur (9). La sonde à induction électrostatique auto-compensée de marque TREK, modèle P0865, est connectée à un voltmètre électrostatique (TREK, modèle 341B) qui réalise la conversion du signal. L'ensemble, sonde - voltmètre, peut mesurer un potentiel dans la gamme 0 à ± 10 kV, avec une précision supérieure à $\pm 0,1\%$. La vitesse de réponse est supérieure à $0,2 \text{ ms} / 1 \text{ kV}$. La distance entre la sonde et l'éprouvette est gardée à 3 mm conformément aux spécifications et recommandations du constructeur. Le signal analogique à la sortie du voltmètre électrostatique (7) représente le potentiel électrique mesuré par la sonde électrostatique, diminué 1000 fois et envoyé à une carte d'acquisition NI USB 6210 (8). L'acquisition des données se fait à l'aide d'un ordinateur avec une interface réalisée en Labview.

La cartographie du potentiel électrique peut être faite en utilisant deux méthodes. La première est une méthode « point par point »: la sonde est placée à une position précise et prend une mesure après un temps de 0,5 s. Ce temps permet à la sonde de se stabiliser pour réaliser une mesure précise du potentiel. Dans la deuxième méthode, dite « dynamique » ou « à balayage », la sonde prend une multitude de mesures, avec une fréquence d'échantillonnage fixe (F_e), en se déplaçant à une vitesse constante (v_d). La position de la mesure est dépendante de la fréquence d'échantillonnage et de la vitesse de déplacement. Le pas (p) entre deux mesures est donné par la relation (III.1):

$$p = \frac{v_d}{F_e} \quad (\text{III.1})$$

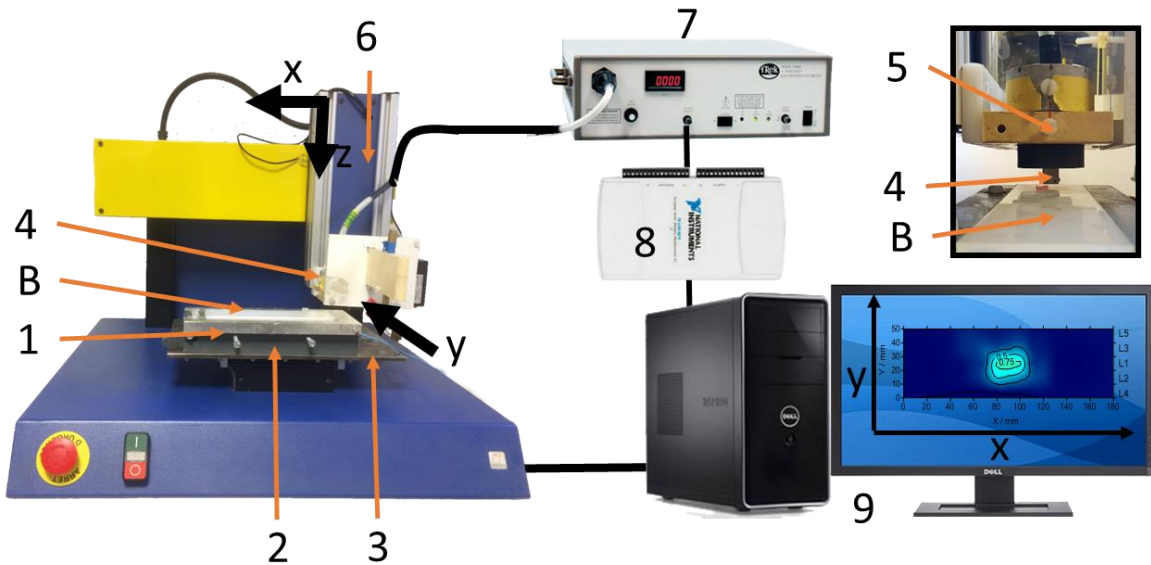


Figure III-2. Banc expérimental pour la mesure du potentiel électrique de surface ;

B- Epreuve inférieure; 1 – Support de l'éprouvette inférieure; 2 - Module de fixation pour le support de l'éprouvette inférieure ; 3 – Table mobile sur axe Y; 4 – Sonde électrostatique ; 5 – Support sonde ; 6 - Bras mobile sur deux axes, X et Z ; 7 – Voltmètre électrostatique ; 8 - Carte acquisition NI USB 6210 ; 9 - Ordinateur avec interface d'acquisition Labview.

La résolution spatiale ou le pas entre deux mesures (p) est un facteur important pour déterminer la capacité du voltmètre électrostatique à suivre les variations rapides du potentiel réel à la surface d'un échantillon présentant une distribution de charge non uniforme [76].

L'interprétation des mesures du potentiel est un problème auquel plusieurs chercheurs se sont confrontés [150,154,159,161], dans leurs tentatives de trouver une relation avec la distribution de charge sur les isolants. Une analyse détaillée est faite dans le chapitre suivant, où une méthodologie est développée pour estimer la densité surfacique de charge électrique (DSCE).

III.1. 3. Principe de la méthode de mesure « multipoints »

Deux problèmes doivent être résolus pour permettre l'utilisation de la SIEAC pour des mesures de DSCE :

- (1) obtenir la cartographie de la distribution réelle du potentiel électrique sur la surface du corps à étudier ;
- (2) déterminer le ratio de conversion de la valeur locale du potentiel électrique en une densité surfacique de charge électrique.

Le premier problème est très difficile, car la valeur indiquée par la SIEAC reliée à un voltmètre électrostatique dépend de la distribution du potentiel électrique (ou de la charge électrique) sur une certaine zone « vue par la sonde » [150,159]. La contribution de la valeur locale du potentiel électrique (ou de la charge électrique) dans la zone proche de l'axe central de la sonde est plus importante que celle des secteurs plus éloignées.

Une méthode simplifiée dite « multipoints » permet réduire la géométrie à un plan de densité de charge et un point de calcul pour le potentiel à une telle position. Le transfert entre la distribution de charge et le potentiel à une certaine position est modélisé par une fonction déterminée expérimentalement ou numériquement [159].

La géométrie des éprouvettes pour cette étude est réduite à des parallélépipèdes rectangles. Les charges par effet triboélectrique et par effet couronne étant des phénomènes de surface, la distribution de charge sera aussi surfacique.

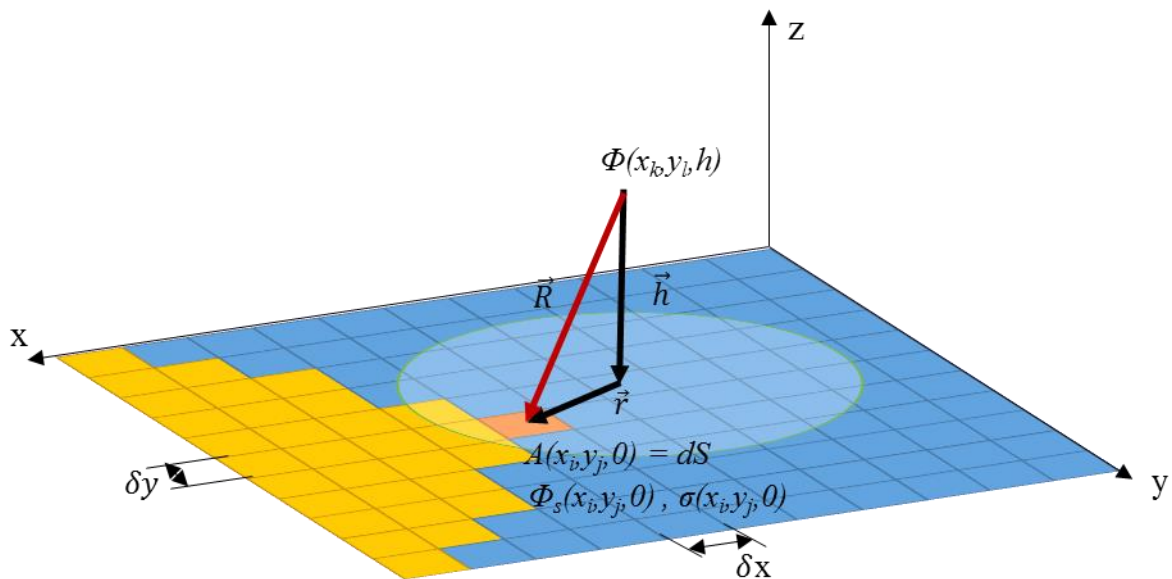


Figure III-3. Calcul du potentiel de surface.

Plusieurs chercheurs ont abordé ce problème utilisant une technique de mesure « multipoints » [154,155,157,159,160], selon laquelle la surface est divisée en un grand nombre de secteurs élémentaires, et le potentiel lu par la sonde est lié au vrai potentiel de chaque secteur par une fonction de transfert similaire à la fonction de Green [159]. La méthodologie décrite ci-après a été inspirée par leurs travaux.

Ainsi, la sonde mesure le potentiel électrique au-dessus de chaque élément (figure III-3). Ces éléments ne doivent pas avoir impérativement une forme carrée, mais ils devraient être suffisamment petits pour que le potentiel électrique puisse être considéré constant. Selon le principe de superposition, le potentiel mesuré par une sonde à une coordonnée donnée est la somme des contributions de chaque élément de surface, dont la position est définie par les coordonnées du centre géométrique de sa surface.

Pour une géométrie connue, la relation entre le potentiel $\Phi(x_k, y_l, h)$ lu par la sonde dans les coordonnées (x_k, y_l, h) , et le potentiel $\Phi_S(x_i, y_j, 0)$ d'une petite surface quelconque $A(x_i, y_j)$ de centre géométrique $(x_i, y_j, 0)$, est exprimé: par ;

$$\Phi(x_k, y_l, h) = A(x_i, y_j, 0) \cdot \Phi_S(x_i, y_j, 0) \cdot f(x_k - x_i, y_l - y_j, h) \quad (\text{III.2})$$

Où $f(x_k - x_i, y_l - y_j, h)$ est la fonction de transfert entre Φ et Φ_S .

Cette fonction est dépendante du vecteur \vec{R} qui définit la position relative du centre de la surface en rapport avec la sonde (figure III-3). Si la surface inspectée est divisée en secteurs égaux, la relation entre le potentiel lu par la SIEAC et la valeur réelle du potentiel de surface peut être définie comme une équation matricielle:

$$\Phi = A \cdot F \cdot \Phi_S \quad (\text{III.3})$$

Où Φ est une matrice de dimensions (v, I) qui inclut le potentiel de la sonde aux positions données, A est une constante égale à la valeur de l'aire de la surface investiguée; Φ_S est une matrice de dimensions (w, I) , composée des valeurs du potentiel dans chaque surface élémentaire, F est la matrice des valeurs calculées, qui lie chaque coordonnée où le potentiel de la sonde est défini avec chaque coordonnée de secteur élémentaire sur la surface, par la fonction de transfert f . La dimension de la matrice F est (v, w) . Si la matrice F est connue, l'équation (III.3) peut être employée pour calculer Φ_S , utilisant différentes méthodes de calcul matriciel.

La fonction de transfert f est déterminée par une approche expérimentale décrite dans la partie suivante.

III-2 Mesure du potentiel électrique de surface

Pour faciliter l'interprétation du potentiel électrique donné par le voltmètre quand la sonde balaye la surface d'isolants non-uniformément chargés, des configurations

expérimentales simples ont été utilisées. Dans les paragraphes suivants les installations sont décrites ainsi que le procédé pour l'interprétation de la mesure du potentiel.

III-2.1 Mesure du potentiel électrique à la surface des conducteurs

Une expérience simple a été réalisée pour identifier la taille et la forme du secteur « vu par la sonde », quand elle est située à une distance donnée ($h_N = 3$ mm) de la surface étudiée. La surface d'une carte électronique (circuit imprimé) a été divisée en deux zones, électriquement isolées entre elles. La sonde, en mouvement de translation, balaye les deux zones sur une distance de 20 millimètres. Une première zone a un potentiel fixe de 500 V, tandis que la deuxième est reliée à la terre (figure III-4. a). L'expérience a été répétée 8 fois, en tournant chaque fois la sonde autour de son axe de symétrie de 45° par rapport à la position précédente. Cette expérience a comme but de détecter une éventuelle dissymétrie de mesure de la sonde.

La deuxième série d'expériences a été effectuée pour évaluer l'effet de la distance entre la sonde et la surface métallique. La carte de circuit imprimé utilisée dans cette expérience présentait deux zones circulaires de diamètres $D_1 = 2$ mm et $D_2 = 10$ mm, reliées à un potentiel constant de 500 V. Ces zones étaient électriquement isolées du reste de la carte, qui a été mise à la terre. La sonde a été placée avec le capteur parfaitement sur le centre de chaque disque. La distance h entre la sonde et la surface mesurée a été variée de 0,5 mm à 10 mm par pas de 0,1 mm (figure III-4. b).

Une troisième expérience (figure III-4. c) a été conduite avec une carte de circuit imprimé présentant deux disques, de diamètres $D_3 = 35$ mm et $D_4 = 2$ mm, reliés également à un potentiel de 500 V. La sonde a été utilisée pour scanner le potentiel électrique sur la surface. La résolution de la cartographie était de 0.05 millimètres dans la direction de X et de 1 millimètre dans la direction de Y.

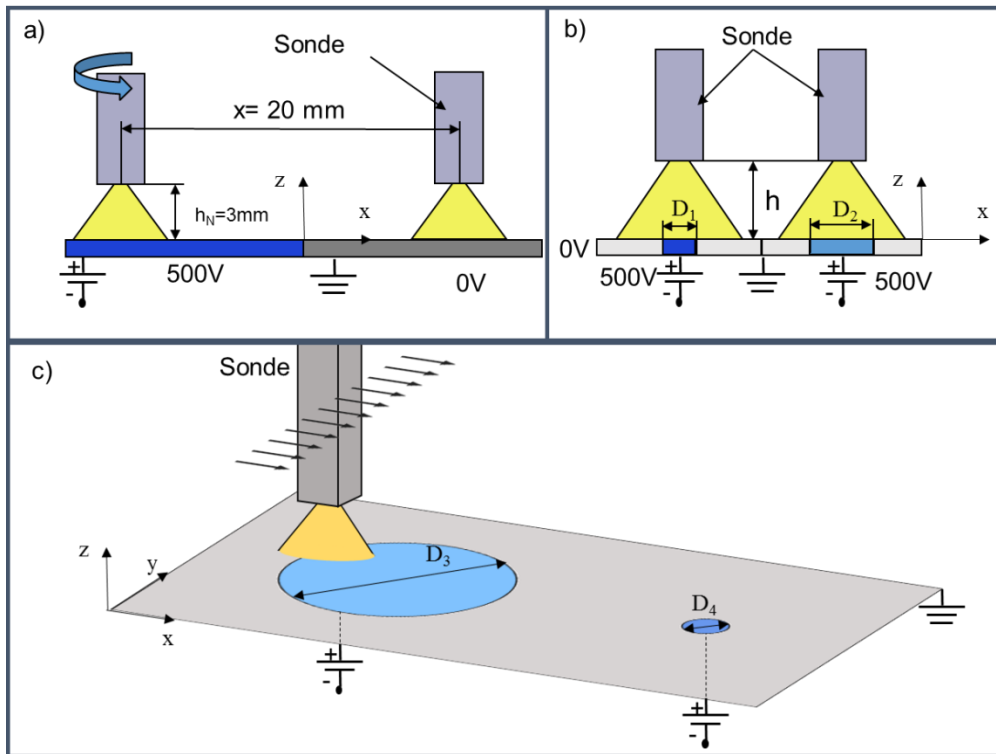


Figure III-4. a) Ensemble expérimental pour étudier la transition entre deux zones avec deux potentiels différents ; b) Ensemble expérimental pour déterminer l'influence de la distance de la sonde à la surface investiguée c) Ensemble expérimental pour la cartographie du potentiel généré par deux disques métalliques.

La première expérience a indiqué que le secteur « vu par la sonde » a une forme circulaire. En effet, les huit courbes donnant la variation du potentiel mesuré pour les huit positions angulaires de la sonde ont le même profil (figure III-5). La sonde a lu un potentiel de 500 V de la position initiale $X = -10 \text{ mm}$ jusqu'à $X = -5 \text{ mm}$. Ensuite, la valeur donnée par le voltmètre électrostatique a progressivement diminuée, pour atteindre 0 V à $X = 5 \text{ mm}$. Ceci nous indique le fait que la zone « vue par la sonde » a un diamètre de 10 mm .

Les résultats de la deuxième série d'expériences sont représentés sur la figure III-6. L'aspect des courbes obtenues pour les deux disques ($D_1 = 2 \text{ mm}$, $D_2 = 10 \text{ mm}$) reliés à 500 V suggère que les valeurs du potentiel électrique dans la zone périphérique du secteur « vu par la sonde » ont moins d'importance que ceux au centre. Cette observation est importante pour l'interprétation des mesures faites sur des échantillons non uniformément chargés.

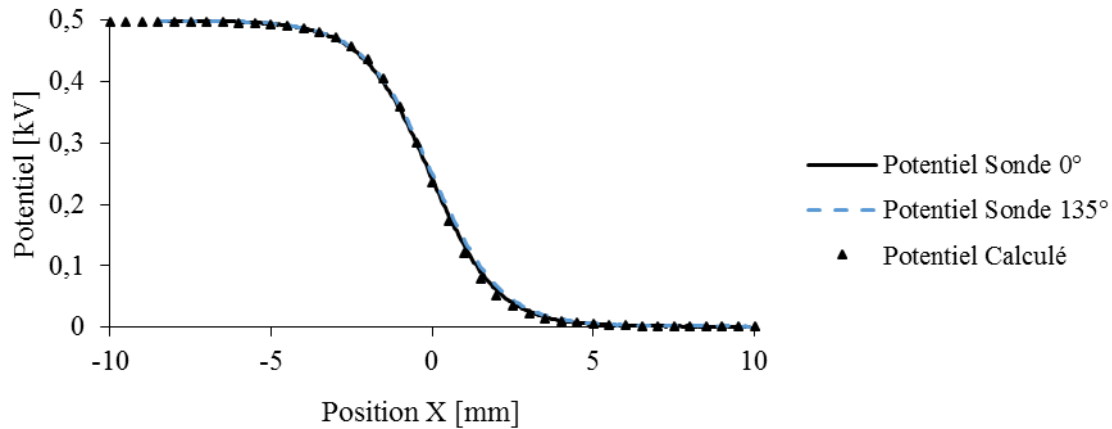


Figure III-5. Transition entre deux zones de potentiels 500 V et 0 V pour deux positions angulaires différentes et par calcul du potentiel utilisant la fonction de transfert.

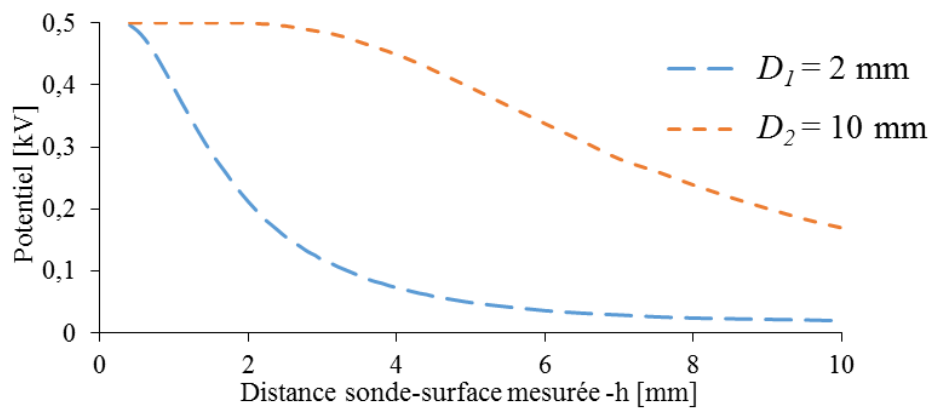


Figure III-6. Influence de la distance sonde-surface investiguée.

La troisième série d'expériences a mis en évidence la différence qui existe entre la cartographie du potentiel donné par la sonde électrostatique et sa répartition réelle (figure III-7). La transition de 500 V à 0 V s'est faite progressivement sur une distance qui correspond au diamètre du secteur « vu par la sonde ». Dans la section faite à $Y = 15$ mm (figure III-8), toutes les valeurs du potentiel lues par la sonde étaient inférieures à 500 V. En effet, à n'importe quel point sur $Y = 15$ mm, la sonde a simultanément vu les zones de 0 V et de 500 V. La cartographie du potentiel de surface pour le disque de $D_1 = 2$ mm est donnée sur la figure III-7 b. La sonde ne peut pas voir le potentiel maximal de la zone. En effet, la zone de potentiel 500 V est plus petite que le secteur « vu par la sonde ». Le potentiel maximum (122 V) est mesuré quand la sonde est dans l'axe vertical du centre du disque de $D_1 = 2$ mm. Cette différence entre les rapports indique une fois de plus que la contribution du potentiel au centre de ce secteur vu par la sonde est plus importante que celle de la zone périphérique (figure III-9).

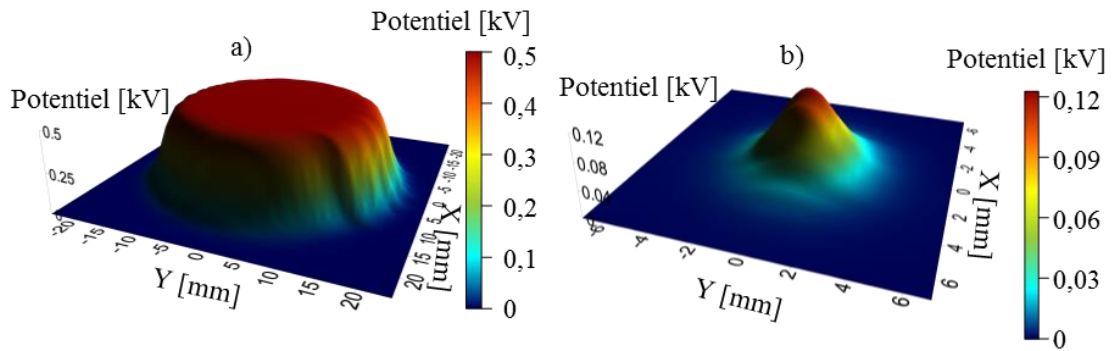


Figure III-7. Cartographie du potentiel électrique de surface pour les disques de diamètres :
a) $D_3 = 35$ mm ; b) $D_4 = 2$ mm.

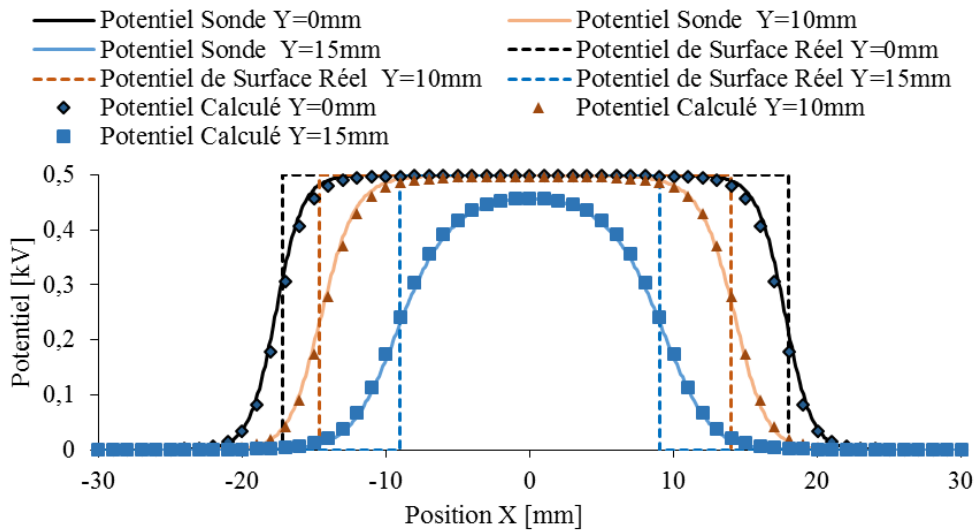


Figure III-8. Potentiel mesuré par la sonde, potentiel réel et potentiel calculé dans différentes sections pour le disque de diamètre $D_3 = 35$ mm.

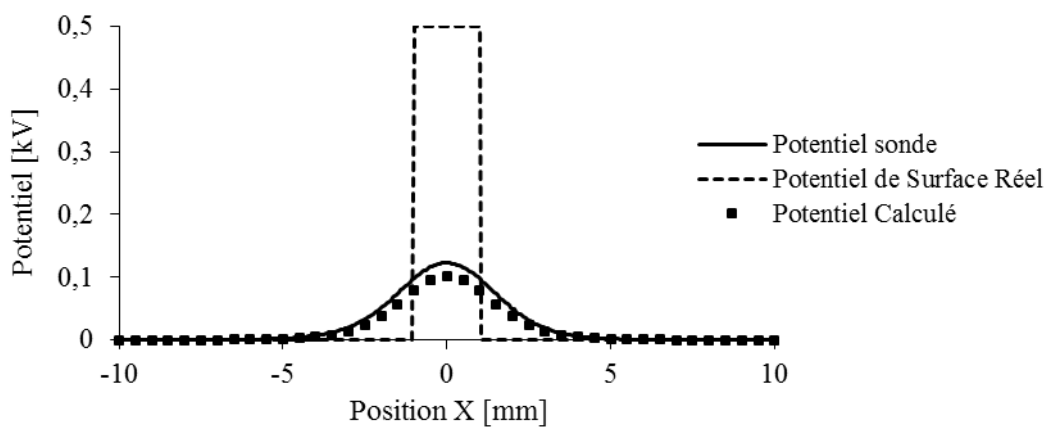


Figure III-9. Potentiel mesuré par la sonde, potentiel réel et potentiel calculé dans le plan de l'axe central $Y = 0$ mm pour le disque de diamètre $D_4 = 2$ mm.

III-2.2 Détermination du potentiel électrique réel en fonction du potentiel mesuré

Pour déterminer la fonction de transfert, nous avons utilisé les résultats de la troisième expérience décrite précédemment (figure III-4), en considérant que le potentiel électrique indiqué par la sonde électrostatique a été produit seulement par un petit secteur de potentiel électrique constant, le disque de diamètre $D = 2$ mm, relié à 500 V. Excepté le disque, toutes les autres zones sont reliées à la terre et ont une contribution nulle au potentiel mesuré. La position initiale de la sonde est à la verticale du centre du disque. En changeant sa position relativement au petit disque le long de la direction X , le potentiel mesuré par la sonde varie dans un rapport inversé avec la distance. Ainsi, la fonction de transfert f a été exprimée sous la forme :

$$f(x, y, z) = a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} \right)^b \quad (\text{III.4})$$

où a et b sont deux coefficients à déterminer expérimentalement.

Un système de référence orthogonal est utilisé pour exprimer la position de la sonde et la position du disque. La formule générale pour exprimer le potentiel de la sonde en fonction du potentiel de surface avec f ayant la forme décrite précédemment est exprimée comme suit :

$$\Phi(x_k, y_l, h) = A(x_i, y_j) \cdot \Phi_S(x_i, y_j, 0) \cdot a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(x_k - x_i)^2 + (y_l - y_j)^2 + h^2}} \right)^b \quad (\text{III.5})$$

La position du centre du disque ayant un potentiel différent de zéro est fixée aux coordonnées $(0 ; 0 ; 0)$. La configuration expérimentale étant axisymétrique, le déplacement selon n'importe quelle direction radiale du disque donne la même mesure de potentiel. L'expression pour exprimer le potentiel de la sonde devient :

$$\Phi(x_i, 0, h) = A_{disk} \cdot a \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{(x_i)^2 + h^2}} \right)^b \cdot \Phi_S(0,0,0) \quad (\text{III.6})$$

Les coefficients $a = 29$ et $b = 5,4$ ont été déterminés en utilisant le logiciel MATLAB avec le module de 'fitting curve tools' (figure III-10).

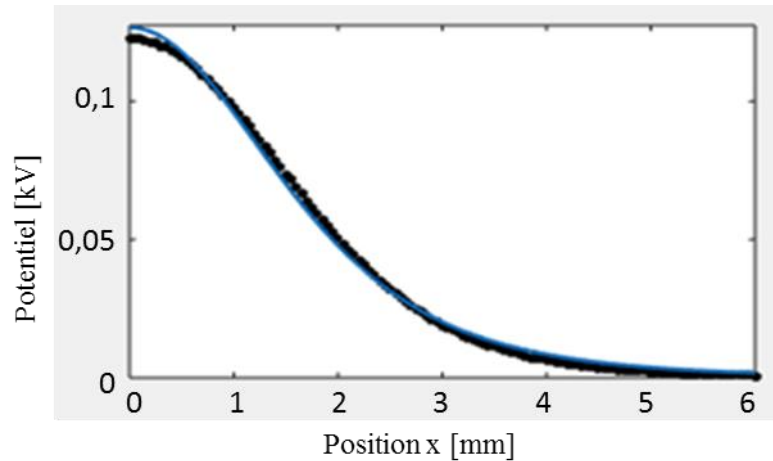


Figure III-10. Ajustement des données expérimentales avec un modèle mathématique.

La fonction f déterminé suit les données expérimentales avec une erreur quadratique moyenne $RMSE = 0,00218$. Un modèle est considéré correct quand $RMSE$ est en dessous de 0,05 [31, 32] .

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^P (e1_p - e2_p)^2}{P}} \quad (III.7)$$

où les $e1_p$ sont les valeurs obtenues expérimentalement, $e2_p$ les valeurs prédites par le modèle et P le nombre des valeurs comparées.

III-2.3 Validation des calculs

L'expérience de mesure du potentiel électrique sur la surface des conducteurs (paragraphe III-2.1.) a permis de calculer la fonction de transfert. Afin de valider ces calculs, le potentiel (Φ) est estimé en partant des valeurs connues du potentiel de surface (Φ_S), de la géométrie des conducteurs et de la fonction de transfert (f). Si la différence entre les valeurs calculées et mesurées est inférieure à 5 %, la fonction de transfert est validée.

Pour la première expérience (figure III-5), l'erreur absolue a été de moins de 12 V, pour une distance entre la sonde et la surface de 3 mm, pour laquelle la fonction de transfert a été déterminée. En balayant le disque de diamètre $D_3 = 35$ mm (figure III-8), l'erreur maximale a été de 15 V. Pour le disque $D_4 = 2$ mm (figure III-9), l'erreur absolue était au maximum 19 V. Ceci suggère que pour de petits secteurs la fonction de transfert a une erreur plus élevée. Toutes les valeurs trouvées sont inférieures à 4 % du potentiel auquel les disques ont été alimentés soit

500 V. La fonction de transfert peut donc être utilisée pour estimer le potentiel électrique de surface avec une méthode de calcul de la matrice inverse.

Pour pouvoir résoudre l'équation matricielle (III.8), le nombre d'inconnus Φ_S doit être au plus égale au nombre de points où le potentiel Φ est mesuré. Pour résoudre le système matriciel :

$$\Phi_S = \frac{1}{A} F^{-1} \cdot \Phi \quad (\text{III.8})$$

nous nous sommes contentés de la méthode de Gauss-Jordan, qui est simple à mettre en œuvre et fournit de bons résultats.

Une première estimation du potentiel de surface est faite pour la cartographie obtenue pour le disque de 35 millimètres, où les conditions de potentiel sont bien contrôlées. Ainsi il était possible de comparer le potentiel de surface calculé avec le potentiel réel sur la surface. Les calculs ont été effectués pour deux dimensions de division pour les éléments surfaciques δ , 2 mm et 1,5 mm.

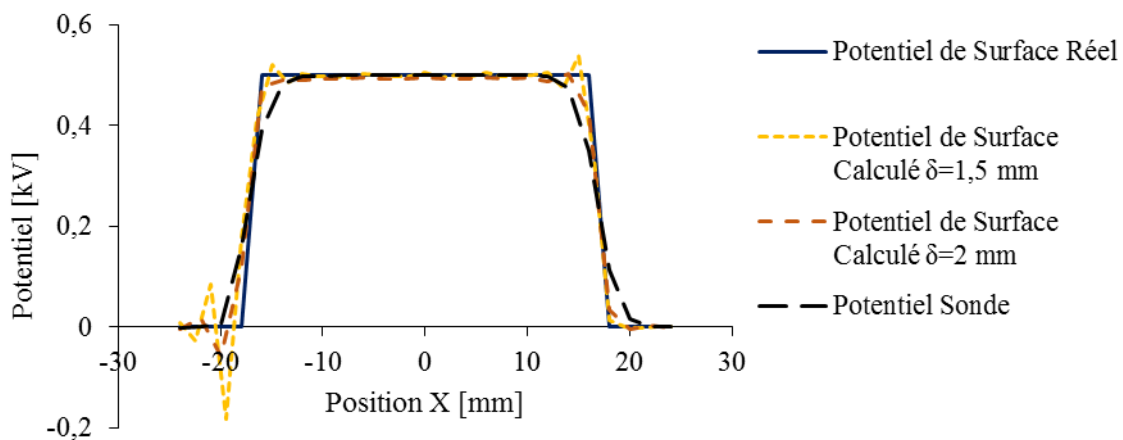


Figure III-11. Potentiel de surface calculé pour le disque de diamètre 35 mm

III-3 Mesure de la densité surfacique de charge électrique

Le potentiel électrique d'un corps est proportionnel à la charge électrique qu'il porte. Les prochaines séries d'expériences ont été réalisées pour déterminer le rapport entre le potentiel mesuré et la DSCE. Quatre dispositifs ont été mis en place pour réaliser cette étude.

III-3.1 Relation entre le potentiel électrique mesuré et la densité surfacique de charge électrique

Les éprouvettes utilisées sont des plaques en PVC de dimensions 50 mm x 50 mm x 5 mm (figure II-18). Huit éprouvettes de ce type ont été chargées avec un système d'électrodes couronnes (figure III-1). Le mode statique avec une configuration triode a été suffisant pour charger uniformément les éprouvettes de cette taille. Le potentiel de la grille a été fixé à différentes valeurs dans la gamme -0,7 kV à -2 kV. Après le chargement des éprouvettes, une cartographie du potentiel de surface a été réalisée, avec un pas de 2 mm. La dernière étape de la procédure expérimentale a été la mesure de la charge globale. L'éprouvette est mise dans une cage Faraday où un électromètre mesure sa charge électrique

Six autres éprouvettes en PVC, de mêmes tailles que celles du PVC, ont été chargées en les frottant avec une éprouvette d'ABS (100 mm x 15 mm x 6 mm) utilisant la première configuration de figure II-19. Le dispositif utilisé pour charger les éprouvettes par effet triboélectrique est le tribomètre linéaire décrit dans le chapitre II et dans les articles [62,121]. Les conditions de frottement ont été : 10 cycles de va-et-vient à une vitesse relative de 25 mm/s ; une force normale de contact entre les surfaces glissantes fixée à des valeurs entre 10 et 20 N. Le potentiel électrique sur la surface des éprouvettes en PVC et la charge totale sont mesurés comme pour les éprouvettes chargées par effet couronne.

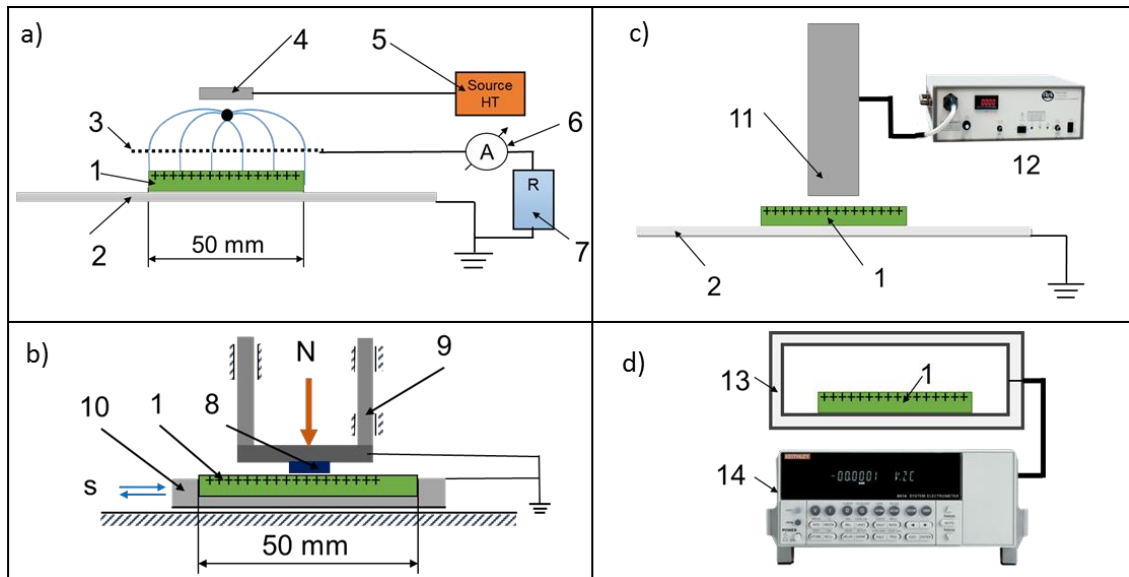


Figure III-12. Banc expérimental pour déterminer la relation entre la densité surfacique de charge électrique et le potentiel de surface.

a) chargement de l'éprouvette par effet couronne b) chargement de l'éprouvette par effet triboélectrique ; c) cartographie du potentiel ; d) mesure de la charge globale :

1 – éprouvette ; 2 – plaque métallique liée à la terre ; 3 – grille métallique ; 4 – électrode couronne ; 5 – alimentation haute tension ; 6 – micro-ampèremètre ; 7 – résistance ; 8 – éprouvette supérieure en PVC ; 9 – colonne de guidage vertical ; 10 - guidage horizontal motorisé ; 11 – sonde électrostatique ; 12 – voltmètre électrostatique ; 13 – cage Faraday ; 14 – électromètre Keithley.

La densité surfacique de charge électrique (DSCE) est définie comme la charge distribuée sur l'unité de surface. Sur la surface des éprouvettes utilisées dans cette étude la charge n'est pas uniformément distribuée. La DSCE moyenne pour une surface chargée est définie comme le rapport entre la charge globale Q et l'aire A de surface chargée.

$$\sigma_m = \frac{Q}{A} \quad (\text{III.9})$$

Le potentiel de surface pour une géométrie fixe est dans une relation directe avec la charge électrique [159]. La distribution du potentiel de surface mesurée sur la plaque est en relation directe avec la DSCE. La formule suivante définit le facteur de proportionnalité K entre la DSCE moyenne (σ_m) et le potentiel de surface moyen (Φ_m) :

$$\sigma_m = \Phi_m \cdot K \quad (\text{III.10})$$

Une relation linéaire directe a été fortement validée par les résultats similaires trouvés pour la charge produite par l'effet couronne et par effet triboélectrique. Le rapport de proportionnalité K représente la pente moyenne de la courbe de tendance représentée sur la figure III-13.

Si le potentiel de surface sur une certaine surface est connu, la DSCE peut être calculée en utilisant la formule (III.10) où $K = 0,01 \mu\text{C}/(\text{kV mm}^2)$.

La relation entre le potentiel de surface et la DSCE pour une charge générée par effet couronne ou par effet de triboélectrique est la même puisque les mesures ne tiennent pas compte du type de porteur de charges. La procédure pour caractériser la relation entre le potentiel de surface et la DSCE est utilisée pour trouver le rapport K pour le PVC, l'ABS, le PE et le PP. Les éprouvettes ont été chargées par effet couronne. Les rapports K pour les quatre matériaux sont similaires (tableau II-1).

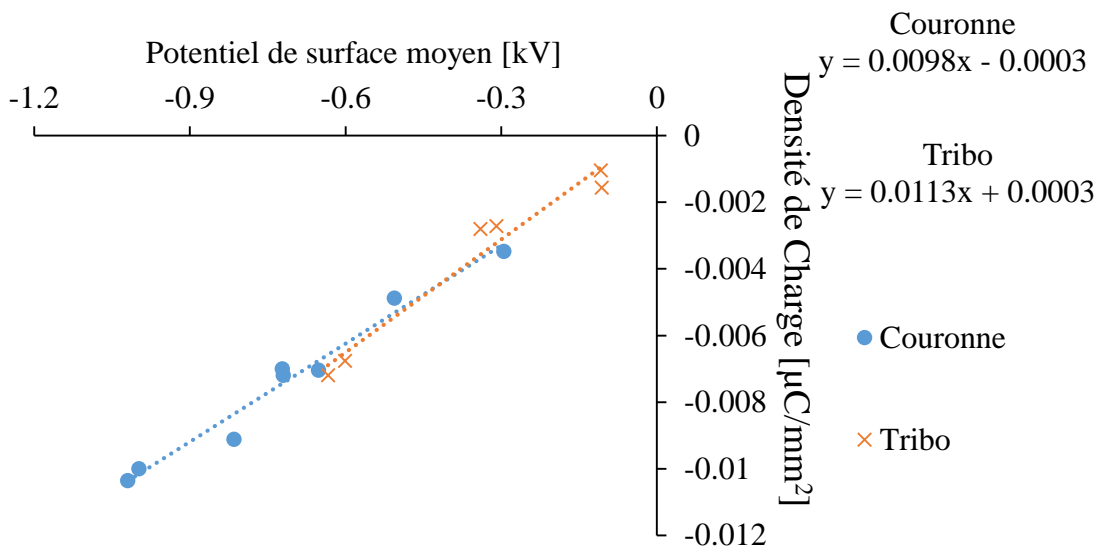


Figure III-13. Relation entre le potentiel de surface et la densité surfacique de charge électrique.

Tableau III-1. Valeurs des rapports K entre la densité de charge et le potentiel de surface pour des éprouvettes en PVC, ABS, PE et PP

Matériau	PVC	ABS	PE	PP
$K [\mu\text{C}/(\text{kV mm}^2)]$	0,0105	0,0098	0,0106	0,0107

III-3.2 Exemples de mesure de densité surfacique de charge électrique

Deux cartographies sont présentées sur la figure III-14 pour montrer le principe de calcul de la densité surfacique de charge électrique à partir de mesures du potentiel électrique de surface. Ces cartographies ont été obtenues pour des éprouvettes en PVC, l'une chargée par effet couronne et l'autre par effet triboélectrique. Dans un premier temps, le potentiel de la sonde est converti en un potentiel de surface avec un programme réalisé avec Matlab pour résoudre l'équation matricielle (III.8). La matrice F est calculée pour un maillage de la surface de résolution $\delta = 2$ mm. La matrice de la densité surfacique de charge électrique est obtenue par la relation III.10.

Le chargement par effet couronne est plus uniforme. Pour l'éprouvette chargée par effet triboélectrique, la densité surfacique de charge est distribuée de façon plus non uniforme.

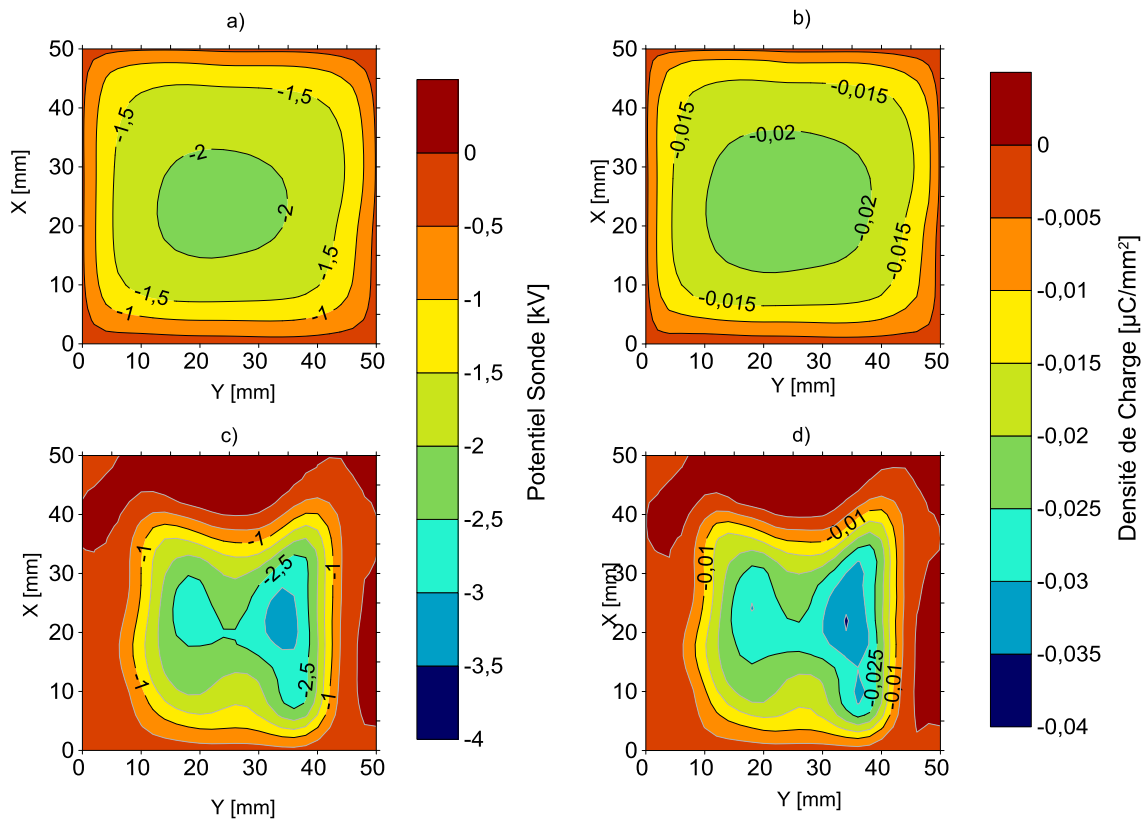


Figure III-14. Estimation de la charge pour des éprouvettes en PVC (50 mm x 50 mm):

- a) Potentiel lu par la sonde – charge générée par effet couronne
- b) DSCE estimée – charge générée par effet couronne
- c) Potentiel lu par la sonde – charge générée par effet triboélectrique
- d) DSCE estimée – charge générée par effet triboélectrique

III-4 Conclusions

Le chapitre présente une méthodologie simple mais efficace pour l'évaluation de la densité locale de charge électrique à la surface des plaques isolantes, mesurée avec la sonde à induction électrostatique auto-compensée (SIEAC) et un voltmètre électrostatique.

1. Le secteur « vu par la sonde » a une forme circulaire de 10 millimètres de diamètre. Cette valeur est valide pour ce type de SIEAC, située à une distance de 3 millimètres de la surface de l'éprouvette investiguée.
2. Le même potentiel au centre ou à la périphérie de ce secteur « vu par la sonde » a des contributions différentes sur la valeur enregistrée par l'instrument de mesure. Le potentiel dans un point proche de l'axe de la sonde a une contribution plus grande que celui dans des points périphériques.
3. Une fonction de transfert déterminée expérimentalement exprime la contribution de chaque petit secteur « vu par la sonde ». Une installation expérimentale a été mise en place pour la calibration de la sonde et la détermination de la fonction de transfert.
4. Cette fonction de transfert peut être employée pour calculer la valeur locale du potentiel électrique non uniformément distribué sur la surface d'éprouvettes planes, en partant des valeurs données par la SIEAC.
5. Un rapport direct existe entre le potentiel de surface et la densité surfacique de charge électrique (DSCE) des plaques isolantes. Ce rapport a été calculé pour 4 polymères à géométries identiques. Il a donné des résultats similaires.
6. Enfin, une méthodologie a été mise au point pour calculer la DSCE pour des plaques en matériaux isolants. Elle sera utilisée pour les études présentées dans les chapitres suivants pour des plaques avec des géométries différentes.

Chapitre IV Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

L'objectif de ce chapitre est de caractériser la génération et l'état de charge électrique des plaques de polymères, en utilisant la technique d'estimation de la densité de charge surfacique décrite dans le chapitre III. Nous présentons également dans ce chapitre l'influence de la charge électrique dans un contact glissant sec.

Les expériences décrites dans le sous-chapitre IV-1 ont permis une première caractérisation de la répartition du potentiel électrique de surface et l'établissement d'une série triboélectrique, par des mesures de charges électriques globales des échantillons soumis à du frottement.

Dans le sous-chapitre IV-2, une comparaison est faite entre la charge de surface déposée par décharge couronne et générée par effet triboélectrique.

L'état de charge sur la surface de polymères en frottement sec dépend d'une série de facteurs : la force normale, la vitesse de glissement, la rugosité des surfaces, la durée (nombre de cycles) du frottement, l'usure des surfaces, la température, l'humidité, les réactions et échanges physico-chimiques, ... Une analyse de l'influence de certains de ces facteurs fait l'objet du sous-chapitre IV-3.

Une comparaison entre la répartition de la densité de charge à la surface des échantillons et le champ de température est faite dans le sous-chapitre IV-4, pour différentes valeurs de la force normale, de la vitesse de glissement et de nombre de cycles de frottement.

Le dernier sous-chapitre IV-5 est consacré à l'analyse de l'influence de la charge électrique sur le coefficient de frottement.

IV-1 Caractérisation de l'état de charge des éprouvettes

IV-1.1 Mesure du potentiel électrique de surface

Trois séries d'expériences ont été réalisées avec des éprouvettes en PS (4 mm x 15 mm x 100 mm ; figure II-18, Eprouvette 4) et en PVC (5 mm x 50 mm x 180mm ; figure II-18, Eprouvette 1), dans l'air ambiant (température $T = 17,9 - 18,7^{\circ}\text{C}$ et humidité relative $RH = 55\% - 59\%$), en utilisant le tribomètre linéaire décrit dans la section II-1. Le mouvement relatif entre les éprouvettes a été assuré par un mécanisme bielle-manivelle à excentricité réglable. Dans chaque expérience, la force normale a été initialement $F_N = 1\text{ N}$, la vitesse de glissement maximale entre les éprouvettes : $v = 75\text{ mm/s}$, l'amplitude du déplacement relatif: $s = 56\text{ mm}$, et la durée de frottement: $t = 60\text{ s}$. Les éprouvettes en PS (A), fixées sur le support supérieur, et les éprouvettes en PVC (B), fixées sur le support inférieur, ont été mises dans une configuration parallèle (figure II-19). La particularité de cette configuration est que les deux éprouvettes, A et B, ont une zone qui reste en contact permanent. Une mesure du potentiel a été effectuée avec la position initiale de la sonde au centre de l'éprouvette B (PVC). La sonde a pris 11 mesures sur une distance de 24 mm tous les 2,4 mm. Cette première mesure a pu être faite dans une seule direction mais a été importante pour orienter la conception du banc expérimental pour la cartographie du potentiel électrique de surface. Les mêmes éprouvettes ont été soumises de 1 à 12 fois à ce cycle de frottement, suivis par la mesure du potentiel. La répartition du potentiel de surface a été enregistrée 8 h et 24 h après le processus de chargement pour estimer le déclin du potentiel dans le temps.

Les résultats de la figure IV-1 ont été obtenus pour un échantillon, mais sont typiques pour l'ensemble des expériences. Le trait vertical rouge identifie la limite entre les zones de contact permanent et non permanent ou alternatif. Les mesures prouvent que la charge atteint un niveau maximum après 9 cycles, qu'elle prend une tendance à la stabilisation voire même à la baisse à l'extrémité de la zone de contact permanent. Ce phénomène de saturation est susceptible d'être corrélé avec les divers facteurs du processus de charge triboélectrique : la nature des surfaces en contact, la force normale, la vitesse de glissement, etc. Par ailleurs, la charge acquise a tendance à augmenter en s'éloignant de la zone de contact permanent.

Les éprouvettes continuent à préserver une partie de la charge acquise par effet triboélectrique. Cependant, le taux de déclin de cette charge n'est pas uniforme sur la surface de l'éprouvette. En effet, les courbes de répartition du potentiel de surface enregistrées après 8 et 24 heures

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

après le 12ème et dernier cycle de charge triboélectrique de la figure IV-1 b montrent une évolution différente selon les zones de contact. Dans la zone de contact permanent, le niveau du potentiel électrique est proche de zéro après 24 heures, alors qu'une certaine quantité de charge peut encore être détectée dans la zone de contact non permanent. Elle croît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la zone de contact permanent.

La diminution plus ou moins rapide de la charge après atteinte de la saturation pourrait être liée à la dégradation de la surface du matériau provoquée par l'usure. C'est l'une des hypothèses qui devraient être confirmées par d'autres études. Une autre hypothèse qui a également besoin de confirmation expérimentale est liée aux natures différentes des porteurs de charge dans les zones de contact permanents et non-permanents de l'éprouvette. Les différences dans les taux de déclin de charge des deux zones peuvent être expliquées par le fait que pendant le processus de charge par effet triboélectrique la zone sans contact permanent est périodiquement affectée par les ions présents dans l'air ambiant, tandis que l'autre ne l'est pas.

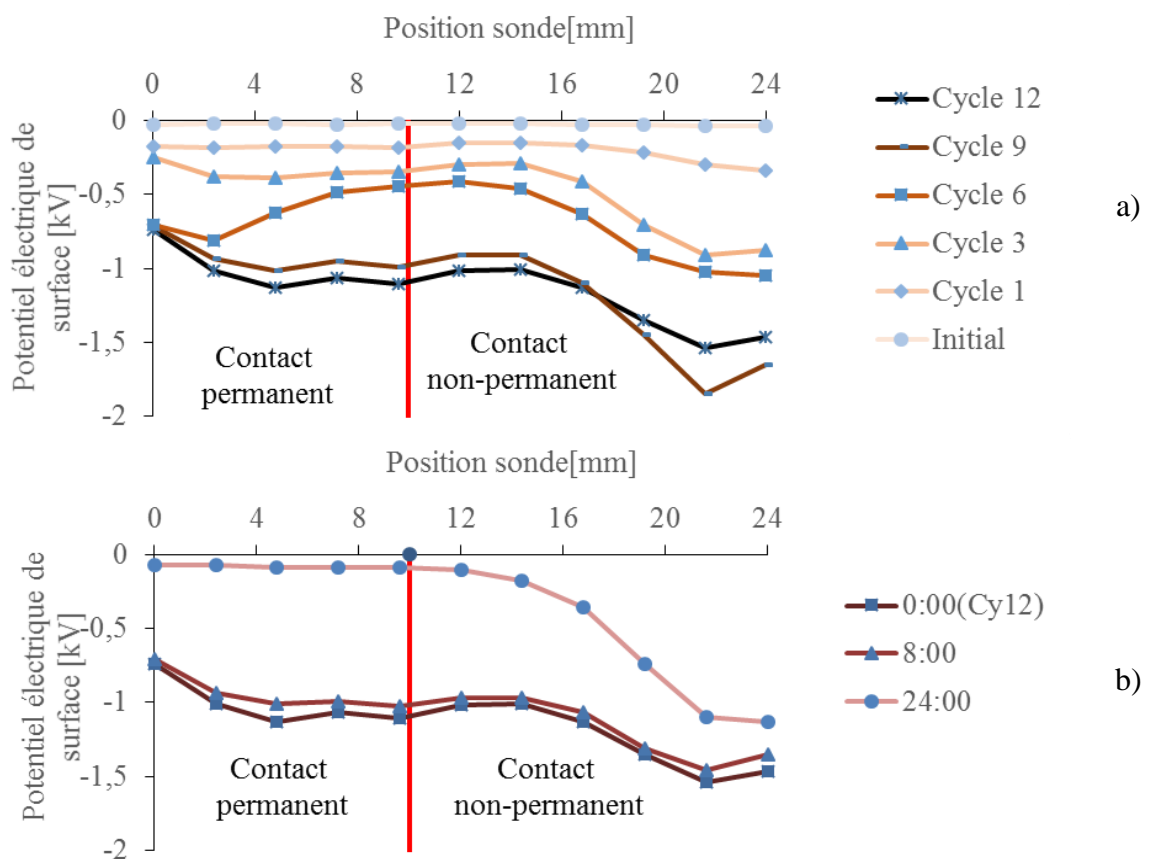


Figure IV-1. Résultats des mesures de répartition du potentiel électrique sur l'éprouvette B. a) après 1 à 12 cycles de frottement; b) à des moments différents après les 12 cycles de frottement.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

IV-1.2 Mesure de charge globale

La charge électrique générée par effet triboélectrique est plus ou moins importante en fonction de la paire de matériaux mis en contact, notamment de leur positionnement dans les séries triboélectriques. Dans ce paragraphe, nous présentons les expériences réalisées pour établir notre propre série triboélectrique, en partant des résultats des mesures de charge électrostatique globale.

L'étude a été réalisée avec des éprouvettes en PVC, PP, PE et PVC, de dimensions 4 mm x 15 mm x 100 mm (figure II-18, Epreuve 3) et 5 mm x 50 mm x 180 mm (figure II-18, Epreuve 1). Une campagne de douze séries d'expériences (figure IV-2) a été menée afin d'étudier toutes les combinaisons possibles des paires de matériaux choisis. Les conditions ambiantes ont été assez stables : température $T = 26\text{ }^{\circ}\text{C} - 27\text{ }^{\circ}\text{C}$ et humidité relative $RH = 40\% - 50\%$. Le tribomètre linéaire a été utilisé dans sa configuration à mécanisme bielle-manivelle. La force normale a été $F_N = 10\text{ N}$, la vitesse de glissement : $v = 180\text{ mm/s}$, l'amplitude du déplacement relatif : $s = 56\text{ millimètres}$, et la durée de frottement : $t = 60\text{ s}$. Les éprouvettes ont été mises dans une configuration perpendiculaire (figure II-19 b). Les mesures de charges électriques des éprouvettes A et B ont été faites à l'aide de deux cages de Faraday (figure III-1). Pour identifier les essais, les paires d'éprouvettes sont désignées par le nom du polymère de l'éprouvette A suivi du de celui de l'éprouvette B.

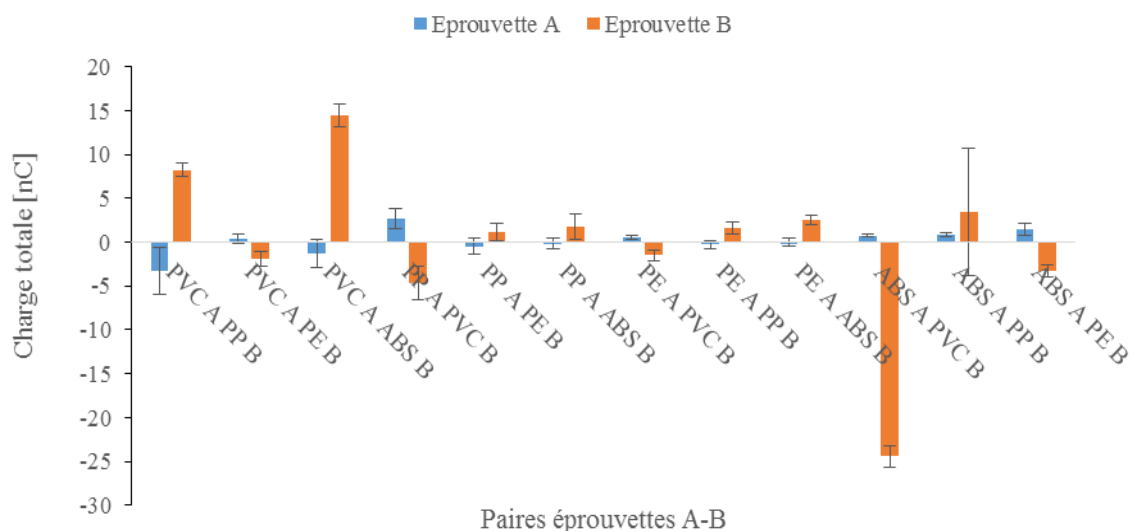


Figure IV-2. Charge générée par contact glissant avec les 12 combinaisons possibles d'éprouvettes A et B.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

La nature de matériau dans le processus de triboélectrification change le niveau de charge électrique induite. Le niveau de charge le plus élevé est obtenu sur l'éprouvette B où la surface qui frotte avec la deuxième éprouvette est plus grande (B : 71 mm x 50 mm, par rapport à A : 15 mm x 50 mm). Comme prévu [50], l'ABS s'est chargé positivement avec tous les autres combinaisons. Une bonne charge à 14,5 nC, a été acquise en combinaison avec le PVC. Réciproquement le PVC a acquis un bon niveau de charge négative de -24,4 nC en étant frotté contre l'ABS. Le niveau de charge le plus faible a été obtenu pour le PE [11,50] (inférieur à une valeur absolue de 1,5 nC). Le PP a atteint un bon niveau de charge de 8,25 nC en contact avec le PVC. Avec l'ABS, il s'est chargé soit positivement, soit négativement. Les valeurs de charge se sont situées entre -6,3 nC et 11,5 nC. Cet effet mérite d'être investigué plus en détail, pour expliquer les raisons de la faible charge du PE.

IV-2 Comparaison entre les charges générées par effet triboélectrique et par effet couronne

La comparaison entre les deux mécanismes de charge a été faite en termes d'uniformité et de stabilité dans le temps de la distribution du potentiel électrique mesuré à la surface des éprouvettes [116,120,148,153,163-165].

Deux types d'éprouvettes ont été utilisées, A : 5 mm x 15 mm x 100 m (figure II-18, Eprouvette 3) et B 5 mm x 50 mm x 180mm (figure II-18, Eprouvette 1). Elles ont été débitées de trois plaques de polymères différents de PVC, d'ABS et de PP. La charge résiduelle sur la surface des éprouvettes a été neutralisée avec le générateur d'ions bipolaires (figure II-14). Les conditions ambiantes pendant les expériences ont été $RH = 35\% - 45\%$ et $T = 25^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C}$.

Pour étudier les deux types de chargement, deux séries d'expériences ont été effectuées sur trois bancs expérimentaux, deux pour le dépôt ou la génération de charge et un pour la mesure de la distribution du potentiel électrique de surface et de son déclin. Le dépôt de charge par effet couronne a été fait avec une électrode duale à fil, dans une configuration triode (figure II-3) [166,167]. La résistance a été fixée à $R_g = 100 \text{ M}\Omega$, La tension d'alimentation de l'électrode couronne a été ajustée pour arriver à quatre valeurs de courant indiquées par le micro-ampèremètre, $I_g = 10 \mu\text{A}$, $20 \mu\text{A}$, $-10 \mu\text{A}$, et $-20 \mu\text{A}$, correspondant à quatre valeurs du potentiel électrique de l'électrode grille, $V_g = 1 \text{ kV}$, 2 kV , -1 kV et -2 kV . Deux éprouvettes de chaque type de matériau ont été chargées à chacune de ces valeurs de potentiel. Les éprouvettes ont été couvertes avec des plaques métalliques pour permettre le chargement juste sur une zone équivalente à celle du chargement triboélectrique. Le temps de chargement a été de 5 s.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

L'installation de chargement par effet triboélectrique, décrite en détail dans le sous-chapitre II-1. a été réglée pour une force normale $F_n = 10$ N, une vitesse de glissement relatif entre éprouvettes : $v = 75$ mm/s, une amplitude de déplacement: $s = 56$ mm, et deux cycles de frottement, $C_y = 10$ $C_y = 100$. Les éprouvettes ont été mises dans une configuration perpendiculaire (figure II-19 b). Les paires d'éprouvettes A-B mises en contact ont été : ABS-PP; PP-ABS; ABS-PVC; PVC-ABS; PP-PVC; PVC-PP. La mesure du potentiel de surface a été faite en 5×19 points avec une résolution $r_s = 10$ mm (figure IV-4). L'installation présentée dans le sous-chapitre III-1.2 a été utilisée pour réaliser la cartographie de la répartition de la densité surfacique de charge électrique de surface à partir des mesures du potentiel électrique, selon la méthode de conversion décrite dans le sous-chapitre III-3). La sonde a réalisé des mesures à chaque point en mode stationnaire. La durée nécessaire pour effectuer une cartographie complète a été de 3 min. Chaque 5 min la sonde a effectué une nouvelle cartographie, afin de permettre l'étude du déclin dans le temps de la charge électrique à la surface de l'éprouvette.

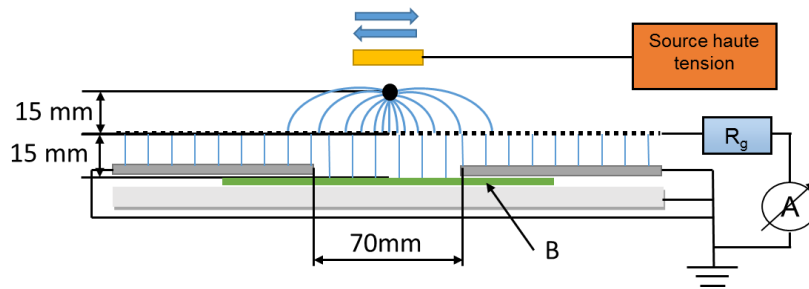


Figure IV-3. Décharge couronne sur une zone de dimensions : 70 x 50 mm.

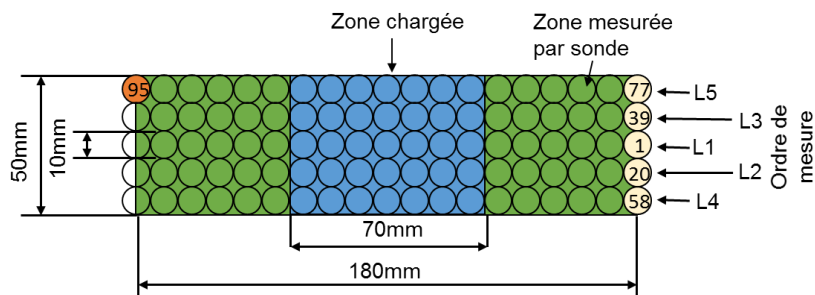


Figure IV-4. Répartition des points de mesures pour réaliser la cartographie du potentiel électrique à la surface de l'éprouvette B.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

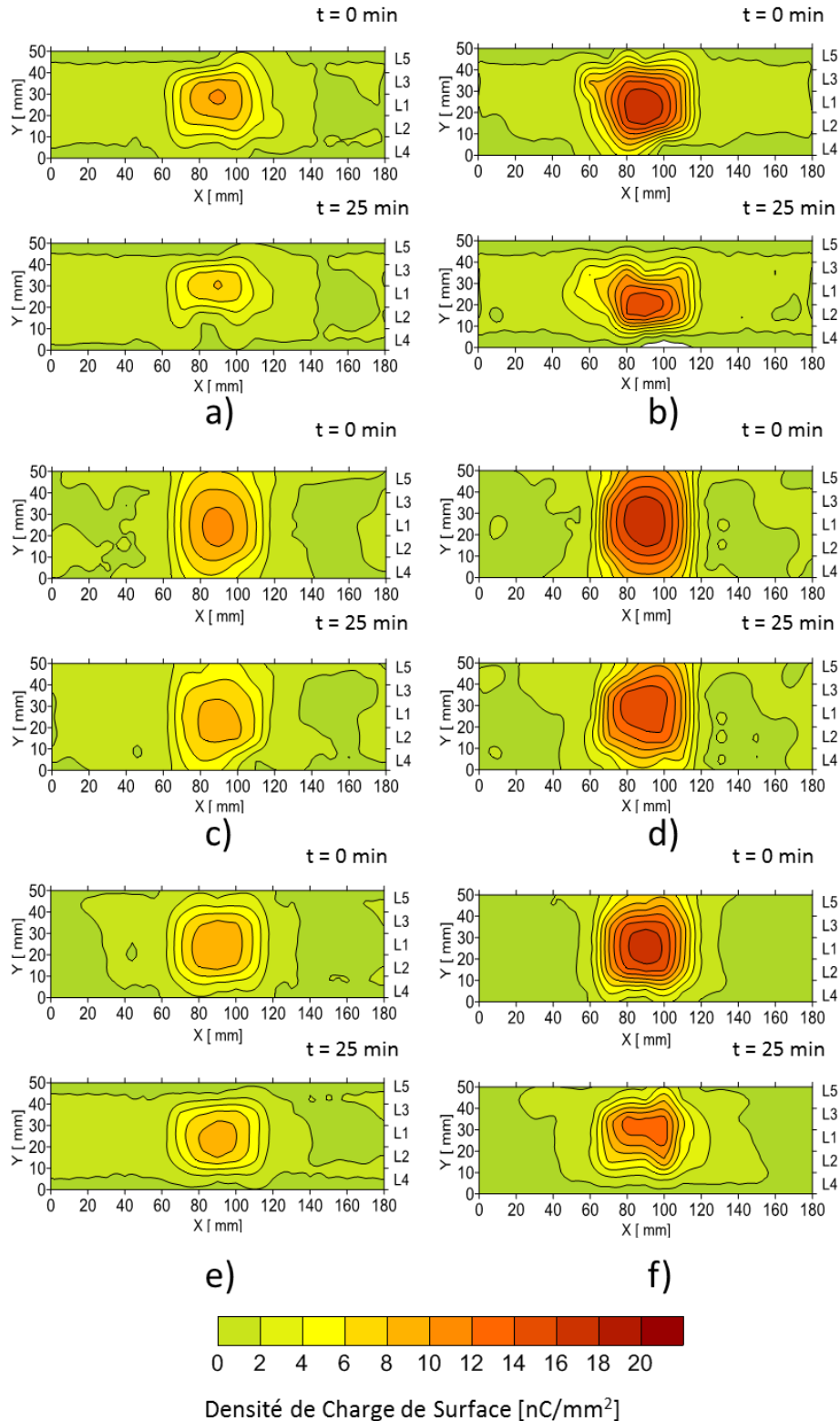


Figure IV-5. Chargement couronne en polarité positifé ;

- a) PVC, $V_g = 1$ kV ; b) PVC, $V_g = 2$ kV ; c) ABS, $V_g = 1$ kV ;
 d) ABS, $V_g = 2$ kV ; e) PP, $V_g = 1$ kV ; f) PP, $V_g = 2$ kV.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

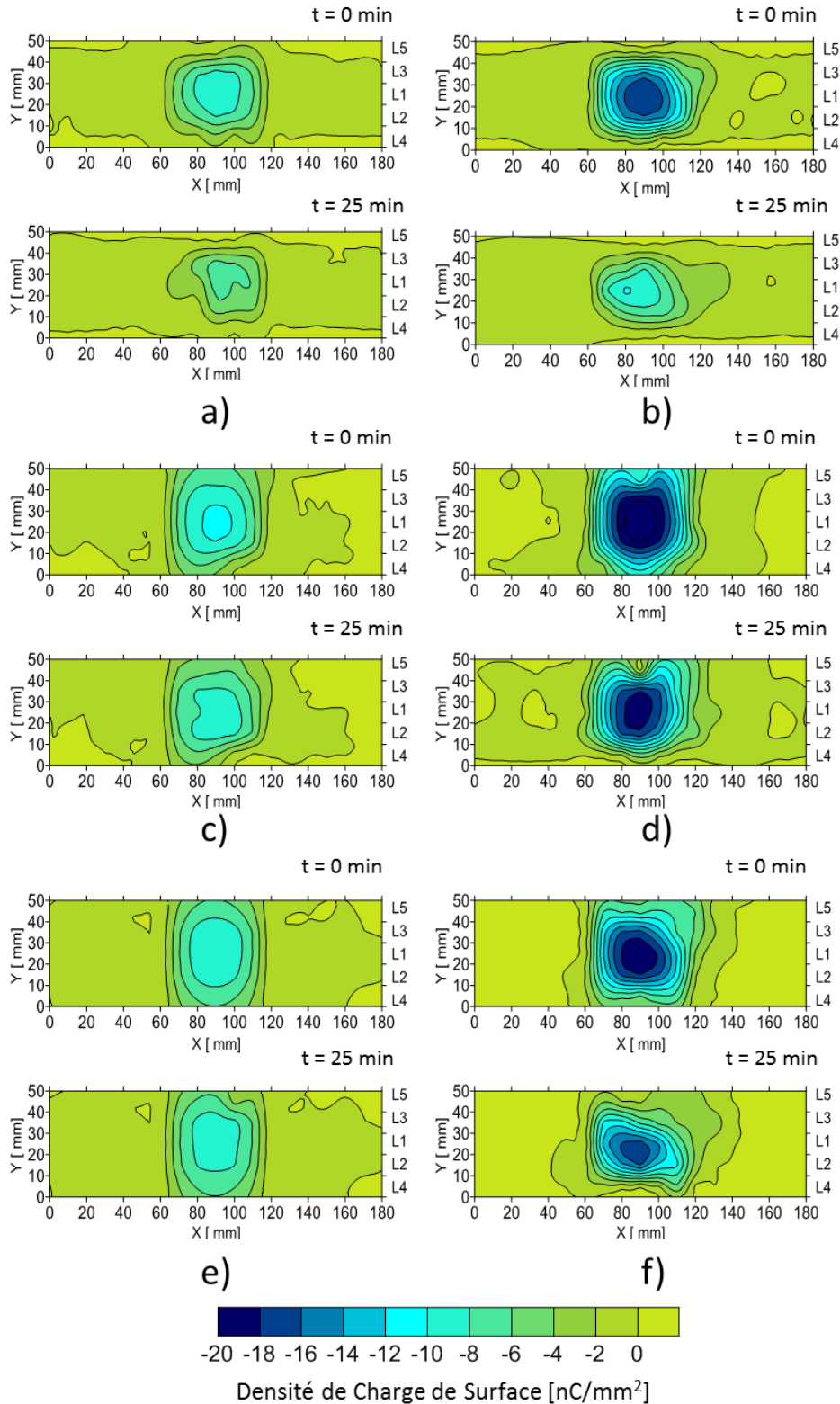


Figure IV-6. Chargement couronne en polarité négative ;

- a) PVC, $V_g = -1$ kV ; b) PVC, $V_g = -2$ kV ; c) ABS, $V_g = -1$ kV ;
 d) ABS, $V_g = -2$ kV ; e) PP, $V_g = -1$ kV ; f) PP, $V_g = -2$ kV.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

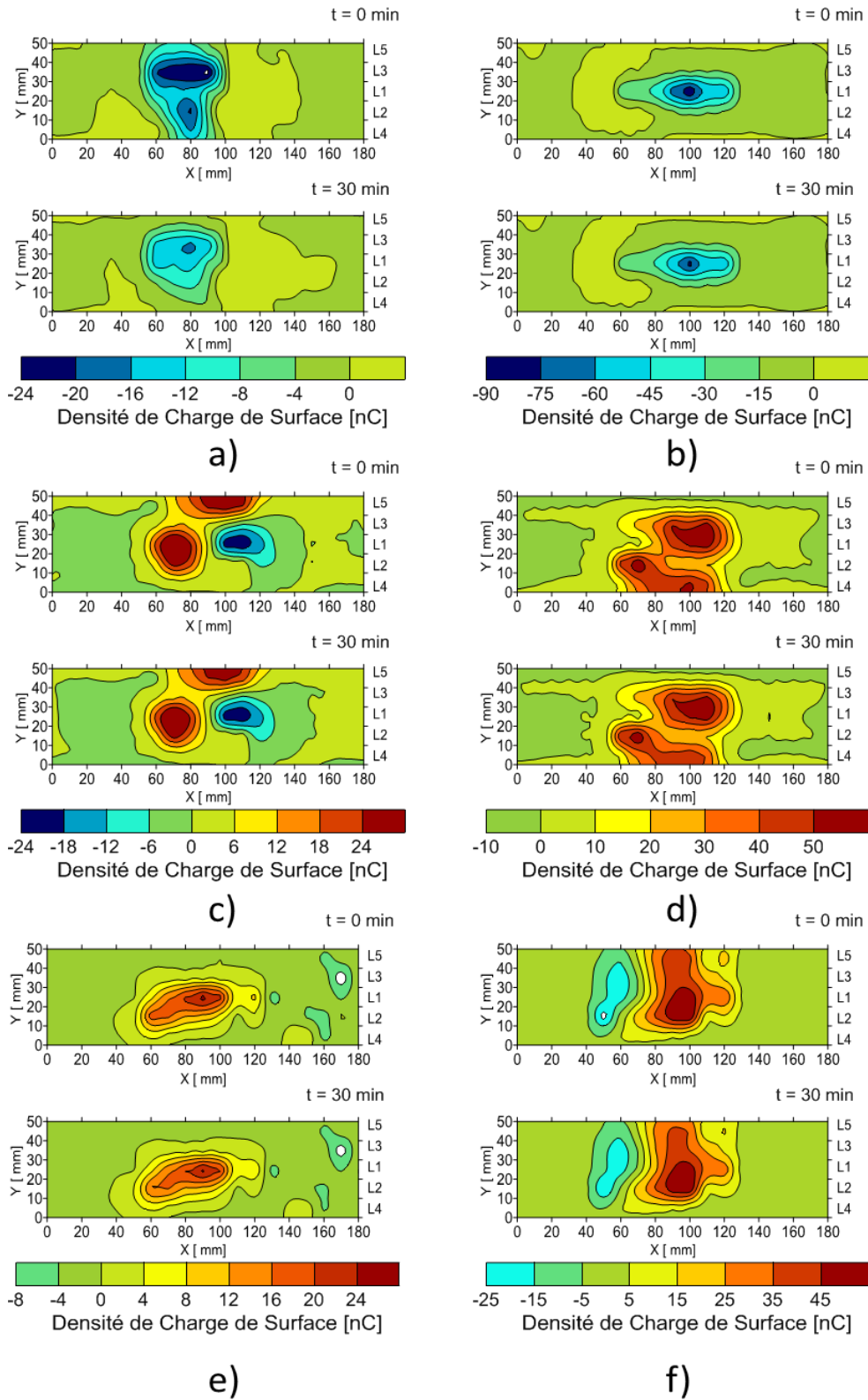


Figure IV-7. Chargement par effet triboélectrique : $v = 75$ mm/s, $F_N = 10$ N, $s = 56$ mm ;

- a) ABS-PVC, 10 cycles; b) ABS-PVC, 100 cycles;
- c) ABS-PP, 10 cycles ;d) ABS-PP, 100 cycles;
- e) PP-ABS, 10 cycles; f) PP-ABS, 100 cycles;

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

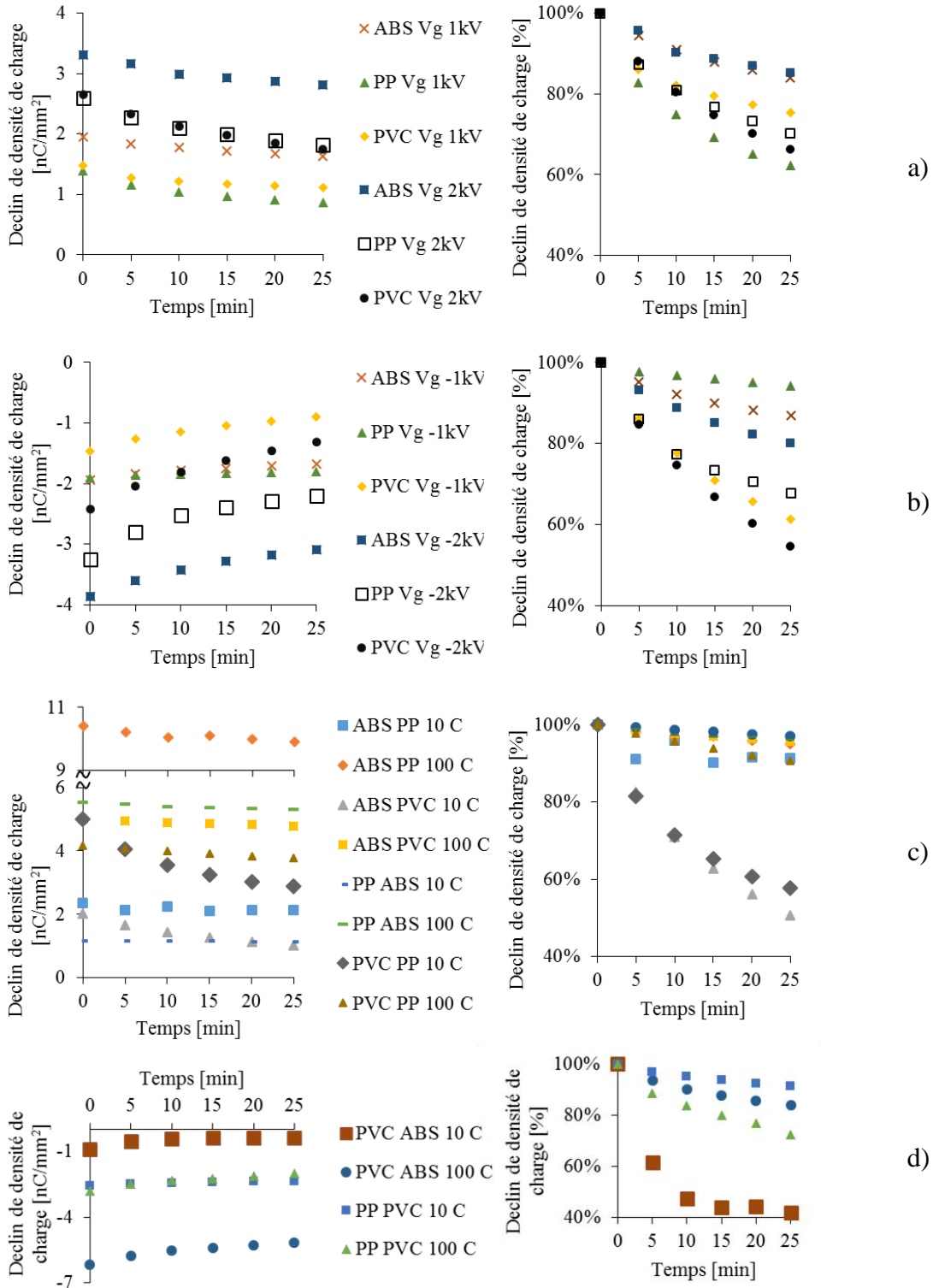


Figure IV-8. Déclin de la valeur moyenne de la charge:

- a) Chargement par effet couronne à $V_g = 1$ kV et 2 kV ;
- b) Chargement par effet couronne à $V_g = -1$ kV et -2 kV ;
- c) Chargement par effet triboélectrique, polymères chargés positivement ;
- d) Chargement par effet triboélectrique, polymères chargés négativement.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

Les cartographies dans les figures IV-5 et IV-6 illustrent les résultats obtenus pour les éprouvettes chargées par effet couronne en polarités positive et négative immédiatement après le chargement et après 25 min.

Les valeurs enregistrées par la sonde ont été en accord avec le potentiel électrique appliqué à l'électrode grille. Les répartitions de charges électriques déposées à la surface des éprouvettes en PP et ABS ont été plus homogènes que pour les éprouvettes en PVC. Les valeurs les plus élevées de la densité de charge ont été obtenues dans la zone centrale des éprouvettes. Quelle que soit la polarité de la décharge couronne, le déclin de potentiel est plus important pour $V_g = 2$ kV que pour $V_g = 1$ kV.

Les résultats de la figure IV-7 montrent que le chargement par effet triboélectrique est non homogène, caractérisée par une distribution aléatoire d'une cartographie à l'autre. L'uniformité de la charge dépend du parallélisme du contact conforme plan/plan entre les deux éprouvettes. Le niveau de charge électrique a tendance à augmenter avec les nombres de cycles de frottement. Par exemple, le PVC en contact glissant avec l'ABS atteint une densité de charge maximale de 25 nC/mm^2 pour 10 cycles de frottement et de 65 nC/mm^2 pour 100 cycles de frottement. Un comportement particulier a été observé pour l'ABS en contact glissant avec le PVC. Selon les séries triboélectriques de la littérature, l'ABS devrait se charger positivement et le PP négativement [50]. Une cohabitation de charges positives et négatives sur la même éprouvette a été observée [46,47]. La polarité négative obtenue sur le PVC en frottement avec l'ABS est en conformité avec la série triboélectrique.

La différence entre les niveaux de charge mesurés juste après le chargement et après 25 min indique un déclin de potentiel. Le déplacement de charge est révélé par le déplacement des isolignes.

La figure IV-8 représente les courbes de déclin de la densité moyenne de charge en nC/mm^2 et en pourcentage de la valeur initiale pour des chargements par effets couronne et triboélectrique. Le déclin de potentiel pour une charge générée par effet couronne a été moindre pour l'ABS, où le niveau de charge est resté à 80 % - 85% de la valeur initiale après 25 min. Dans les mêmes conditions le PVC est arrivé à une charge de 50% - 75% après 25 min. Le comportement du PP se situe entre les deux. Ces valeurs sont corrélées avec les résistivités des matériaux. En effet, le PVC a une résistivité plus faible que le PP et l'ABS. (Tableaux II-1).

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

Les résultats des mesures de déclin de potentiel pour les éprouvettes chargées par effet triboélectrique montrent un comportement similaire, où le déclin est plus rapide pour le PVC. Le déclin par chargement triboélectrique est moindre que par chargement couronne.

IV-3 Influence de quelques facteurs sur la génération de la charge par effet triboélectrique

La charge générée par effet triboélectrique dépend de plusieurs facteurs. Cette partie est consacrée à l'étude des facteurs suivants :

- L'usure de la surface et la durée de frottement;
- La rugosité;
- La force normale de contact;
- La vitesse de glissement.

Les conditions ambiantes peuvent influencer le niveau de charge produite par triboélectrification [50]. La température et l'humidité relative ont été en permanence surveillées pour conserver des variations inférieures respectivement à 1°C - 2°C et à 10%.

IV-3.1 Saturation de la charge. Influence de l'usure de la surface et du temps de frottement

Deux types de polymères sont utilisés pour les expériences, le PVC pour les éprouvettes supérieures et le PP pour les éprouvettes inférieures. Les éprouvettes sont débitées en trois formats : 5 mm x 15 mm x 80 mm (figure II-18, Eprouvette 4), 5 mm x 15 mm x 15 mm (figure II-18, Eprouvette 5) pour le PP et en 5 mm x 50 mm x 180 mm (figure II-18, Eprouvette 1) pour le PVC. Avant de commencer les expériences, la charge résiduelle sur la surface des éprouvettes a été neutralisée avec le générateur d'ions bipolaires model SC04B de la société ELCOWA (figure II-3). Les expériences ont été effectuées avec le tribomètre linéaire (figure II-1). La force normale utilisée a été fixée initialement à $F_N = 10$ N, la vitesse de glissement entre échantillons à $v = 175$ mm/s, la course du support inférieur à $s = 56$ millimètres et la durée de frottement à quatre valeurs, $t = 1$ min, 5 min, 15 min et 30 min. Pour chaque durée de frottement, jusqu'à quatre répétitions ont été effectuées. Les éprouvettes ont été mises dans une configuration présentant la plus grande zone de contact permanent (figure II-19 c) et la planéité entre les deux éprouvettes en contact a été soigneusement réglée.

L'évaluation de l'état de charge des éprouvettes a été réalisée par la méthode de cartographie du potentiel convertie en mesure de charge, suivant la méthode de conversion décrite au sous

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

chapitre III-3. La sonde a pris des mesures en 5×19 points avec une résolution $r_x = 10$ mm sur l'axe X et $r_y = 5$ mm sur l'axe Y (figure IV-9). Les mesures ont été réalisées point par point, en mode stationnaire. Pour effectuer une cartographie complète 3 minutes sont nécessaires. La cartographie est prélevée après le processus de chargement par effet triboélectrique.

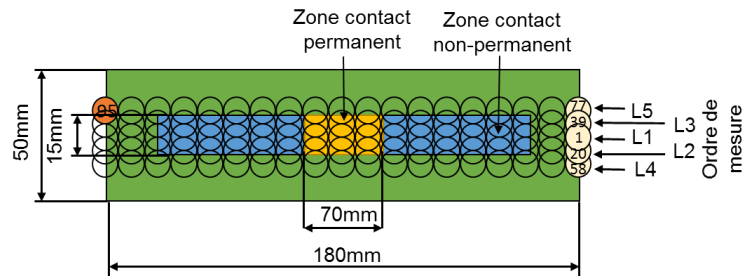


Figure IV-9. Cartographie du potentiel électrique sur l'éprouvette B, en vue de l'étude de l'usure.

L'influence de l'usure n'a pu être évaluée que qualitativement. Une méthode de profilométrie optique a été mise en œuvre. Le dispositif de mesure (figure II-13. a) a été utilisé pour les polymères à faible réflexion de surface. La faible densité du polymère a exclu la mesure de la variation de masse, puisque la quantité de débris n'a été que de l'ordre de $2 \mu\text{g}$ à $3 \mu\text{g}$.

Pendant l'ensemble des expériences deux types d'usure sont détectés, au début une usure de type abrasif pendant la période de rodage des surfaces en contact (figure IV-10. b)), suivie progressivement par une usure de type adhésif, due à l'échauffement et à l'adhérence des matériaux (figure IV-10. c)). Un phénomène de saturation de charge est confirmé, comme déjà identifié dans le sous chapitre IV-1 [11]. La saturation de charge a lieu dans la dernière partie du processus de frottement. Le changement de structure de la surface influence la génération de charge et représente l'un des facteurs qui expliquent ce phénomène de saturation. Les évolutions des types d'usure du PP sont présentées dans les figures IV-10 d, e et f.

Les évolutions avec le temps des densités maximales et moyennes du PP et du PVC sont présentées sur la figure IV-10 ; les différents moments des types d'usure y sont identifiés par les flèches bleues.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

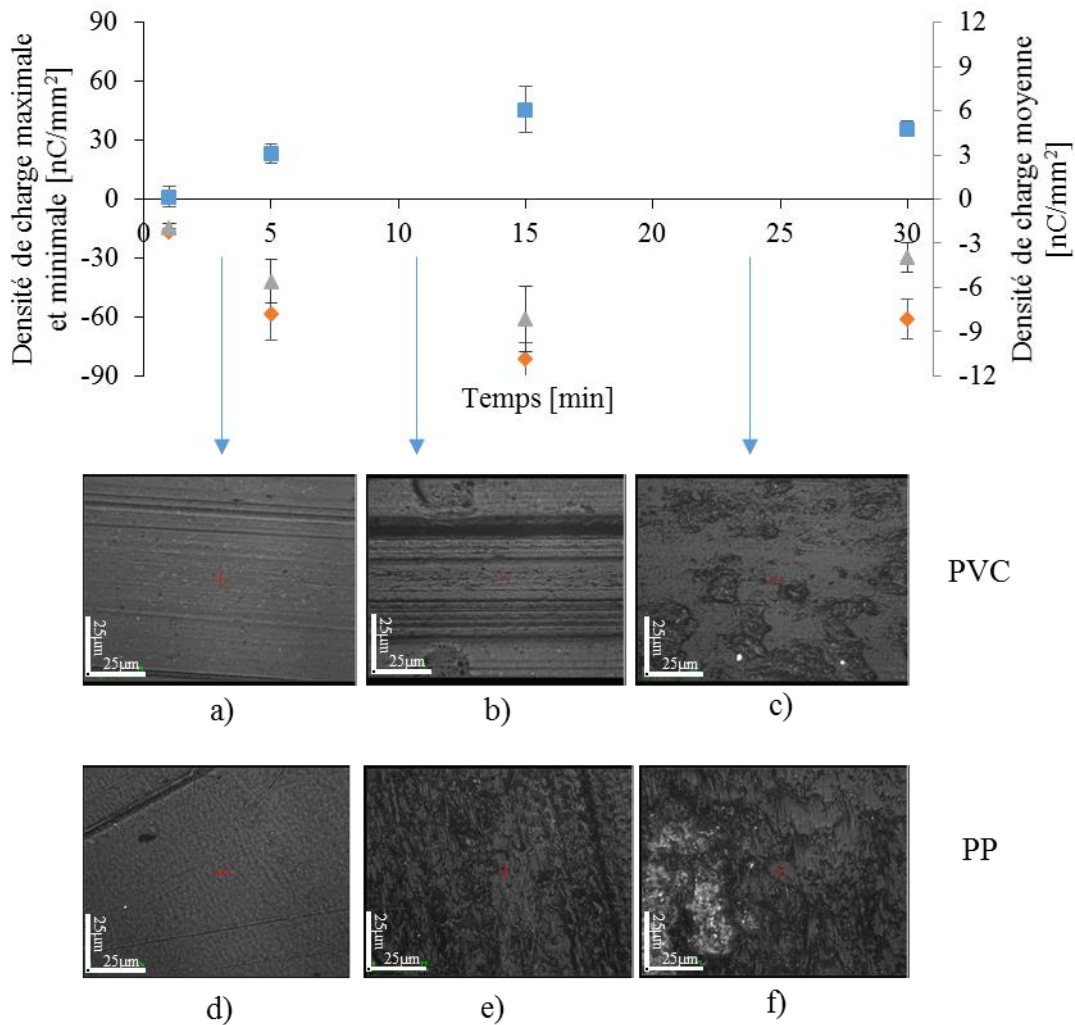


Figure IV-10. Evolution de la charge avec le temps et les différents états d'usure :

PVC : a) usure faible b) usure abrasive ; c) usure adhésive ;
 PP : d) usure faible ; e) usure abrasive et adhésive ; f) usure adhésive ;

IV-3.2 Influence de la rugosité

Les états de surfaces de contact entre deux corps en mouvement relatif sont importants pour la génération de charge électrique. Il est attendu que la charge électrique générée dépende aussi du nombre de points de contact. Cette partie est consacrée à l'étude des corrélations entre la charge générée et la rugosité des éprouvettes.

Des expériences ont été réalisées :

- Avec des paires d'éprouvettes dont les rugosités sont du même ordre de grandeur.
- Avec des éprouvettes de rugosité maintenue à une valeur relativement constante et mises en contact avec des éprouvettes de rugosités différentes.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

Les expériences ont été réalisées avec trois types de polymères : PVC, PP et ABS. Les différents états d'aspérités ont été obtenus en soumettant les éprouvettes à l'action de disques abrasifs caractérisés par trois tailles de grains abrasifs 425 μm , 201 μm et 125 μm (figure II-10). Les rugosités de chaque éprouvette ont été mesurées avec le rugosimètre présenté sur la figure II-13. b). Les résultats représentés sur la figure IV-11 montrent que l'écart moyen arithmétique de rugosité (R_a) varie de façon linéaire avec la largeur moyenne des éléments du profil RS_m . Ce dernier paramètre (RS_m) indique la périodicité des motifs de la surface et donne des informations sur la fréquence de distribution des pics qui entrent en contact avec la deuxième surface. Les valeurs moyennes qui caractérisent la rugosité produite par chaque disque abrasif utilisé sont données dans le tableau IV-1

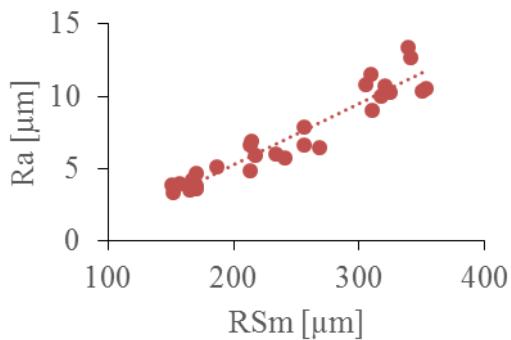


Figure IV-11. Relation entre R_a et RS_m .

Tableau IV-1. Rugosités obtenues en utilisant trois disques abrasifs différents

Granulation de disque	125 μm	201 μm	425 μm
R_a [μm]	3,9	6,3	11,2
RS_m [μm]	163	235	332
R_p [μm]	16	25	39
R_p / RS_m	0,029	0,035	0,042
$(\sigma/r_a)^{1/2}$	0,088	0,093	0,081

Pour la première série d'expériences, les éprouvettes ont été débitées en deux formats 5 mm x 15 mm x 80 mm (figure II-18, Eprouvette 4) et 5 mm x 50 mm x 180 mm (figure II-13, Eprouvette 1). Avant de commencer les expériences, la charge résiduelle sur les surfaces des éprouvettes est neutralisée avec le générateur d'ions bipolaires model SC04B de la société ELCOWA (figure II-14). Les expériences ont été effectuées avec le tribomètre linéaire (figure II-1) en deux étapes.

Dans un premier temps, la force normale initiale a été $F_N = 4 \text{ N}$, la vitesse de glissement relatif entre les échantillons $v = 88 \text{ mm/s}$, la course du support inférieur $s = 56 \text{ millimètres}$ et la durée de frottement $t = 1 \text{ min}$. Pour chaque durée de frottement, trois répétitions ont été effectuées. Les éprouvettes ont été mises dans une configuration parallèle (figure II-19, c)). La planéité a été vérifiée pour chaque expérience.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

Les cartographies de la charge électrique à la surface des éprouvettes B à la fin du processus de tribocharge ont été obtenues en utilisant le protocole de mesure décrit au sous chapitre III-3. La sonde du voltmètre électrostatique a pris des mesures du potentiel électrique, en mode « stationnaire », dans 5 x 19 points avec une résolution $r_s = 10$ mm sur l'axe X et $r = 5$ mm sur l'axe Y (figure IV-9). Le chemin de la sonde a été précédemment présenté sur la figure IV-4. Les paires des éprouvettes A-B mises en contacts glissants pour cette étude ont été les suivantes : PP-PVC, PVC-PP et PVC-ABS. Le frottement entre le PP et le PVC a généré une charge positive sur le PP et une charge négative sur la surface de l'éprouvette de PVC. Le frottement entre le PVC et l'ABS a produit une charge positive à la surface de l'éprouvette d'ABS (figure IV-12) Ces polarités sont conformes aux séries triboélectriques établies précédemment et par divers groupes de chercheurs [11,50]. Les résultats de la figure IV-12 montrent que la charge des éprouvettes augmente avec la rugosité R_a . Sur la figure IV-13 une augmentation du coefficient de frottement moyen a également été enregistrée. Les contacts très rugueux avec le même ordre de grandeur sont caractérisés par des interférences entre les aspérités. Dans la gamme de rugosités utilisées, les évolutions de la charge électrique et du rapport forces tangentielle/normale peuvent être considérées comme linéaires.

Les rugosités ont été générées dans des conditions similaires de traitement de surface. Pour un mouvement relatif entre les surfaces rugueuses, si les aspérités sont plus hautes la zone de contact latéral entre celles-ci augmente. La fréquence des pics des aspérités est inversement dépendante du paramètre RS_m . Le modèle de Greenwood et Williamson permet d'exprimer la surface réelle de contact pour une distribution d'aspérités gaussienne en fonction des paramètres de rugosité. Pour le cas où le seul paramètre varié est la rugosité, où la force normale F_N est gardée relativement constante et que les propriétés mécaniques des matériaux en contact glissant restent similaires, l'aire de contact réel A_r , exprimée par le modèle du Greenwood et Williamson est influencée par la distribution des aspérités et le rayon de celles-ci :

$$A_r \sim \frac{F_N}{E^*} \left(\frac{\sigma}{r_a} \right)^{1/2} \quad (\text{IV.1})$$

Le rapport $(\sigma/r_a)^{1/2}$ n'a pas de grandes variations pour les différents types de rugosité (tableau IV-1).

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

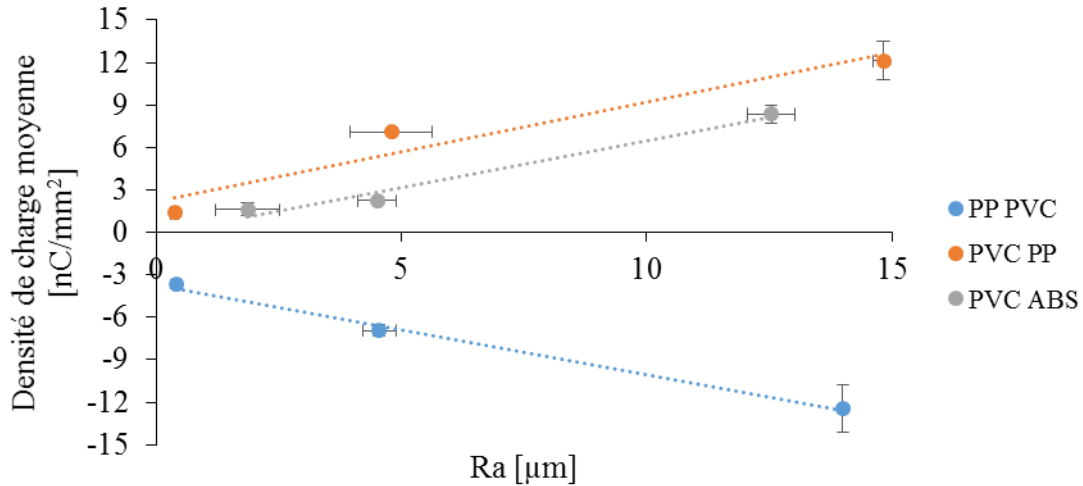


Figure IV-12. Densité de charge moyenne en fonction de la rugosité des éprouvettes A et B.

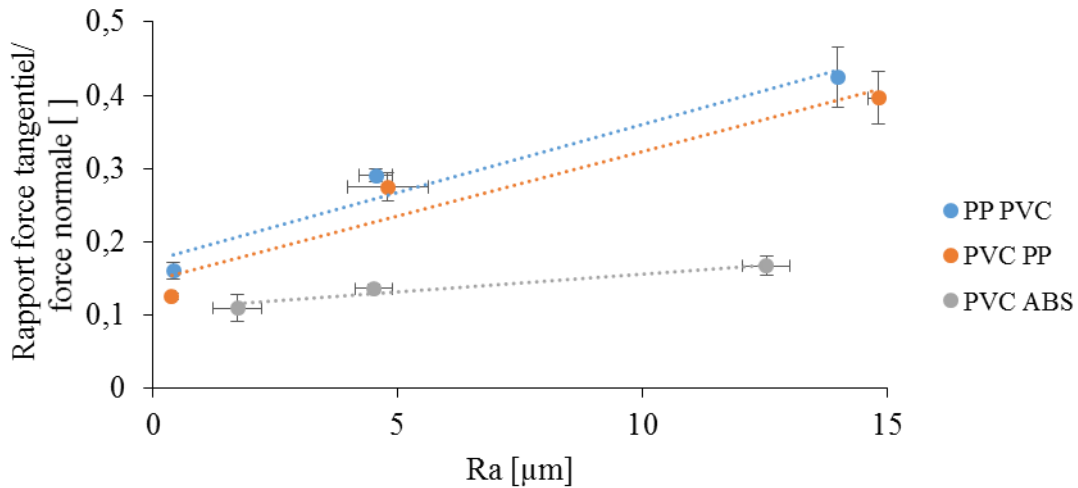


Figure IV-13. Rapport force tangentielle / force normale en fonction de la rugosité arithmétique moyenne (R_a).

La figure IV-14 montre l'interférence des aspérités pour différentes paires de rugosités, dans le cas non déformé. Pour la même rugosité des deux surfaces des éprouvettes A et B, des interférences plus profondes sont engendrées mais avec une fréquence de pics rare. Pour une rugosité plus petite les interférences ont une profondeur qui diminue mais une fréquence de contact plus élevée. Comme une augmentation de la force tangentielle est obtenue alors une sorte de phénomène de labourage se développe entre les aspérités.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

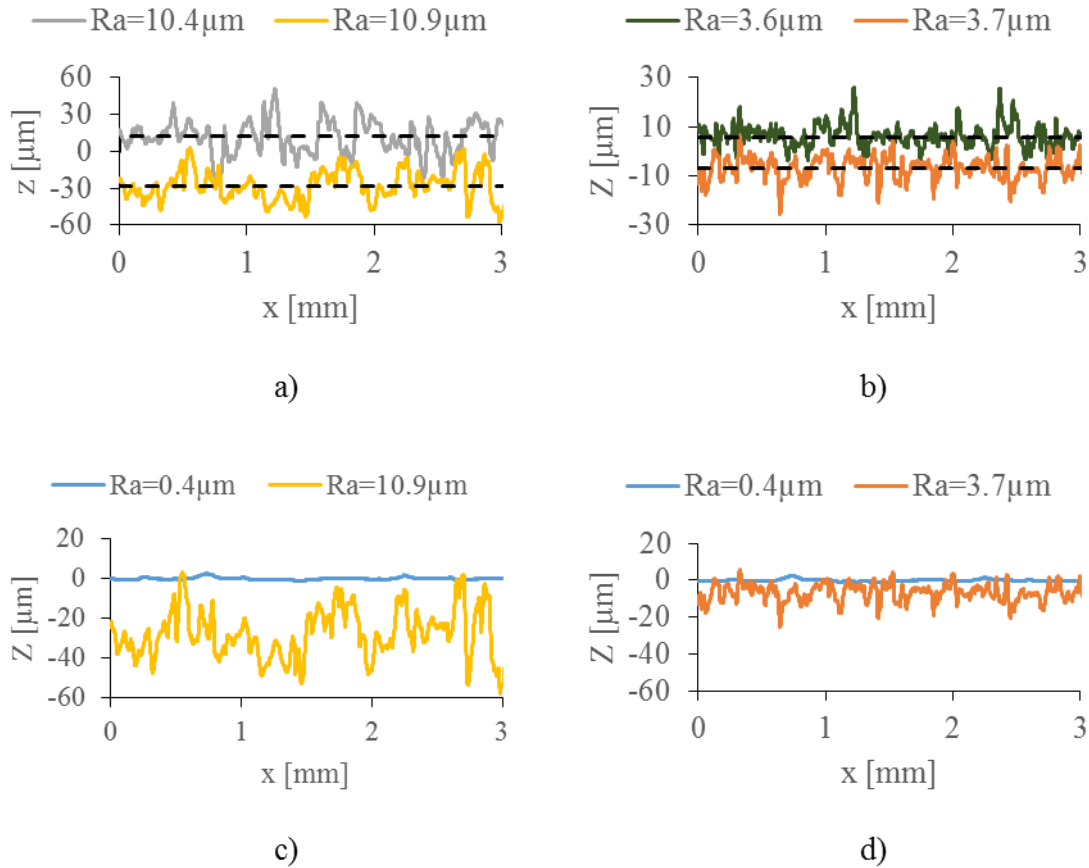


Figure IV-14. Interférences entre surfaces rugueuses.

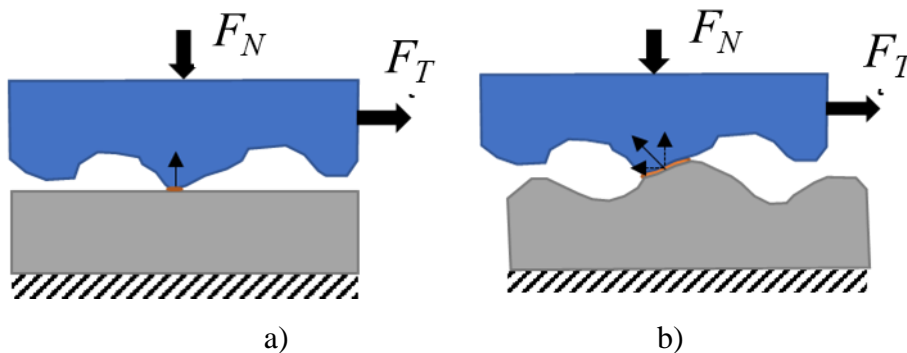


Figure IV-15. Types de contact rugueux: a) surface rugueuse-plan ; b) surface rugueuse-surface rugueuse.

La deuxième série d'essais a été réalisée pour le cas où la rugosité n'a été modifiée que pour l'éprouvette B, tandis que l'éprouvette A est restée dans l'état initial, avec une surface relativement lisse. La paire A-B des éprouvettes pour ces expériences a été ABS-PVC, étudiées dans la configuration b) de la figure II-19. Les éprouvettes en ABS ont eu les dimensions 6 mm x 15 mm x 100 mm et les éprouvettes en PVC les dimensions 5 mm x 50 mm x 180 mm. La force normale utilisée a été $F_N = 10$ N, la vitesse de glissement entre échantillons $v = 75$ mm/s, la course du support inférieur $s = 56$ millimètres avec 10 cycles de va-et-vient. Le déplacement

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

relatif entre éprouvettes a été assuré à vitesse constante par un moteur linéaire. Les conditions ambiantes ont été stables : température $T = 20\text{ °C} - 24\text{ °C}$ et humidité relative $RH = 40\% - 50\%$. La mesure de densité de charge a été effectuée selon la procédure décrite sur la figure IV-4, pour une matrice de 5×19 points, avec une résolution de $r_s = 10\text{ mm}$ dans les directions X et Y .

Les résultats de ces essais montrent que la densité de charge moyenne diminue avec l'augmentation des rugosités. Dans la configuration étudiée, la variation du rapport $(\sigma/r_a)^{1/2}$ du modèle de Greenwood et Williams reste inférieure à 15 %. Ceci ne peut justifier seul l'augmentation de la charge de $-3,48\text{ nC/mm}^2$ à $-8,43\text{ nC/mm}^2$.

Le rapport force tangentielle sur force normale garde une valeur relativement constante de 0,35 pendant les essais. Ces résultats montrent que pour ce type de contact le transfert de charge est mieux assuré pour des rugosités plus petites. La conclusion qui s'impose est que le transfert de charge est influencé par le nombre de points en contact.

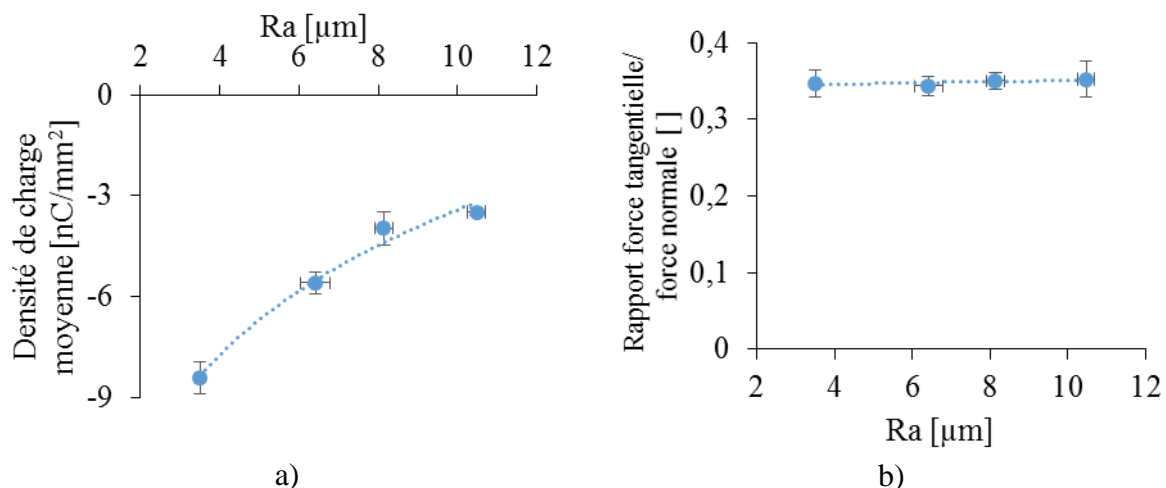


Figure IV-16. Evolution de la densité de charge (a) et du rapport force tangentielle/force normale (b) avec la rugosité pour le modèle de contact surface rugueuse-plan.

IV-3.3 Influence de la force normale de contact et de la vitesse de glissement

Des paires en ABS-PVC et PP-PVC ont été utilisées pour cette étude. Les éprouvettes ont été mises en contact comme montré sur la figure II-14 b). Elles ont été débitées aux dimensions $5\text{ mm} \times 15\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ et $5\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 180\text{ mm}$ (figure II-18). La force normale a été fixée à quatre valeurs $F_N = 2\text{ N}$, 6 N , 10 N et 14 N . La vitesse de glissement entre échantillons a été $v = 82\text{ mm/s}$ et la course du support inférieur a été réglée à $s = 56\text{ millimètres}$ pour 10 cycles de va-et-vient.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

L'étude de l'influence de la vitesse a été réalisée dans les conditions suivantes : la vitesse de glissement entre échantillons $v = 70$ mm/s, 82 mm/s, 95 mm/s, 110 mm/s et 122 mm/s, force normale $F_N = 10$ N. Les conditions ambiantes sont restées relativement stables : température $T = 23^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}$ et humidité relative $RH = 35\% - 45\%$. La mesure de densité de charge a été effectuée selon la procédure décrite sur la figure IV-4, pour une matrice de 5×19 points avec une résolution de $r = 10$ mm selon les directions X et Y . Les rugosités sont gardées les mêmes pour toutes les éprouvettes pendant cette étude, $R_{a\text{ ABS}} = 0,5 \pm 0,1 \mu\text{m}$, $R_{a\text{ PVC}} = 1,2 \pm 0,1 \mu\text{m}$ and $R_{a\text{ PP}} = 0,1 \pm 0,02 \mu\text{m}$.

La figure IV-17 présente l'évolution de la densité moyenne de charge à la surface des éprouvettes, pour les valeurs limites de la force normale dans l'intervalle 2 N - 14 N et de la vitesse de glissement dans l'intervalle de 70 mm / s - 122 mm / s. La figure IV-17 a) montre une variation linéaire entre la valeur absolue de la densité de charge électrique et la force normale de contact. Ce résultat est cohérent puisque l'aire réelle de contact a une variation linéaire avec la force normale de contact (équation IV.1). L'augmentation de la densité de charge électrique avec la force normale de contact est confirmée par d'autres chercheurs [12,59]. La vitesse de glissement n'a pas d'influence sur la densité de charge moyenne. Ce résultat est également confirmé par d'autres chercheurs [12].

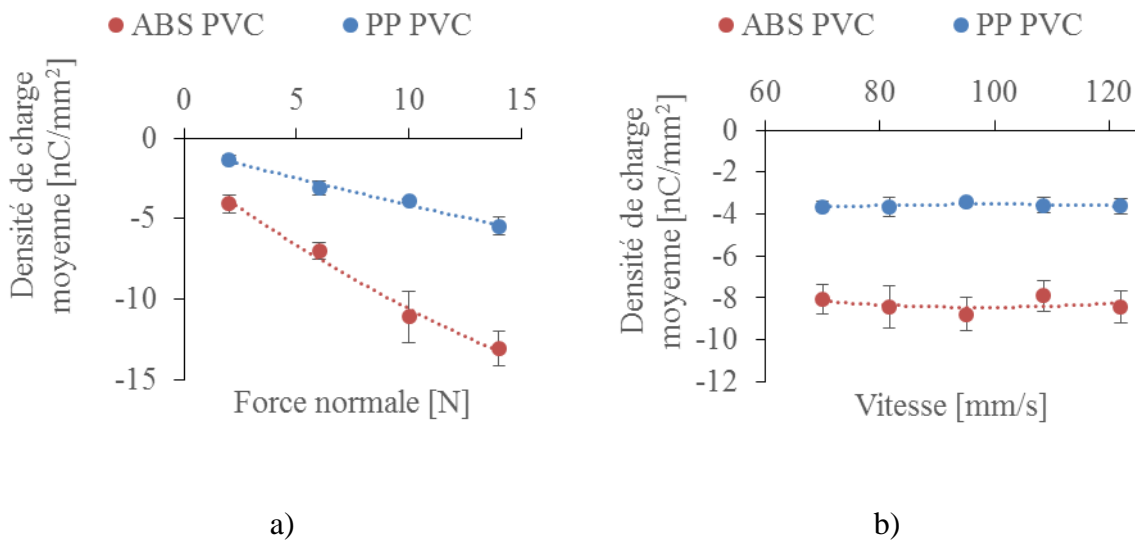


Figure IV-17. a) Influence de la force normale sur la génération de charge électrique ;
b) Influence de la vitesse de glissement sur la génération de charge électrique;

IV-4 Corrélation entre la charge électrique et la température produite par frottement

Pendant les expérimentations précédentes quelques mesures préliminaires ont été réalisées avec une caméra infrarouge pour étudier la conformité du contact entre les surfaces. Les résultats des mesures ont montré que la température à la surface des éprouvettes n'était pas uniformément distribuée. La température de la surface est liée à la pression de contact, au coefficient de frottement et à la vitesse de glissement [19,168]. Ce sous chapitre est consacré à l'étude de la corrélation entre les distributions de la charge électrique et de la température à la surface des échantillons.

L'étude a été réalisée avec des paires d'éprouvettes PVC – ABS. Les dimensions des éprouvettes de PVC et d'ABS ont été 5 mm x 15 mm x 100 mm respectivement 5 mm x 50 mm x 180 mm. Les éprouvettes ont été mises dans une configuration perpendiculaire (figure II-19 b) et la course de glissement a été $s = 55$ mm. Le tribomètre décrit dans le chapitre II-1 a été équipé d'un vérin linéaire à vitesse constante. Plusieurs séries de paramètres ont été utilisées pour cette étude, en les faisant varier un à la fois:

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

Des cartographies de densité de charge électrique et de champ de température ont été numérisées pour chaque éprouvette d'ABS utilisée. Les mesures de densité de charge ont été réalisées en utilisant le protocole représenté sur la figure IV-4. L'installation présentée dans le sous-chapitre III-1.2 a été utilisée pour les mesure de charge, selon la méthode de conversion décrite dans le sous-chapitre III-3. Les cartographies de température ont été obtenues avec l'installation présentée dans le chapitre II-3.1. Les cartographies ont été collectées sous une forme matricielle : 21 x 73 points de mesure pour la charge et la température. La résolution spatiale entre deux mesurées voisines dans cette matrice est de 2,5 mm. La corrélation entre les deux matrices de données est réalisée en utilisant une routine en Matlab qui implémente la formule de Pearson en 2 D [169] :

$$C_{corr} = \frac{\sum_m \sum_n (\sigma_{m,n} - \bar{\sigma})(T_{m,n} - \bar{T})}{\sqrt{(\sum_m \sum_n (\sigma_{m,n} - \bar{\sigma})^2)(\sum_m \sum_n (T_{m,n} - \bar{T})^2)}} \quad (IV.2)$$

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

où σ est la matrice des mesures de la densité de charge, T est la matrice des mesures de température, m et n sont les indices de position des éléments de la matrice, $\bar{\sigma}$ et \bar{T} sont les deux valeurs moyennes calculées pour les éléments de chaque matrice. Plus le coefficient de corrélation C_{corr} a une valeur proche de 1, meilleure est la corrélation. La figure IV-18 montre que la corrélation s'est située entre 0,61 et 0,82. Une corrélation plus faible a été obtenue pour les vitesses de 25 mm/s et 100 mm/s où les variations de densité de charge ont été les plus grandes. La vitesse de glissement est un paramètre qui n'influence pas la valeur moyenne de charge mais a des influences sur l'uniformité de la distribution de la charge. Cette distribution non uniforme réduit le niveau de corrélation pour les deux vitesses extrêmes de notre étude.

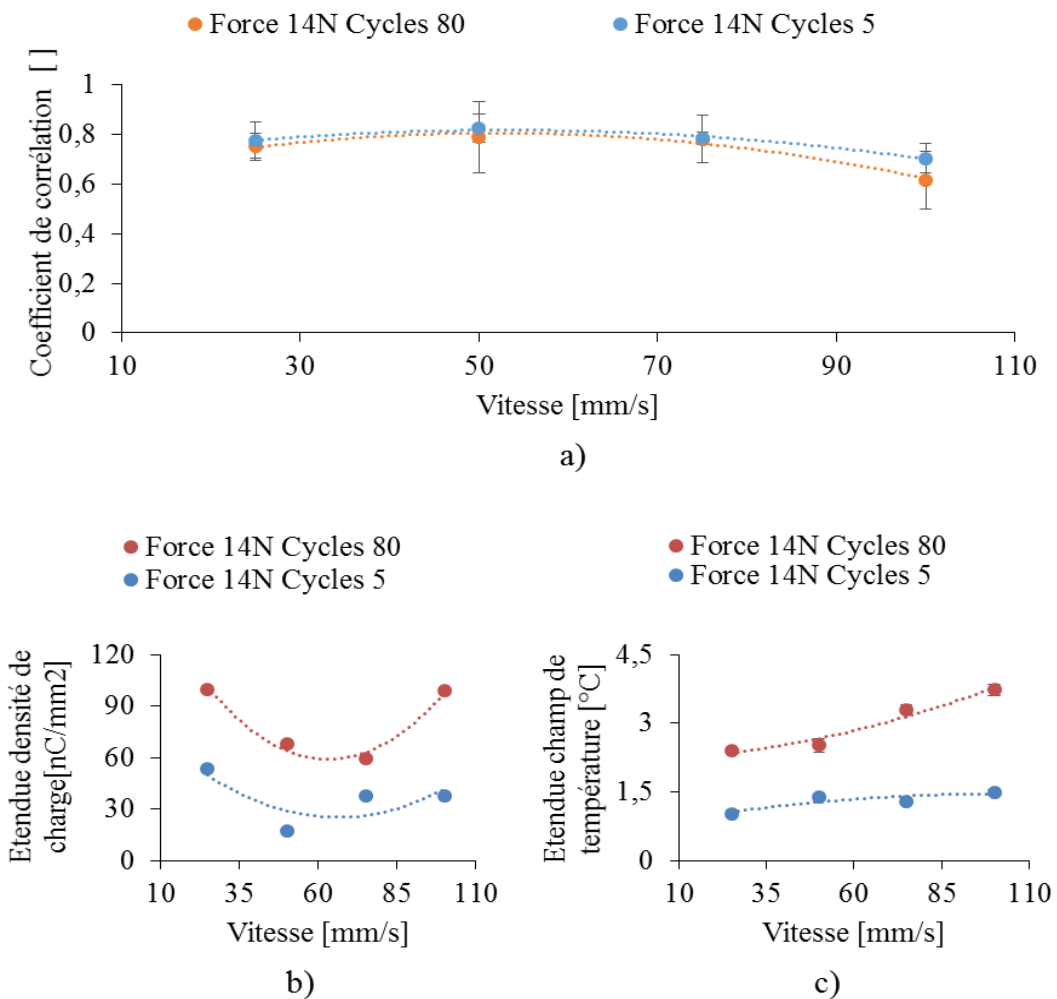


Figure IV-18. Corrélations densité de charge - champ de température : $F_N=14$ N; $C_y = 80$ cycles / $F_N=14$ N; $C_y = 5$ cycles; Variation de la densité de charge moyenne b) respectivement de la température moyenne c)

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

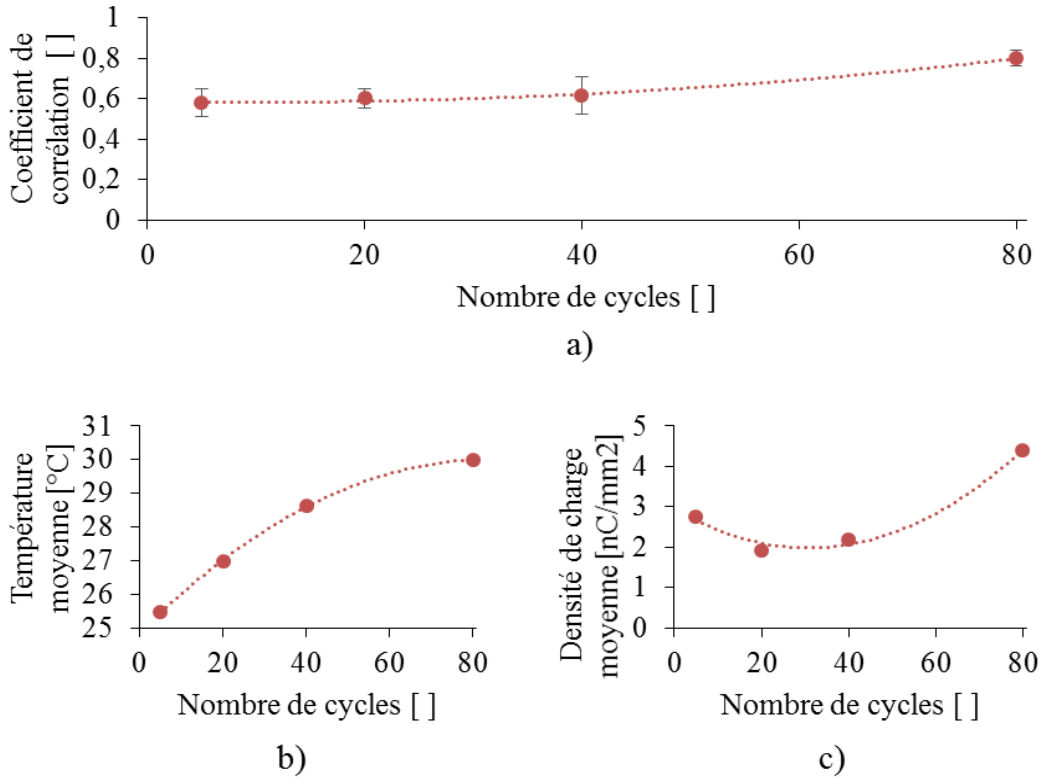


Figure IV-19. a) Corrélations densité de charge - champ de température : $F_N=2$ N; $v = 25$ mm/s; Variation de la température moyenne b) et de la densité de charge moyenne c).

La figure IV-19. a) illustre la corrélation pour un nombre de cycles variable. Les essais ont été réalisés à une température ambiante $T = 25$ °C - 26 °C et une humidité relative $RH = 35\%$. Les paramètres de vitesse et de force normale ont été diminués à 2 N et 25 mm/s pour réduire l'effet de température qui pourrait se produire. Le coefficient de corrélation augmente avec le nombre de cycles réalisés de $0,59$ pour 5 cycles de frottement à $0,82$ pour 80 cycles. Les figures IV-19. b) et c) présentent respectivement les évolutions de la température moyenne et la densité de charge moyenne en fonction du nombre de cycles.

Les résultats de la figure IV-20 montrent la corrélation charge électrique – température pour une variation de la force normale de contact. Le coefficient de corrélation augmente avec la force normale appliquée, de $0,56$ pour une force de 2 N à $0,77$ pour 14 N. La température ambiante et l'humidité relative sont restées stables : $T = 27$ °C – $27,5$ °C et $RH = 50\%$. Les valeurs de densité de charge moyenne $1,17$ nC/mm² pour $F_N=2$ N; $v = 100$ mm/s; $Cy = 5$ (figure IV-20) sont proches des celles obtenues pour $F_N=2$ N; $v = 25$ mm/s; $Cy = 5$ ($2,75$ nC/mm² ; figure IV-19), puisque la vitesse n'influence pas le niveau de charge. La valeur plus faible montrée sur la figure IV-20 est due à une humidité plus élevée qui a diminué la génération de charge [50].

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

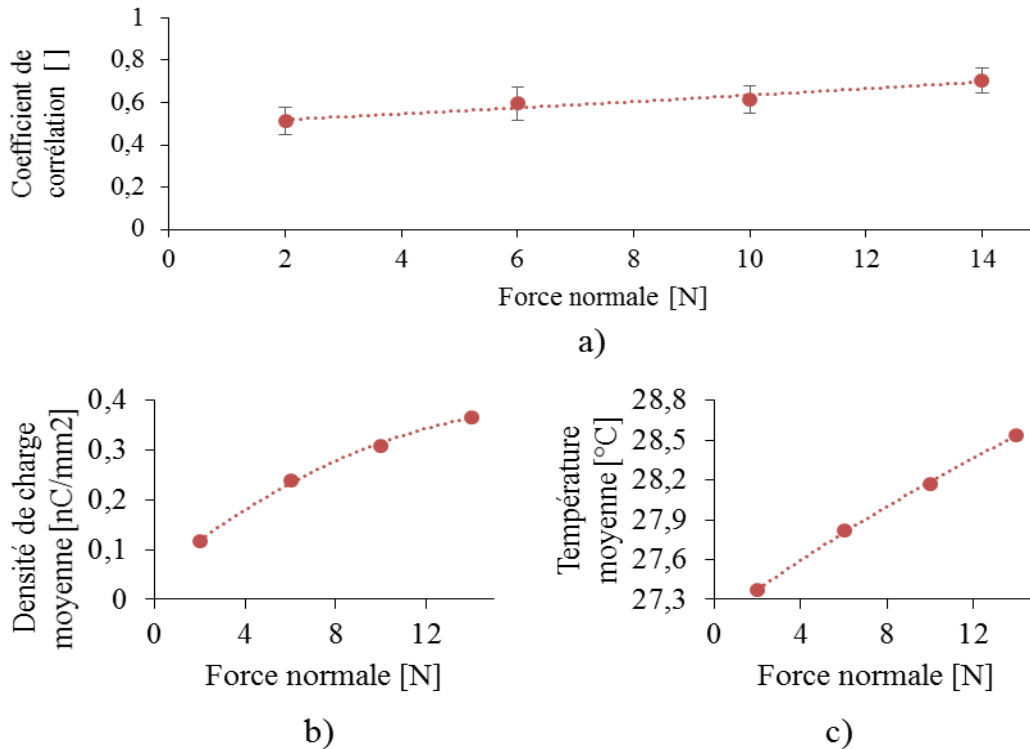


Figure IV-20. a) Corrélations densité de charge - champ de température pour $v = 25$ mm/s; $Cy = 5$ cycles. Variation de la densité de charge moyenne b) et de la température moyenne c).

S'agissant de l'influence de la vitesse de glissement, les résultats de la figure IV-21 montrent une corrélation faible située entre 0,42 et 0,57. Une corrélation plus faible est réalisée pour les vitesses de 50 mm/s et 75 mm/s où la variation de la densité de charge est plus petite. Cette faible corrélation est causée par une faible augmentation de la température. Dans les conditions de cette expérimentation, la vitesse n'a que de faibles effets sur la génération de charge et sur l'augmentation de la température.

Les résultats expérimentaux sur la corrélation de la densité de charge-champ de température ont montré qu'un coefficient de corrélation plus grand est représentatif d'augmentations des niveaux de charge et de température. Un exemple de cartographie est montré sur la figure IV-22. La corrélation augmente avec la force normale de contact et avec le nombre de cycles pouvant atteindre une valeur supérieure à 0,80. L'effet de la vitesse est faible pour la corrélation car la densité de charge moyenne reste relativement constante.

Une bonne corrélation est obtenue sur les valeurs de forces et de cycles de frottement plus élevées où la répétabilité des deux phénomènes est forte. Les résultats confirment qu'une certaine relation existe entre les deux phénomènes et une analyse plus détaillée pourrait donner des informations sur le mécanisme de génération de charge.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

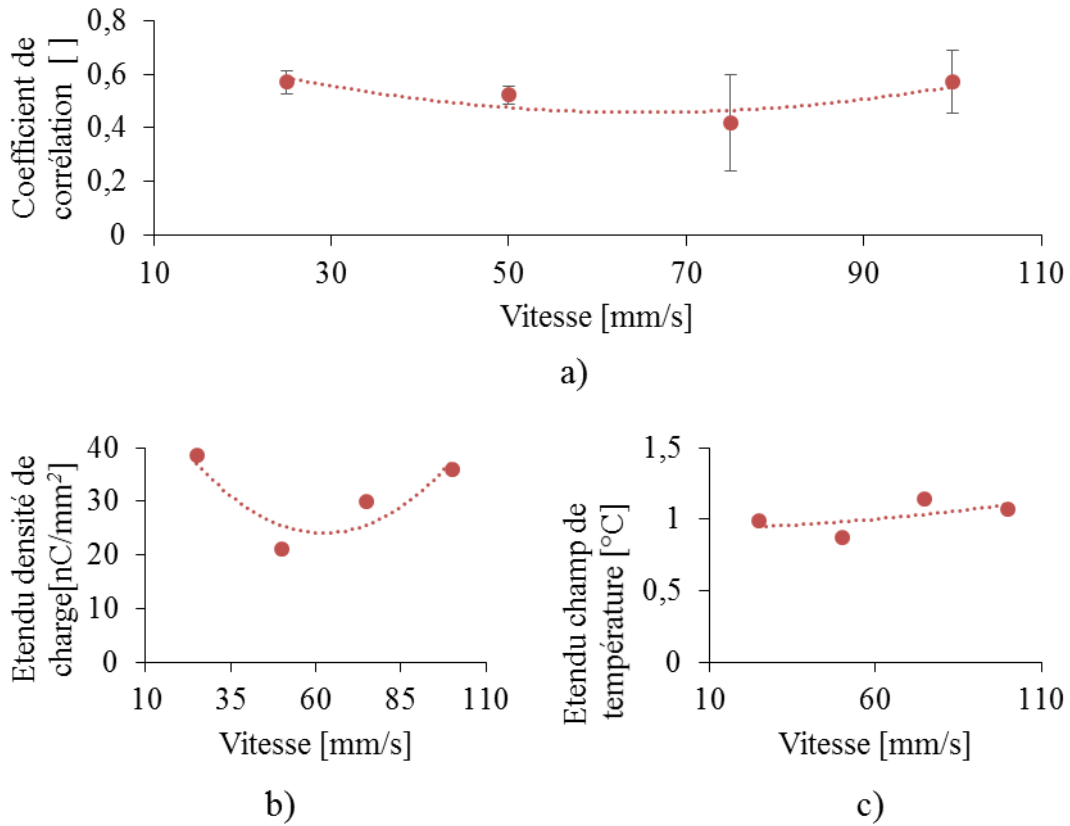


Figure IV-21. a) Corrélations densité de charge - champ de température pour $F_N=2$ N; $C_y = 5$ cycles; Variation de l'étendue de la densité de charge respectivement b) de l'étendue de la température c).

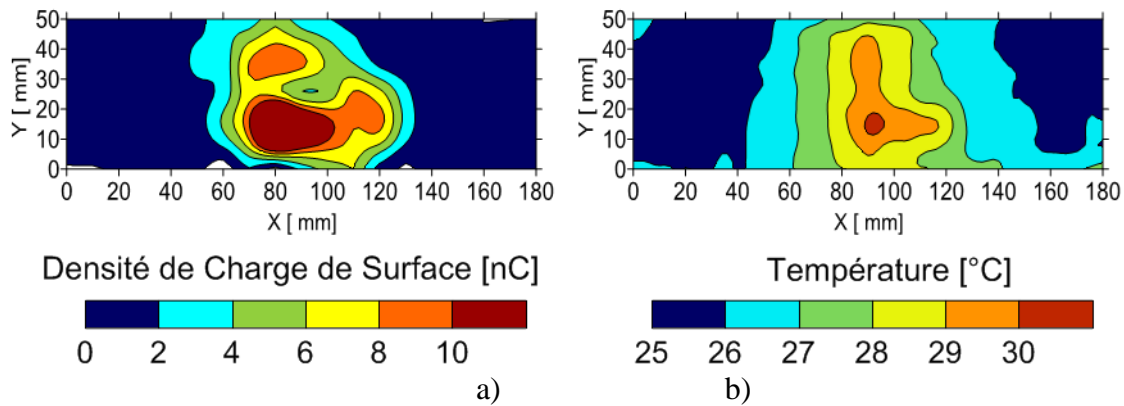


Figure IV-22. Comparaison des cartographies pour $F_N=2$ N; $v = 25$ mm/s; $C_y = 80$ cycles; a) charge électrostatique générée par frottement ; b) température générée par frottement

IV-5 Effet de la charge électrique sur le frottement sec

L'objet de cette étude est la caractérisation de l'effet de la charge électrique sur le frottement sec. La première étape, a visé l'évaluation de l'influence de la charge générée par effet triboélectrique sur le frottement. Ensuite l'effet de la charge déposée par décharge couronne a été investigué.

IV-5.1 Effet de la charge électrique générée par effet triboélectrique sur le frottement sec

L'étude a été réalisée avec des paires d'éprouvettes PP-PVC. Les dimensions des éprouvettes ont été : PP 5 mm x 15 mm x 15 mm et PVC 5 mm x 50 mm x 180 mm. Les éprouvettes ont été mises dans la configuration montrée sur la figure II-19 d) et la course de glissement a été $s = 55$ mm. Le tribomètre décrit dans le chapitre II-1 a été utilisé et le mouvement relatif entre les éprouvettes a été obtenu avec un système bielle-manivelle.

Des cartographies de densité de charge ont été numérisées pour chaque éprouvette de PVC. Les mesures de densité de charge ont été réalisées selon le protocole représenté sur la figure IV-9. L'installation présentée dans le sous-chapitre III-1.2 a été utilisée pour les mesure de charge, selon la méthode de conversion décrite dans le sous-chapitre III-3. Les cartographies ont une résolution spatiale $r_x = 10$ mm sur la direction X et $r_y = 5$ mm sur la direction Y .

Les paramètres d'essai sont $F_N = 20$ N, $v = 88$ mm/s et le temps de glissement $t = 1,75$ s, 30 s, 60 s, 300 s. Les essais ont été répétés au moins deux fois pour chaque série de paramètres.

La figure IV-23 montre les résultats des cartographies de charge pour les quatre durées de frottement. Les surfaces des éprouvettes B en PVC ne sont pas uniformément chargées. Des charges négatives et positives sont générées sur la même surface. Sur la figure IV-24 est représentée la cartographie de densité de charge pour une éprouvette chargée pendant $t = 300$ s.

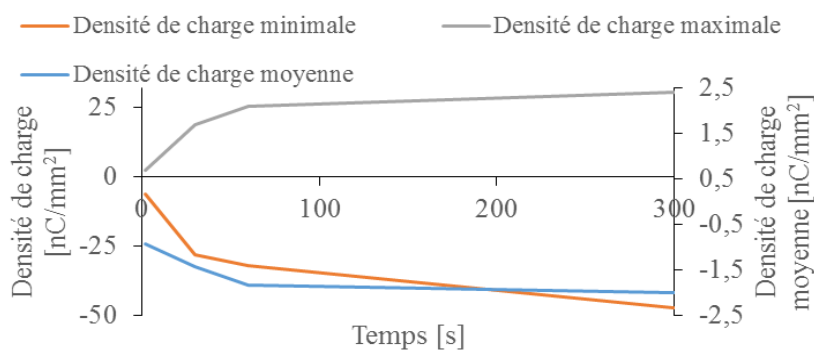


Figure IV-23. Densité de charge sur l'éprouvette en PVC pour le frottement entre PP et PVC.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

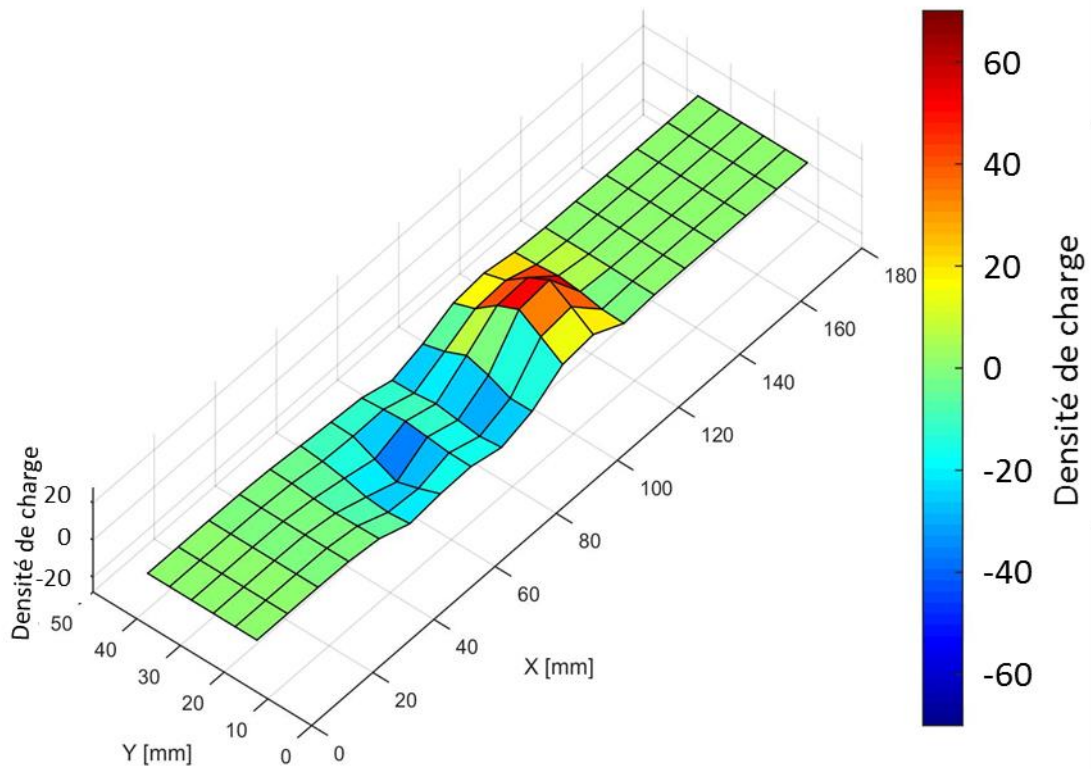


Figure IV-24. Cartographie de la densité de charge sur l'éprouvette en PVC du frottement entre le PP et le PVC: $F_N=20$ N, $v = 88$ mm/s, $t = 300$ s ;

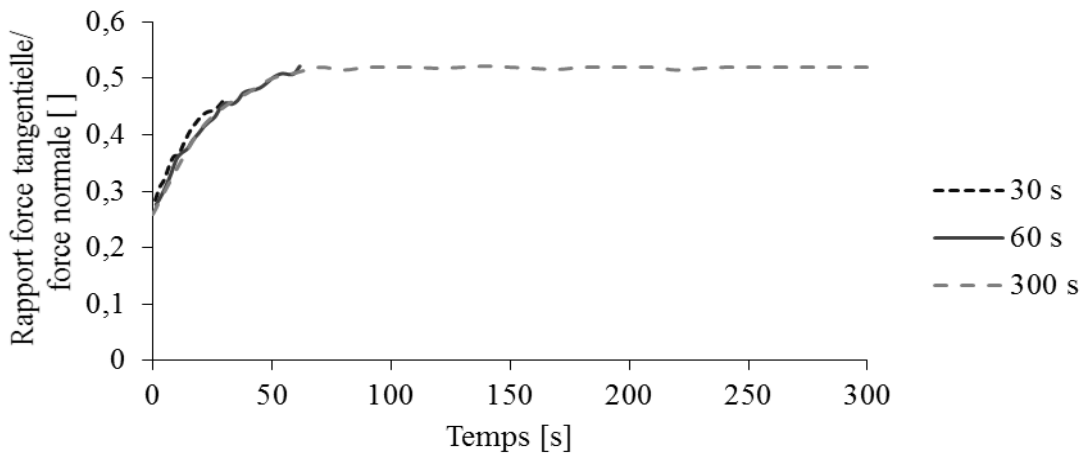


Figure IV-25. . Evolution du rapport force tangentielle/ force normale pour trois durées de temps: 30 s, 60 s, 300 s.

Pendant le frottement entre les deux éprouvettes, une augmentation de force est identifiée. Ainsi, la force tangentielle augmente de la valeur de 5,2 N au début de frottement à 10 N après 80 s et reste constante (figure IV-25).

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

IV-5.2 Effet de la charge électrique générée par effet couronne sur le frottement sec

L'étude a été réalisée avec des paires d'éprouvettes ABS-PVC. Les dimensions des éprouvettes sont celles du paragraphe précédent (ABS : 5 mm x 15 mm x 15 mm ; PVC : 5 mm x 50 mm x 180 mm). Les éprouvettes ont été mises dans la configuration décrite sur la figure II-19 d) et la course de glissement a été gardée à $s = 55$ mm. Le tribomètre décrit dans le chapitre II-1 a été utilisé et le mouvement relatif entre les éprouvettes a été assuré avec un vérin linéaire.

Les mesures du potentiel de surface ont été réalisées sur une seule ligne centrale parallèle avec la direction X de mesure. Cette mesure est suffisante pour identifier les non uniformités de la charge. Les cartographies ont une résolution spatiale $r_x = 3$ mm sur la direction X . Le potentiel est converti en densité de charge. Les paramètres d'essai ont été $F_N = 10$ N, $v = 35$ mm/s et $C_y = 10$ cycles. Avant de mettre les éprouvettes en contact glissant, chaque éprouvette inférieure a été chargée par effet couronne avec l'installation décrite dans la section II-2.1. Les éprouvettes ont été chargées avec une différence de potentiel entre la grille et la plaque liée à la terre fixée dans l'intervalle $V_g = -6$ kV à 6 kV avec par pas de 1kV. La résistance liée à la grille a été fixée à $R_g = 200$ M Ω . L'intensité I_g qui passe à travers la résistance a été variée pour obtenir les valeurs équivalentes de tension V_g (équation II.2). Les mesures de potentiel de surface ont été réalisées après le chargement couronne et après le frottement des éprouvettes.

Les mesures de la figure IV-26 montrent une augmentation de la force tangentielle avec la tension de la grille pour les deux polarités. En polarité négative l'augmentation de la force est plus stable et la force tangentielle augmente progressivement, tandis que la polarité positive donne une augmentation de force tangentielle mais avec des fluctuations. La stabilité obtenue pour la polarité négative peut se justifier par le fait que l'ABS en frottement avec le PVC génère une charge négative sur la surface du PVC (figure IV-2).

La figure IV-27 montre la variation de la distribution de charge sur la surface des éprouvettes. Ce phénomène est plus intense avec l'augmentation de potentiel. La saturation intervient vers les valeurs de -6 kV.

Pour la polarité positive, les perturbations générées par frottement sont plus intenses (figure IV-28). La charge positive déposée sur la surface de l'éprouvette développe une tendance de changement de signe et évolue vers une charge négative. Les plus grandes valeurs de la force ont été obtenues pour les valeurs de potentiel de 1 kV, 2 kV, 4 kV, et 6 kV où la densité de charge change de signe. Le niveau de charge arrive à - 20 nC/mm².

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

Les expériences réalisées sur l'effet de la charge électrostatique sur le frottement entre deux polymères conduit à la conclusion que la charge change les propriétés de frottement et augmente la force tangentielle entre les deux plaques en polymères. Cette dernière expérience confirme que la force tangentielle augmente avec une charge électrique appliquée de l'extérieure. Le chargement avec une charge positive est annulé par effet tribologique où la surface de PVC en frottement avec l'ABS se charge naturellement avec une charge négative.

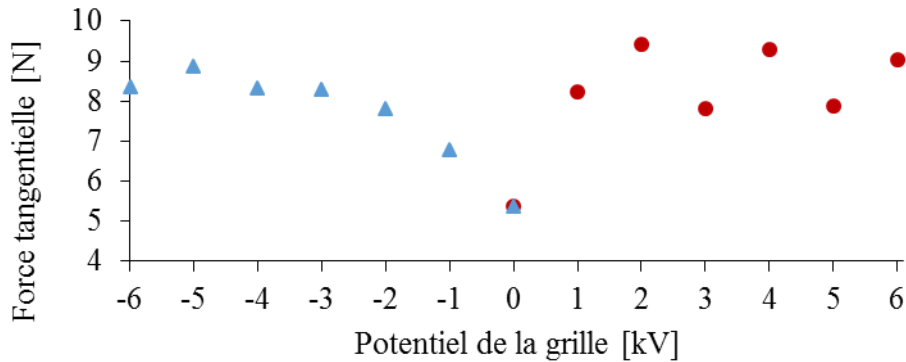


Figure IV-26. . Evolution de la force tangentielle moyenne après 10 cycles en fonction du potentiel de la grille.

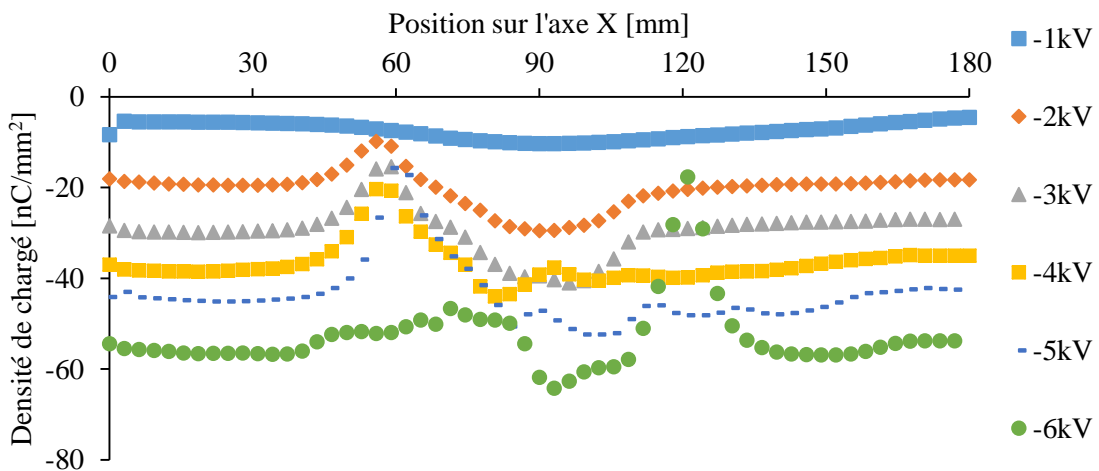


Figure IV-27. Evolution de la densité de charge après le frottement des éprouvettes pour différentes valeurs du potentiel de la grille en polarité négative.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique à l'interface solide-solide dans un mouvement de translation

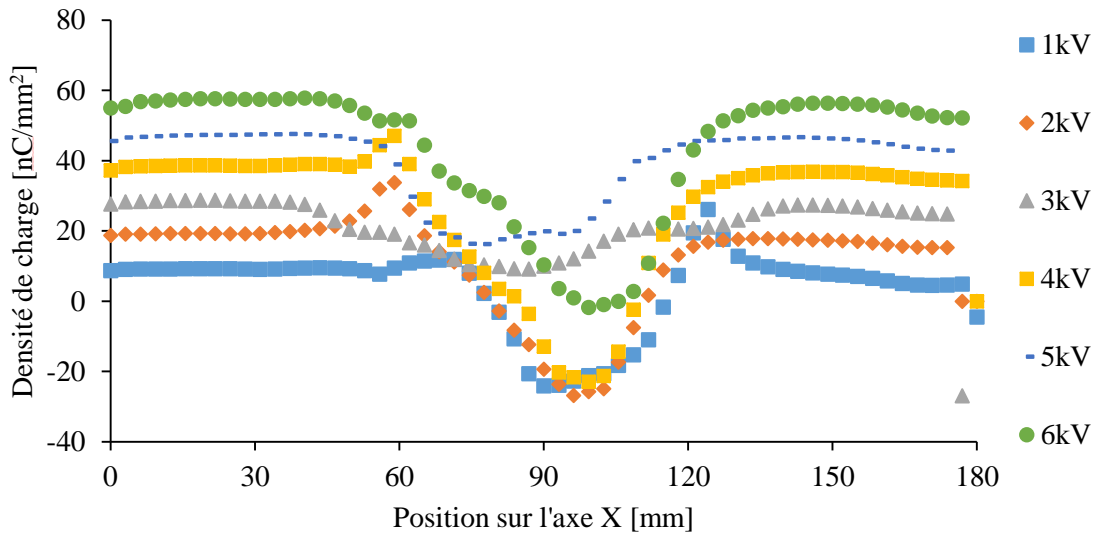


Figure IV-28. Evolution de la densité de charge après le frottement des éprouvettes en fonction du potentiel de la grille en polarité positive.

IV-6 Conclusions

L'objectif de cette étude est de contribuer à la compréhension des phénomènes électrostatique présents dans un contact glissant. Les principales conclusions sont :

1. La charge générée par frottement du PVC, PP, PE et ABS ne suit pas complétement le comportement prédit par les séries triboélectriques établies par d'autres chercheurs.
2. La comparaison de la génération de charge sur la surface d'un polymère par effet couronne et par effet tribologique montre que le premier mécanisme donne une distribution de charge plus uniforme, tandis que le deuxième produit une charge plus stable qui demeure dans le temps.
3. La charge générée par frottement est plus grande si les deux surfaces en contact sont rugueuses. Si le contact est réalisé entre une surface lisse et une surface rugueuse alors la charge générée est plus petite quand la rugosité de la surface rugueuse augmente.
4. La charge augmente avec la force de contact appliquée tandis qu'une variation de vitesse ne change pas le niveau de charge généré.
5. La génération de la charge électrique par frottement et l'augmentation de température sur la surface sont deux phénomènes dont la corrélation est de coefficient $C_{Corr} = 0,8$.
6. L'influence de la charge électrique sur les phénomènes de frottement entre polymères est identifiée. La force tangentielle a tendance à augmenter avec la charge électrique. Ce phénomène est encore renforcé pour le frottement des éprouvettes pré-chargées par effet couronne.

Chapitre V Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Les charges électriques sur les surfaces des polymères solides produites par le mécanisme physique triboélectrique [59] impactent significativement le comportement d'un contact glissant avec frottement. Une augmentation de la force tangentielle de frottement a été confirmée pour le contact sec, interface solide-solide. Ce chapitre est centré sur l'étude de l'influence de la charge électrique pour une partie complémentaire, à l'interface solide-liquide.

Deux installations différentes ont été utilisées pour cette étude. La première est un ensemble de dispositifs permettant de déterminer l'influence de la charge électrique sur les angles de contacts de gouttelettes déposées sur des surfaces chargées des polymères. Les études sont réalisées sur trois polymères que sont le PVC, l'ABS et le PP, en déposant des gouttelettes de trois liquides que sont l'eau distillée, l'huile ISO VG 46 et l'huile Total Activa 5000 15W40.

La seconde installation est un tribomètre linéaire modifié pour l'étude d'un contact glissant lubrifié. Les essais ont été réalisés dans une configuration ABS - ISO VG 46 - PVC. L'étude a porté sur trois facteurs : la force normale de contact, la vitesse de glissement et la charge électrique. Leurs effets sur la force tangentielle de contact ont été modélisés à l'aide de la méthode de plans des expériences.

V-1 Effet de la charge électrique sur l'angle de contact

Le protocole expérimental utilisé pour la mesure des angles de contacts a été présenté dans le chapitre II-2.2. Les essais ont été réalisés avec trois types de polymères : le PVC, l'ABS et le PP, et trois types de liquides : l'eau distillée et deux huiles, ISO VG 46 et Total Activa 5000 15W40 (figure V-I). La surface des éprouvettes a été chargée avec le système d'électrodes de type « triode ». Les expériences ont été réalisées pour différents états de charge électrique de la surface du polymère, en modifiant le niveau du potentiel de la grille du système d'électrodes. La résistance entre la grille et la terre a été fixée à $R_g = 200 \text{ M}\Omega$. L'intensité du courant a été variée pour modifier la tension de la grille par pas de 1 kV dans l'intervalle $V_g = -7 \text{ kV}$ à 7 kV . Une expérience a également été réalisée avec la surface non chargée. Les expériences ont été répétées au moins deux fois pour chaque paire solide-liquide.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Un phénomène de détachement prématuré de la goutte à la sortie de l'aiguille a été identifié pendant les essais préliminaires. En effet la goutte voit ses dimensions diminuer à cause du champ électrique généré par la surface des polymères chargés électriquement. Pour veiller à la cohérence des résultats, les dimensions de la goutte formée doivent être constantes. Un écran métallique lié à la terre a été mis autour de la zone concernée, afin de protéger la formation de la goutte des éventuels effets perturbateurs du champ électrique. Les surfaces des polymères ont été nettoyées avec de l'alcool éthylique pour éliminer les particules qui pourraient contaminer les surfaces des matériaux. Avant chaque essai, la charge résiduelle a été éliminée avec le neutralisateur présenté au chapitre II-3.3.

Les résultats de la figure V-2 montrent les évolutions des angles de contacts de gouttelettes d'eau déposées sur les surfaces chargées des trois polymères utilisés. Pour tous ces polymères, les angles de contacts sont inférieurs à 90° indiquant ainsi le caractère hydrophile de ces matériaux.

L'angle de contact du PP pour une surface non chargée est de 80° . L'angle de contact augmente jusqu'à 87° pour -10 nC/mm^2 , puis il diminue. En polarité positive l'angle augmente jusqu'à 84° pour 10 nC/mm^2 . Ce niveau est relativement constant jusqu'à 40 nC/mm^2 et diminue après à 80° [82,170].

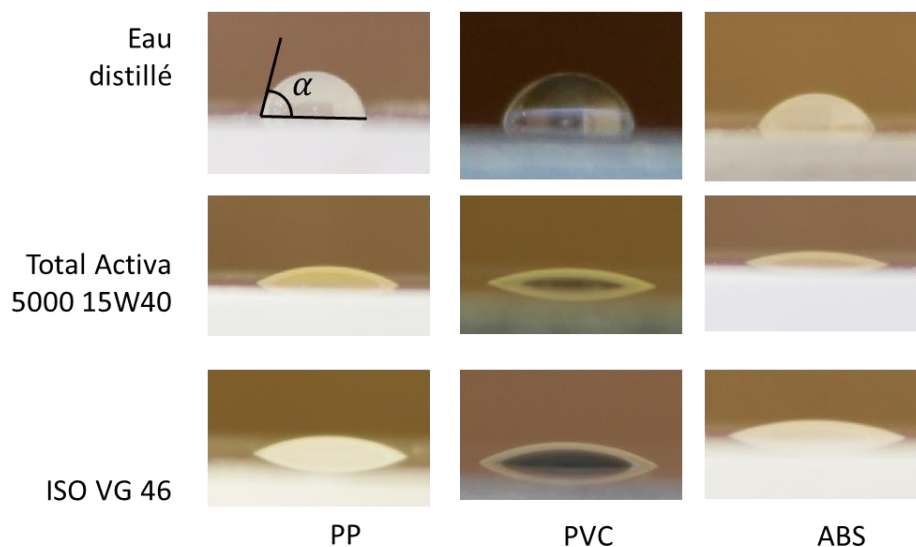


Figure V-1. Combinaisons de paires polymères-liquides pour la mesure des angles de contacts.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Dans le cas du PVC, l'angle de contact de la surface non chargée est de 80° . Pour $\pm 10 \text{ nC/mm}^2$ l'angle de contact augmente à 83° . Il diminue jusqu'à 70° pour une densité de charge de -70 nC/mm^2 et jusqu'à 74° pour une densité de charge de 70 nC/mm^2 .

L'ABS est caractérisé par l'angle de contact le plus petit (69°). La diminution de l'angle de contact est liée à une augmentation de la tension de surface [171,172]. La présence d'une charge électrique diminue l'angle de contact pour les deux polarités. En polarité négative l'angle de contact diminue à 61° pour -10 nC/mm^2 et reste relativement stable dans l'intervalle $58^\circ - 61^\circ$ pour les niveaux de charge plus élevés. La charge électrique positive diminue l'angle de contact à 63° pour 10 nC/mm^2 et jusqu'à 50° , pour une densité de charge de 70 nC/mm^2 .

Le dépôt de charge électrique par effet couronne augmente le caractère hydrophile des polymères avec le niveau de charge. Cet effet est encore plus accentué pour l'ABS. Pour les trois polymères examinés, on note des dissymétries des évolutions des angles de contacts par rapport à la polarité de la décharge couronne.

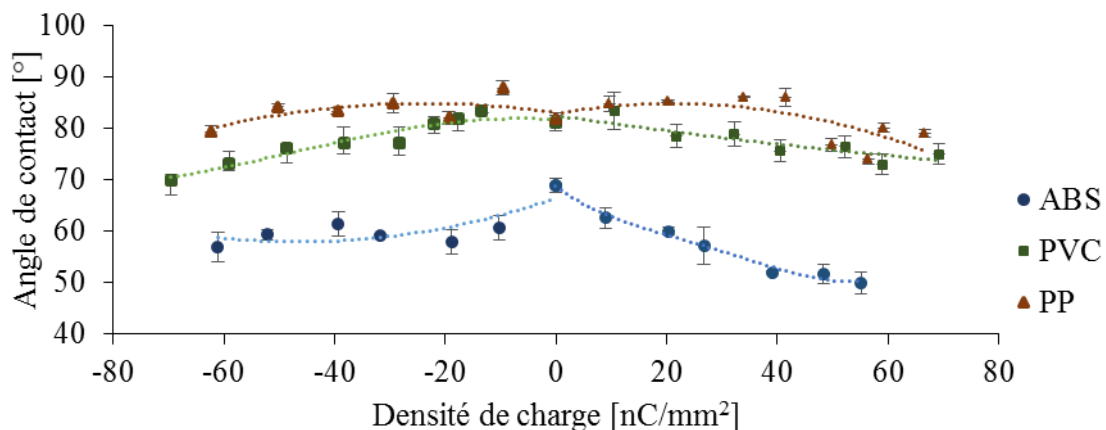


Figure V-2. Mesures d'angles de contacts de l'eau sur les surfaces chargées de l'ABS du PVC et du PP.

La figure V-3 montre les évolutions d'angles de contacts des gouttes de l'huile ISO VG 46 déposées sur les surfaces chargées des trois polymères ABS, PVC et PP. Pour les trois polymères les angles de contacts sont inférieurs à 30° . Ceci indique que pour ce liquide les polymères ont une tension de surface plus grande. Les angles de contacts pour les surfaces non chargées sont de 29° pour le PP et le PVC et de $26,5^\circ$ pour l'ABS. Les valeurs s'inscrivent dans la même tendance que les résultats obtenus avec l'eau où l'angle de contact le plus petit est obtenu pour l'ABS.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Pour le PP l'angle de contact arrive à un minimum de 17° pour -40 nC/mm^2 , augmente ensuite à 25° pour la densité de charge de -70 nC/mm^2 . Un comportement similaire est obtenu pour la polarité positive où le minimum de 18° est réalisé à 20 nC/mm^2 . L'angle de contact remonte à $26,5^\circ$ pour une densité de charge de 60 nC/mm^2 . Ceci confirme la tendance hydrophile du PP à des densités élevées de la charge électrique de surface.

Les mesures pour le PVC montrent une tendance à la diminution de l'angle de contact pour la polarité négative. La polarité positive a une tendance sinusoïdale. La polarité positive diminue l'angle de contact à $23,5^\circ$ pour 20 nC/mm^2 , augmente à 29° pour 30 nC/mm^2 pour diminuer ensuite à 24° pour 70 nC/mm^2 .

L'ABS avec l'angle de contact le plus petit montre une tendance de diminution pour les deux polarités.

Pour les trois polymères examinés, on note également des dissymétries des évolutions des angles de contacts par rapport à la polarité de la décharge couronne. Ces dissymétries sont différentes de celles obtenues avec l'eau.

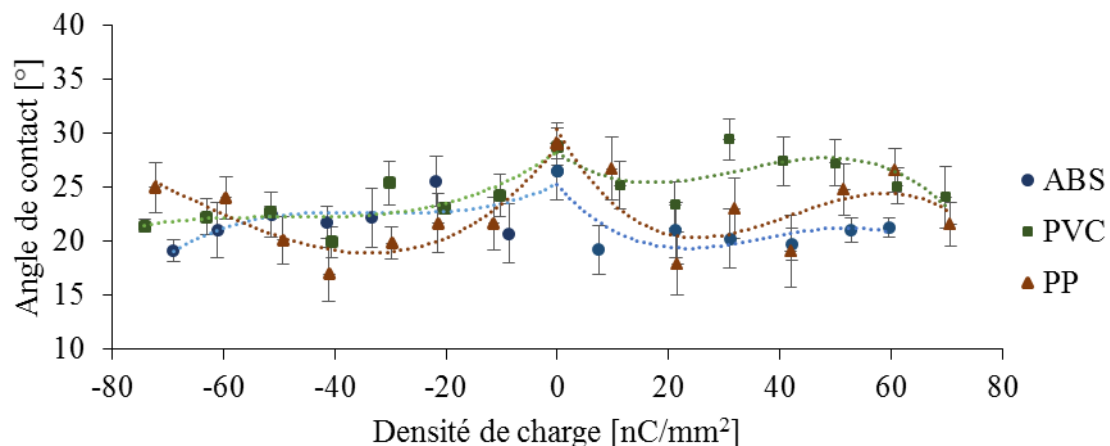


Figure V-3. Mesure d'angles de contacts sur les surfaces chargées de l'ABS du PVC et du PP pour l'huile ISO VG 46.

La figure V-4 montre les évolutions d'angles de contacts de gouttes de l'huile Total Activa 5000 déposées sur les trois polymères ABS, PVC et PP. Pour tous les polymères les angles de contacts sont inférieurs à 35° . Comme pour l'huile ISO VG 46, l'angle de contact pour la surface non chargée est de 29° pour le PP et le PVC et de $26,5^\circ$ pour l'ABS. Les valeurs sont en accord avec les résultats obtenus avec l'eau où l'angle de contact le plus petit est obtenu pour l'ABS.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

L'angle de contact de l'huile Total et le PP a un comportement similaire à l'huile ISO VG 46. L'angle mini de $23,5^\circ$ pour la polarité négative est obtenu à -30 nC/mm^2 puis augmente à 35° . Pour la polarité positive le minimum est de $18,5^\circ$ à 30 nC/mm^2 .

Pour la polarité négative le PVC a un angle de contact qui garde un comportement relativement constant dans l'intervalle $21^\circ - 24,5^\circ$. La polarité positive a tendance à augmenter à 27° pour 30 nC/mm^2 puis à diminuer vers une valeur de 21° .

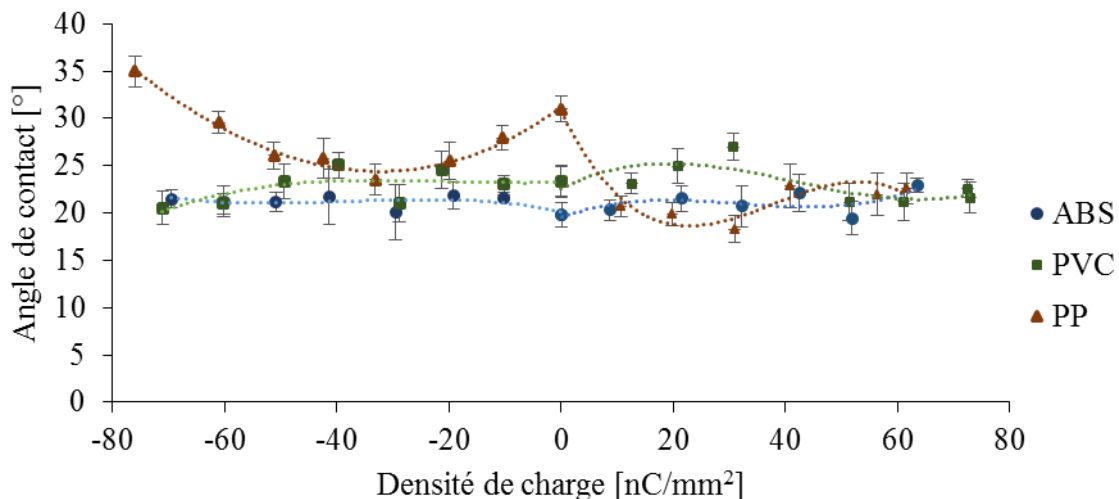


Figure V-4. Mesure d'angles de contacts sur les surfaces chargées de l'ABS, du PVC et de PP, l'huile Total Activa 5000.

Les angles de contact mesurés pour l'ABS sont relativement constants compris entre $21,5^\circ$ et $19,5^\circ$ quelle que soit la polarité.

La charge électrique génère des comportements différents pour l'angle de contact en fonction des paires liquides - polymères. Le comportement de l'ABS est répétitif pour les trois liquides avec une tendance de diminution de l'angle de contact quand la charge électrique augmente. Le PVC a un comportement similaire pour les deux huiles et devient plus hydrophile en augmentant le niveau de charge. Le PP se comporte de façon similaire pour les deux huiles. L'effet de la charge de surface en rapport avec l'eau est moins prononcé pour ce polymère.

Le changement d'angle de contact doit se refléter dans le changement de travail d'adhésion (équation I.2). Cette modification se produit à cause d'interaction à l'interface solide-liquide où est déposée une couche de charge électrique. Le champ électrique généré par la charge qui entoure la goutte peut avoir des influences sur la forme de la goutte. Cette influence est

renforcée par la formation de gouttes plus petites au moment du dépôt sur la surface en l'absence d'écran métallique lié à la terre.

V-2 Influence de la charge électrique sur le contact glissant lubrifié

Les expériences ont été réalisées sur des paires d'éprouvettes ABS-PVC, en utilisant le tribomètre présenté au chapitre II-1, qui avait été préalablement adapté pour réaliser des essais en présence d'un lubrifiant.

Les dimensions des éprouvettes en ABS et PVC étaient respectivement 5 mm x 15 mm x 15 mm et 5 mm x 50 mm x 180 mm. La configuration du contact est montrée sur la figure II-14 d), où la course de glissement est $s = 55$ mm. Le nombre de cycles de glissements a été fixé à $Cy = 10$ cycles.

La surface de l'échantillon en PVC a été chargée électriquement avec le système d'électrodes couronne présenté au chapitre II-2. Les mesures de potentiel électrique de surface ont été réalisées sur une seule ligne centrale parallèle à la direction X , avec une résolution $r_x = 3$ mm. Le potentiel électrique a été converti en densité de charge avec la méthode présentée dans le sous-chapitre II-3. Chaque éprouvette a été nettoyée avec de l'alcool et neutralisée avant chaque essai. Une quantité de 20 ml de l'huile ISO VG 46 a été utilisée pour la lubrification entre les deux éprouvettes (figure V-5).

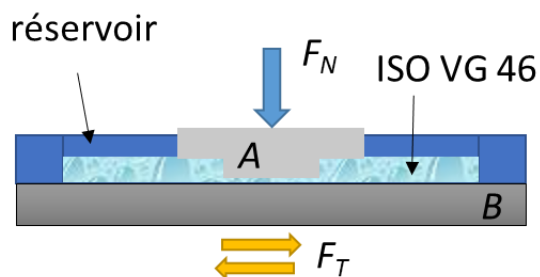


Figure V-5. Positionnement des deux éprouvettes en présence du lubrifiant ISO VG 46.

La méthode des plans d'expériences a été adoptée pour la réalisation de ces expériences, afin de réduire le nombre des mesures. Trois facteurs ont été étudiés : la force normale, la vitesse de glissement et la densité de charge électrique de surface.

Les essais ont été réalisés selon un plan factoriel composite (figure V-6). Trois mesures ont été effectuées au centre du domaine de variation des facteurs, afin de permettre l'évaluation de l'erreur expérimentale.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

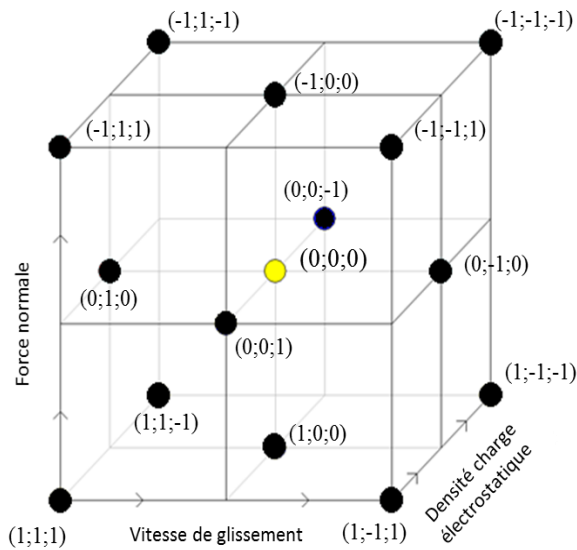


Figure V-6. Plan factoriel composite pour la modélisation de la force tangentielle de contact.

Deux séries d'essais ont été effectués, pour les deux polarités de la décharge couronne. Les 17 résultats obtenus pour la polarité positive sont représentés dans le tableau V-1.

Tableau V-1. Résultats du plan d'expérience réalisé à la polarité positive de la décharge couronne.

N°	Facteurs			Réponse
	Force Normale F_N [N]	Vitesse glissement v [mm/s]	Densité charge électrique σ_m [nC/mm ²]	Force tangentielle F_T [N]
1	2	20	0	1,10
2	18	20	0	1,91
3	2	40	0	1,92
4	18	40	0	1,93
5	2	20	60	1,06
6	18	20	60	1,89
7	2	40	60	1,71
8	18	40	60	1,81
9	2	30	30	1,22
10	18	30	30	1,70
11	10	20	30	1,29
12	10	40	30	1,52
13	10	30	0	1,79
14	10	30	6	1,74
15	10	30	30	1,40
16	10	30	30	1,35
17	10	30	30	1,55

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Les expériences ont été réalisées dans des conditions ambiantes stables (humidité relative $RH = 55\% - 60\%$; température $T = 28^\circ\text{C} - 29^\circ\text{C}$). Le modèle mathématique qui exprime la force tangentielle en fonction des trois facteurs étudiés est le suivant :

$$F_T = 1,46 + 0,22 F_N + 0,16 v + 0,04 \sigma_m - 0,014 F_N \cdot F_N - 0,67 v \cdot v + 0,29 \sigma_m \cdot \sigma_m - 0,19 F_N \cdot v - 0,02 F_N \cdot \sigma_m + 0,031 v \cdot \sigma_m \quad (\text{V-1})$$

Il est caractérisé par d'excellents indicateurs statistiques de qualité : $R^2 = 97,5\%$ et $Q^2 = 90\%$.

Le modèle quadratique déduit de ces expériences permet la prédiction de la force tangentielle moyenne dans diverses conditions de fonctionnement. La figure V-7 montre que la force tangentielle atteint un minimum vers 30 nC/mm^2 . La valeur exacte de la charge minimale est cherchée en utilisant le logiciel MODDE 5. Les meilleures performances ont été obtenues à $F_N = 2 \text{ N}$, $v = 20 \text{ mm/s}$ et $\sigma_m = 27,7 \text{ nC/mm}^2$, pour lesquelles la force tangentielle $F_T = 0,8 \text{ N}$.

La figure V-8 montre les courbes de prédiction de la force tangentielle. Les courbes inférieures et supérieures correspondent à l'intervalle de confiance de 95%.

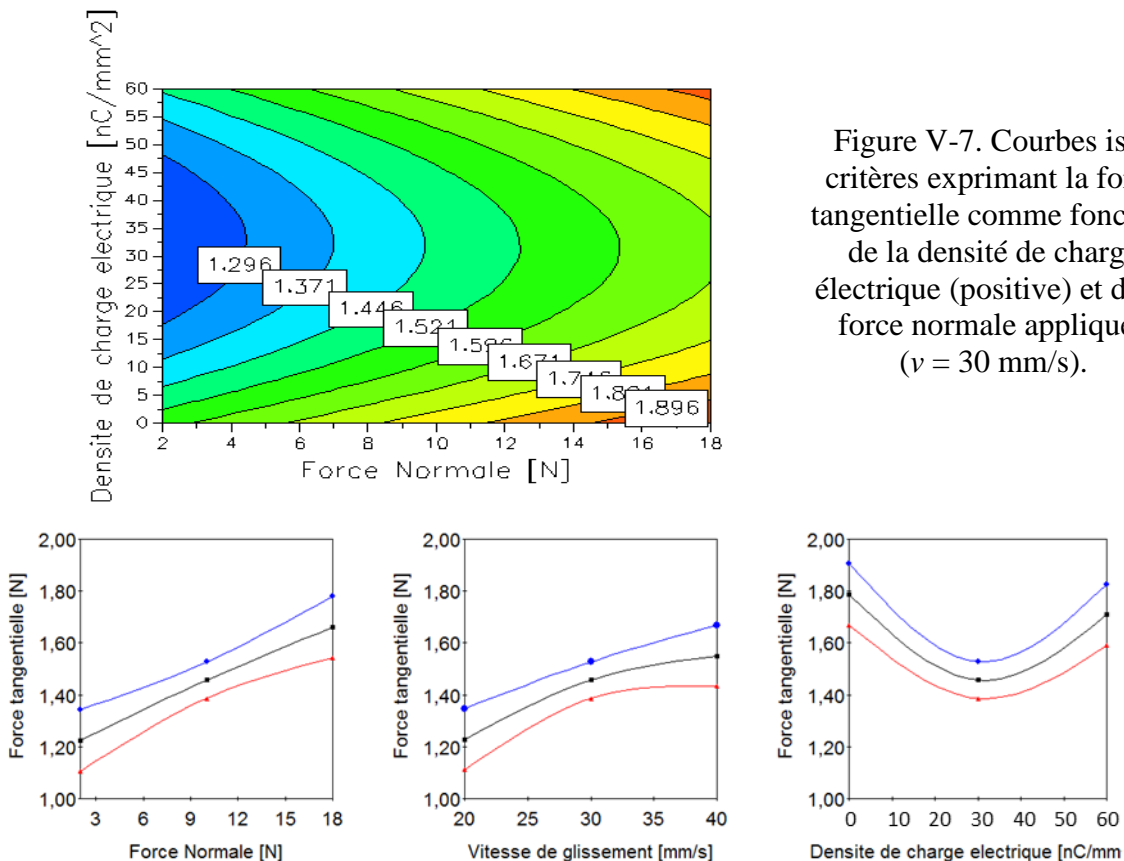


Figure V-7. Courbes isocritères exprimant la force tangentielle comme fonction de la densité de charge électrique (positive) et de la force normale appliquée ($v = 30 \text{ mm/s}$).

-Minimum - Moyenne -Maximum

Figure V-8. Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale F_N

- (a), de la vitesse de glissement (b) et la densité de charge
(c). Valeurs prédites par le logiciel MODDE 5.0.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

Les 17 résultats obtenus pour la polarité négative de la décharge couronne sont représentés dans le tableau V-2. Les expériences ont été réalisées dans des conditions ambiantes stables : humidité relative $RH = 43\% - 50\%$; température $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C} - 25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Le modèle mathématique de la force tangentielle en fonction des trois facteurs pris en compte est le suivant :

$$F_T = 1,71 + 0,24 F_N + 0,03 v + 0,063 \sigma_m - 0,007 F_N \cdot F_N + 0,24 v \cdot v - 0,19 \sigma_m \cdot \sigma_m - 0,06 F_N \cdot v - 0,03 F_N \cdot \sigma_m + 0,001 v \cdot \sigma_m \quad (\text{V-2})$$

Il est caractérisé par une très bon indicateurs statistiques : $R^2 = 96,6\%$ et $Q^2 = 82\%$.

Tableau V-2. Résultats du plan factoriel composite réalisé à la polarité négative de la décharge couronne.

N°	Facteurs			Réponse
	Force Normale F_N [N]	Vitesse glissement v [mm/s]	Densité charge électrostatique σ_m [nC/mm ²]	Force tangentielle F_T [N]
1	2	20	0	1,50
2	18	20	0	2,06
3	2	40	0	1,72
4	18	40	0	1,96
5	2	20	-60	1,36
6	18	20	-60	1,97
7	2	40	-60	1,51
8	18	40	-60	1,93
9	2	30	-30	1,39
10	18	30	-30	2,00
11	10	20	-30	1,90
12	10	40	-30	1,98
13	10	30	0	1,59
14	10	30	-6	1,43
15	10	30	-30	1,62
16	10	30	-30	1,80
17	10	30	-30	1,75

Le modèle quadratique déduit de ces expériences permet la prédiction de la force tangentielle moyenne dans diverses conditions de fonctionnement (figure V-10). Les meilleures performances pour lesquelles la force tangentielle doit être minimale ont été obtenues à $F_N = 2$ N , $v = 28$ mm/s et $\sigma_m = 60$ nC/mm², pour lesquelles la force tangentielle est $F_T = 1,16$ N.

Étude expérimentale de l'effet de la charge triboélectrique aux interfaces solide-liquide

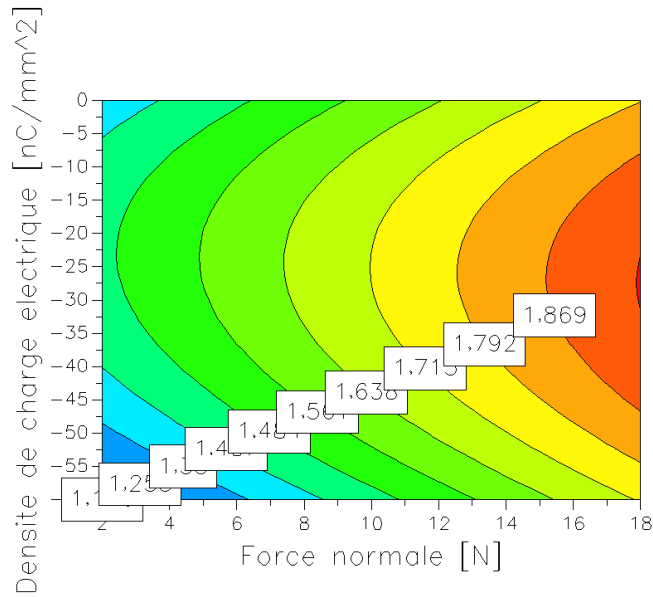
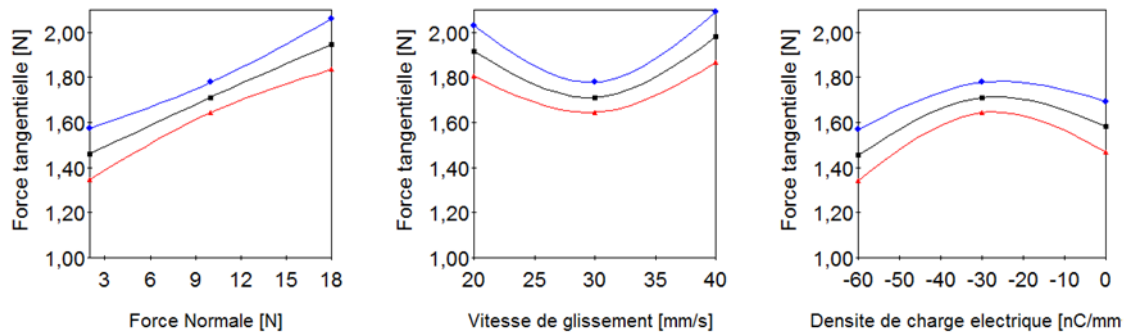


Figure V-9. Courbes iso-critères exprimant la force tangentielle comme fonction de la densité de charge électrique (négative) et de la force normale appliquée ($v = 30 \text{ mm/s}$).



-Minimum - Moyenne -Maximum

Figure V-10. La variation de la force tangentielle en fonction de la force normale (a), de la vitesse de glissement (b) et la densité de charge (c).
Les courbes inférieures et supérieures correspondent à l'intervalle de niveau de confiance de 95 % (charge négative).

V-3 Conclusions

Les expérimentations visant l'étude de l'interaction entre la surface chargée électriquement sur l'eau distillée et deux types d'huiles montrent des comportements différents pour l'angle de contact et la force tangentielle.

La charge déposée sur la surface des éprouvettes accentue le comportement hydrophile de l'ABS et du PVC.

La PP ne montre pas un grand changement de l'angle de contact avec l'eau distillée. Son comportement est différent avec les deux huiles où nous constatons un minimum de l'angle de contact sur la zone de densité de charge absolue $20 \text{ nC/mm}^2 - 30 \text{ nC/mm}^2$, zone où l'angle atteint le maximum avec l'eau distillée.

Le régime hydrodynamique du contact lubrifié montre une augmentation de la force tangentielle en présence d'une charge négative. Cette force diminue dans le cas d'une charge positive.

Conclusions et Perspectives

Les roulements et paliers en polymères sont généralement utilisés dans des applications où des conditions spéciales de résistance à l'humidité ou aux produits chimiques sont essentielles. Dans ces applications, les dispositifs en polymères sont une excellente solution du point de vue à la fois technique et économique, car ils sont caractérisés par des très bonnes propriétés : résistance à la corrosion et aux produits chimiques, bonne tenue à l'usure et à la fatigue, autolubrification, faible coefficient de frottement, isolation électrique.

L'objectif premier de ce travail a été d'approfondir les connaissances sur le comportement triboélectrique des matériaux polymères pour les contacts glissants secs et lubrifiés. L'utilisation de diverses configurations de tests simplifiées a permis d'effectuer des études spécifiquement ciblées sur la charge électrique des polymères générée dans des contacts glissants. Dans ce but, l'étude s'est d'abord portée sur la conception de dispositifs expérimentaux capables de maîtriser les conditions de glissement et – en même temps - de relever la distribution de la charge électrique à la surface de polymères après frottements.

La conclusion générale de ces travaux pourrait être formulée ainsi : l'efficacité de génération de la charge électrique par effet triboélectrique dans un contact entre deux plaques en polymères est influencée par les différents paramètres du frottement sec. D'autre part, la présence de la charge électrique modifie les conditions de frottement des contacts glissants, soient-ils secs ou lubrifiés. Les mesures de potentiel électrique de surface se sont révélées être un outil efficace pour caractériser la distribution de densité surfacique de charge électrique, à condition de disposer d'une méthodologie appropriée.

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

1. La charge électrique générée par effet triboélectrique est distribuée de façon moins homogène comparativement à celle obtenue par effet couronne. Cependant, le déclin dans le temps est moins rapide pour la charge produite par effet triboélectrique.
2. Le niveau de charge électrique généré dépend de plusieurs paramètres, dont la rugosité, la pression de contact et la durée de frottement. Dans les conditions de cette étude, la variation dans des limites relativement étroites de la vitesse de glissement n'a pas révélé d'influence sur le niveau de charge.

3. Une bonne corrélation est trouvée entre l’empreinte de la distribution de charge électrique et la distribution de champ de température. Ce résultat suggère la possibilité d’utilisation des cartographies de champ thermique comme méthode d’identification de la zone de contact puisque les deux phénomènes sont liés au contact glissant entre les surfaces.
4. L’angle de contact d’un liquide avec une surface chargée électrique dépend de la polarité de cette charge, du matériau utilisé et des caractéristiques du liquide déposé sur la surface.

Les principales contributions originales de la thèse sont les suivantes :

1. Approfondissement des connaissances sur le phénomène de génération de charge électrique par effet triboélectrique.
2. Mise au point d’un banc d’essais pour la caractérisation du comportement triboélectrique des plaques de polymères en contact glissant sec ou lubrifié.
3. Pilotage du banc de caractérisation de polymères en contact glissant à l’aide d’un ordinateur et d’un système de commande dédié. L’acquisition et le traitement des signaux des capteurs ont été effectués à l’aide d’un instrument virtuel (LabView).
4. Réalisation d’un banc de caractérisation de distribution de charge électrique par mesure sans contact du potentiel électrique de surface. Le banc de mesure réalisé permet l’acquisition, la visualisation et l’enregistrement du déclin du potentiel électrique de surface.
5. Mise au point d’une procédure pour l’interprétation de la cartographie du potentiel électrique de surface. La conversion de la cartographie du potentiel électrique en densité surfacique de charge électrique a été réalisée à partir des résultats de mesure de charge globale à l’aide d’un programme écrit en Matlab.
6. Mise en évidence de la corrélation entre la densité surfacique de charge électrique et le champ de température générés par frottement.
7. Mise en place d’un banc des essais pour l’étude de l’influence d’une surface de polymère chargé électriquement sur l’angle de contact.

Ce travail a aussi mis en évidence plusieurs perspectives de recherches prometteuses pour améliorer la méthodologie de caractérisation des propriétés triboélectriques des polymères. Suite à l’expérience acquise pendant cette thèse de doctorat, le futur travail devrait se concentrer sur les aspects suivants :

1. Investigation de la charge de polarité négative et positive sur la même surface générée par effet tribologique sur la même surface de polymère. Ce phénomène pourrait être extrapolé pour le cas des matériaux granulaires faisant l'objet des procédés de séparation électrostatique utilisés pour le traitement des déchets comportant des mélanges de matériaux polymères.
2. Etude approfondie de l'effet de la rugosité sur la génération de la charge par effet triboélectrique. En réalisant des essais sur des contacts caractérisés par des rugosités différentes, il serait possible de mieux comprendre les mécanismes physiques en jeu, notamment le rôle de la déformation élastique et/ou plastique des aspérités.
3. Modélisation expérimentale de la charge électrique générée par l'effet triboélectrique sur d'autres matériaux polymères devrait permettre de mieux cerner le phénomène.
4. Etude de la corrélation entre la charge électrique et le champ de température générés par frottement pourrait donner aussi des informations en rapport avec le mécanisme de génération de la charge.
5. Modélisation théorique de l'écoulement sur une surface chargée. Ceci devrait permettre de mieux expliquer les changements de mode d'écoulement en présence de charges électriques de surface. Le modèle qui prend en compte l'effet électrocinétique [91] n'étant pas suffisant par rapport à la complexité du phénomène, une modélisation par la méthode Lattice-Boltzman est à envisager [173–175].

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Différents phénomènes identifiés à l'interface solide-liquide.	- 10 -
Figure I-1. Goutte sur une surface indiquant l'angle de contact et les tensions de surface pour les trois milieux (solide, liquide et air) [29].	- 15 -
Figure I-2. Nature des évènements de contact.	- 17 -
Figure I-3. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ;b) Transfert d'ions ; c) Transfert de matériau. [60]	- 19 -
Figure I-4 : a) Système triode de génération de charge électrostatique par effet couronne b) Polarité négative c) Polarité positive.	- 21 -
Figure I-5. Différents mécanismes possibles pour expliquer le déclin de potentiel [83]	- 23 -
Figure I-6. Courbes de déclin de potentiel surfacique en fonction du potentiel de la grille V_g supérieur ou égal à 1,5kV en polarité positive ($1,5 \text{ kV} \leq V_g \leq 8 \text{ kV}$).	- 24 -
Figure I-7.Types de tribomètres utilisés pour étudier l'effet triboélectrique : a) Tribomètre 'va-et-vient' [12] ; Tribomètre à 'deux cylindres' [49] ; c) Tribomètre 'pion-disque'[89].	- 26 -
Figure I-8. (a) Joint à lèvres lubrifié, en présence d'un champ électrique ; b) Couple de freinage rapporté au couple de freinage à tension zéro en fonction de la valeur absolue de la tension continue pour le mélange d'huile minérale de base ZDDP pour différentes teneurs en ZDDP synthétique: ● (négative) ○(positive) 0%; ◆ (négative) ◇ (positive) 0,1%;■ (négative) □ (positive) 0,5% [95]	- 28 -
Figure I-9. Formation de la double couche électrique et évolution du potentiel (Ψ) généré par la distribution de charge (ζ : potentiel zêta; Ψ_s : potentiel au plan de Stern ; Ψ_0 : potentiel à l'interface).	- 30 -
Figure II-1. Dispositif de tribocharge d'un contact plan-plan:.	- 35 -
Figure II-2. Préparation de l'éprouvette pour le contact lubrifié.	- 36 -
Figure II-3. Interface utilisateur pour le pilotage du banc d'essais pour la génération de la charge par frottement et cartographie du potentiel électrique de surface.	- 37 -
Figure II-4. Elimination du bruit « sel-et-poivre » (E_0 , $F_N = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$) a) Force normale affectée par le bruit S&P ; b) Bruit S&P éliminé et mise à l'échelle du signal pour la visualisation des détails.	- 39 -
Figure II-5. Résultat de la force normale après le filtrage du signal (E_0 , $F_N = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$).	- 40 -
Figure II-6. Schéma pour le calcul de la variation de la force normale.	- 40 -
Figure II-7. Mesure du déplacement : a) Premières 24 secondes, paire E_0 , $F_n = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$ b) Comparaison avec la loi de mouvement sinusoïdale pour un cycle.	- 41 -

Figure II-8. E0, $F_N = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$, $\omega = 2.5 \text{ rad/s}$; a) Variation de l'amplitude de la force tangentielle avec le temps b) Comparaison avec la loi d'accélération sinusoïdale pour un cycle. c)Schéma du système bielle-manivelle E0, $F_N = 10 \text{ N}$, $t = 250 \text{ s}$, $v = 70 \text{ mm/s}$, $\omega = 2.5 \text{ rad/s}$; a) Variation de l'amplitude de la force tangentielle avec le temps b) Comparaison avec la loi d'accélération sinusoïdale pour un cycle ; c)Schéma du système bielle-manivelle.	- 42 -
Figure II-9. a) Evolution de la force tangentielle pendant une longue durée de frottement : b) Zoom pour les premières 20 s ($F_N = 20 \text{ N}$, $v = 15 \text{ mm/s}$).	- 43 -
Figure II-10. Chargement par effet couronne.	- 45 -
Figure II-11. Installation pour l'étude de l'angle de contact.	- 46 -
Figure II-12. Mesure de la température de surface.	- 47 -
Figure II-13 Dispositifs pour la métrologie de la surface : a) rugosimètre interférométrique confocal ; b) rugosimètre avec contact.	- 48 -
Figure II-14. Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle : 1 – Alimentation haute tension, 2 - Générateur d'ions positifs et négatifs.	- 49 -
Figure II-15. Dispositif pour l'analyse spectrométrique FTIR.	- 50 -
Figure II-16. Polymères utilisés.	- 52 -
Figure II-17. Spectres infrarouges des polymères utilisés.	- 54 -
Figure II-18. Géométries et dimensions des éprouvettes utilisées.	- 55 -
Figure II-19. Configurations de contact entre éprouvettes.	- 55 -
Figure II-20. Génération de différents états d'aspérités.	- 56 -
Figure II-21. Viscosité dynamique.	- 57 -
Figure III-1. Mesure de la charge totale.	- 61 -
Figure III-2. Banc expérimental pour la mesure du potentiel électrique de surface.	- 63 -
Figure III-3. Calcul du potentiel de surface.	- 64 -
Figure III-4. a) Ensemble expérimental pour étudier la transition entre deux zones avec deux potentiels différents ; b) Ensemble expérimental pour déterminer l'influence de la distance de la sonde à la surface investiguée c) Ensemble expérimental pour la cartographie du potentiel généré par deux disques métalliques	- 67 -
Figure III-5. Transition entre deux zones de potentiels 500 V et 0 V pour deux positions angulaires différentes et par calcul du potentiel utilisant la fonction de transfert.	- 68 -
Figure III-6. Influence de la distance sonde-surface investiguée.	- 68 -
Figure III-7. Cartographie du potentiel électrique de surface pour les disques de diamètres a) $D_3 = 35 \text{ mm}$; b) $D_4 = 2 \text{ mm}$.	- 69 -
Figure III-8. Potentiel mesuré par la sonde, potentiel réel et potentiel calculé dans différentes sections pour le disque de diamètre $D_3 = 35 \text{ mm}$.	- 69 -

TABLE DES FIGURES

Figure III-9. Potentiel mesuré par la sonde, potentiel réel et potentiel calculé dans le plan de l'axe central $Y=0$ mm pour le disque de diamètre $D_d=2$ mm.	- 69 -
Figure III-10. Ajustement des données expérimentales avec un modèle mathématique.	- 71 -
Figure III-11. Potentiel de surface calculé pour le disque de diamètre 35 mm.	- 72 -
Figure III-12. Banc expérimental pour déterminer la relation entre la densité surfacique de charge électrique et le potentiel de surface.	- 74 -
Figure III-13. Relation entre le potentiel de surface et la densité surfacique de charge électrique.	- 75 -
Figure III-14. Estimation de la charge pour des éprouvettes en PVC (50 mm x 50 mm): a) Potentiel lu par la sonde – charge générée par effet couronne ; b) DSCE estimée – charge générée par effet couronne ; c) Potentiel lu par la sonde – charge générée par effet triboélectrique ; d) DSCE estimée – charge générée par effet triboélectrique	- 76 -
Figure IV-1. Résultats des mesures de répartition du potentiel électrique sur l'éprouvette B. a) après 1 à 12 cycles de frottement; b) à des moments différents après les 12 cycles de frottement.	- 80 -
Figure IV-2. Charge générée par contact glissant avec les 12 combinaisons possibles d'éprouvettes A et B.	- 81 -
Figure IV-3. Décharge couronne sur une zone de dimensions : 70 x 50 mm.	- 83 -
Figure IV-4. Répartition des points de mesures pour réaliser la cartographie du potentiel électrique à la surface de l'éprouvette B.	- 83 -
Figure IV-5. Chargement couronne en polarité positive : a) PVC, $V_g = 1$ kV ; b) PVC, $V_g = 2$ kV ; c) ABS, $V_g = 1$ kV ; d) ABS, $V_g = 2$ kV ; e) PP, $V_g = 1$ kV ; f) PP, $V_g = 2$ kV.	- 84 -
Figure IV-6. Chargement couronne en polarité négative : a) PVC, $V_g = -1$ kV ; b) PVC, $V_g = -2$ kV ; c) ABS, $V_g = -1$ kV ; d) ABS, $V_g = -2$ kV ; e) PP, $V_g = -1$ kV ; f) PP, $V_g = -2$ kV.	- 85 -
Figure IV-7. Chargement par effet triboélectrique : $v = 75$ mm/s, $F_N = 10$ N, $s = 56$ mm ; a) ABS-PVC, 10 cycles; b) ABS-PVC, 100 cycles; c) ABS-PP, 10 cycles ;d) ABS-PP, 100 cycles; e) PP-ABS, 10 cycles; f) PP-ABS, 100 cycles;	- 86 -
Figure IV-8. Déclin de la valeur moyenne de la charge: a) Chargement par effet couronne à $V_g = 1$ kV et 2 kV ; b) Chargement par effet couronne à $V_g = -1$ kV et -2 kV ; c) Chargement par effet triboélectrique, polymères chargés positivement ; d) Chargement par effet triboélectrique, polymères chargés négativement.	- 87 -
Figure IV-9. Cartographie du potentiel électrique sur l'éprouvette B, en vue de l'étude de l'usure.	- 90 -
Figure IV-10. Evolution de la charge avec le temps et les différents états d'usure : PVC : a) usure faible b) usure abrasive ; c) usure adhésive ; PP : d) usure faible ; e) usure abrasive et adhésive ; f) usure adhésive ;	- 91 -
Figure IV-11. Relation entre R_a et R_{Sm} .	- 92 -
Figure IV-12. Densité de charge moyenne en fonction de la rugosité des éprouvettes A et B.	- 94 -
Figure IV-13. Rapport force tangentielle / force normale en fonction de la rugosité arithmétique moyenne (R_a).	- 94 -

TABLE DES FIGURES

Figure IV-14. Interférences entre surfaces rugueuses.	- 95 -
Figure IV-15. Types de contact rugueux: a) surface rugueuse-plan ; b) surface rugueuse- surface rugueuse.	- 95 -
Figure IV-16. Evolution de la densité de charge (a) et du rapport force tangentielle/force normale (b) avec la rugosité pour le modèle de contact surface rugueuse-plan.	- 96 -
Figure IV-17. a) Influence de la force normale sur la génération de charge électrique ; b) Influence de la vitesse de glissement sur la génération de charge électrique;	- 97 -
Figure IV-18. a) Corrélations densité de charge - champ de température : $F_N=14$ N; $C_y = 80$ cycles / $F_N =14$ N; $C_y = 5$ cycles; Variation de la densité de charge moyenne b) respectivement de la température moyenne c)	- 99 -
Figure IV-19. a) Corrélations densité de charge - champ de température : $F_N=2$ N; $v = 25$ mm/s; Variation de la température moyenne b) et de la densité de charge moyenne c).	- 100 -
Figure IV-20. a) Corrélations densité de charge - champ de température pour $v = 25$ mm/s; $C_y = 5$ cycles. Variation de la densité de charge moyenne b) et de la température moyenne c).	- 101 -
Figure IV-21. a) Corrélations densité de charge - champ de température pour $F_N=2$ N; $C_y = 5$ cycles; Variation de l'étendue de la densité de charge respectivement b) de l'étendue de la température c).	- 102 -
Figure IV-22. Comparaison des cartographies pour $F_N=2$ N; $v = 25$ mm/s; $C_y = 80$ cycles;	- 102 -
Figure IV-23. Densité de charge sur l'éprouvette en PVC pour le frottement entre PP et PVC.	- 103 -
Figure IV-24. Cartographie de la densité de charge sur l'éprouvette en PVC du frottement entre le PP et le PVC : $F_N=20$ N, $v = 88$ mm/s, $t = 300$ s ;	- 104 -
Figure IV-25. . Evolution du rapport force tangentielle/ force normale pour trois durées de temps: 30 s, 60 s, 300 s.	- 104 -
Figure IV-26. . Evolution de la force tangentielle moyenne après 10 cycles en fonction du potentiel de la grille.	- 106 -
Figure IV-27. Evolution de la densité de charge après le frottement des éprouvettes pour différentes valeurs du potentiel de la grille en polarité négative.	- 106 -
Figure IV-28. Evolution de la densité de charge après le frottement des éprouvettes en fonction du potentiel de la grille en polarité positive.	- 107 -
Figure V-1. Combinaisons de paires polymères-liquides pour la mesure des angles de contacts.	- 109 -
Figure V-2. Mesures d'angles de contacts de l'eau sur les surfaces chargées de l'ABS du PVC et du PP.	- 110 -
Figure V-3. Mesure d'angles de contacts sur les surfaces chargées de l'ABS du PVC et du PP pour l'huile ISO VG 46.	- 111 -
Figure V-4. Mesure d'angles de contacts sur les surfaces chargées de l'ABS, du PVC et et PP, l'huile Total Activa 5000.	- 112 -
Figure V-5. Positionnement des deux éprouvettes en présence du lubrifiant ISO VG 46.	- 113 -

TABLE DES FIGURES

- Figure V-6. Plan factoriel composite pour la modélisation de la force tangentielle de contact. - 114 -
- Figure V-7. Courbes iso-critères exprimant la force tangentielle comme fonction de la densité de charge électrique (positive) et de la force normale appliquée ($v = 30$ mm/s). - 115 -
- Figure V-8. Variation de la force tangentielle en fonction de la force normale F_N - 115 -
- Figure V-9. Courbes iso-critères exprimant la force tangentielle comme fonction de la densité de charge électrique (négative) et de la force normale appliquée ($v = 30$ mm/s). - 117 -

Bibliographie

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Z. Rymuza, Tribology of Polymers, *Arch. Civ. Mech. Eng.* 7 (2007) 177–184. doi:10.1016/S1644-9665(12)60235-0.
- [8] M. Glor, Electrostatic ignition hazards in the process industry, *J. Electrostat.* 63 (2005) 447–453. doi:10.1016/j.elstat.2005.03.001.
- [9] S. Messal, Thèse, Procèdes de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l’industrie agro-alimentaire, Université de Poitiers, 2016.
- [10] A. Mekhalef Benhafssa, Thèse, Etude d’un séparateur tribo-aéro- électrostatique des mélanges des matériaux poudreux, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [11] A.F. Diaz, R.M. Felix-Navarro, A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: The influence of chemical structure and properties, *J. Electrostat.* 62 (2004) 277–290. doi:10.1016/j.elstat.2004.05.005.
- [12] 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>.
- [13] B. Bouchehit, B. Bou-Saïd, M. Garcia, Static and dynamic performances of refrigerant-lubricated bearings, *Tribol. Int.* 96 (2016) 326–348. doi:10.1016/j.triboint.2015.12.035.

- [14] B. Bou-Said, K. Nakayama, Y. Icard, *Triboemission and tribology: An application to magnetic recording area*, Elsevier, 2000. doi:10.1016/S0167-8922(00)80117-0.
- [15] C. Furetta, *Handbook of Thermoluminescence*, 2003. doi:10.1142/9789812564863.
- [16] L. Lavielle, Polymer-polymer friction: Relation to adhesion, *Wear*. 151 (1991) 63–75. doi:10.1016/0043-1648(91)90346-V.
- [17] O. Bonneau, J. Frêne, Non-linear behavior of a flexible shaft partly supported by a squeeze film damper, *Wear*. 206 (1997) 244–250. doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(97)00004-5.
- [18] J.M. Cabaleiro, T. Paillat, G. Touchard, Transient electrical double layer dynamics in a quiescent fluid, *IEEE Trans. Dielectrics Electrical Insul.* 21 (2014) 171–178. doi:10.1109/tdei.2013.004111.
- [19] B. Basu, M. Kalin, Frictional heating and contact temperature, in: *Tribol. Ceram. Compos. A Mater. Sci. Perspect.*, Wiley, 2011: pp. 60–69. doi:10.1002/9781118021668.ch6.
- [20] Labex Interactifs Pprime, No Title, (n.d.). <http://labex-interactifs.pprime.fr/programme-scientifique/>.
- [21] V.L. Popov, *Contact Mechanics and Friction: Physical Principles and Applications*, 2010. doi:10.1007/978-3-642-10803-7.
- [22] J.S. Bergstrom, *Mechanics of Solid Polymers: Theory and Computational Modeling*, Elsevier Science, 2015. <https://books.google.fr/books?id=DfucBAAQBAJ>.
- [23] L.-H. Lee, *Advances in polymer friction and wear*, Plenum Press, New York and London, 1974.
- [24] B.J. Briscoe, *Interfacial Friction of Polymer Composites. General Fundamental Principles*, Elsevier, 1985. doi:10.1016/B978-0-444-42524-9.50006-5.
- [25] 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.
- [26] H. Krupp, Recent Results in Particle Adhesion: UHV Measurements, Light-Modulated Adhesion and the Effect of Adsorbates, *J. Adhes.* 4 (1972) 83–86. doi:10.1080/00218467208072213.
- [27] B. V. Derjaguin, J.P. Toporov, L.N. Burta-gapanovitch, Investigation on the adhesion of polymer particles to the surface of a semiconductor†, *J. Adhes.* 4 (1972) 65–71. doi:10.1080/00218467208072211.
- [28] M. Mutsuda, H. Komada, Direct bonding between poly(oxy-2,6-dimethyl-1,4-phenylene) and rubber with radicals, *J. Appl. Polym. Sci.* 95 (2005) 53–59. doi:10.1002/app.20803.
- [29] F. Awaja, M. Gilbert, G. Kelly, B. Fox, P.J. Pigram, Adhesion of polymers, *Prog. Polym. Sci.* 34 (2009) 948–968. doi:10.1016/j.progpolymsci.2009.04.007.

- [30] L.B. Schein, Color Electrophotography, in: *Electrophotogr. Dev. Phys.*, Springer Berlin Heidelberg, 1992: pp. 245–274. doi:10.1007/978-3-642-77744-8_11.
- [31] 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.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] A.G. Bailey, The charging of insulator surfaces, *J. Electrostat.* 51–52 (2001) 82–90. doi:10.1016/S0304-3886(01)00106-1.
- [39] L.P. Hammett, A.J. Deyrup, A series of simple basic indicators. I. The acidity functions of mixtures of sulfuric and perchloric acids with water, *J. Am. Chem. Soc.* 54 (1932) 2721–2739. doi:10.1021/ja01346a015.
- [40] G.S.P. Castle, Contact charging between insulators, *J. Electrostat.* 40–41 (1997) 13–20. doi:10.1016/S0304-3886(97)00009-0.
- [41] J. Lowell, A.C. Rose-Innes, Contact electrification, *Adv. Phys.* 29 (1980) 947–1023. doi:10.1080/00018738000101466.
- [42] 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.
- [43] G.S. Rose, S.G. Ward, Contact electrification across metal-dielectric and dielectric-dielectric interfaces, *Br. J. Appl. Phys.* 8 (1957) 121–126. doi:10.1088/0508-3443/8/3/309.
- [44] P.E. Shaw, R.F. Hanstock, *Triboelectricity and Friction. V. On Surface Strain and Relaxation of Like Solids*, *Proc. R. Soc. London.* 128 (1930) 474 LP-480.

- doi:10.1098/rspa.1983.0054.
- [45] P.E. Shaw, R.F. Hanstock, Triboelectricity and Friction. VI. On Surface Strain and Relaxation for Unlike Solids, Proc. R. Soc. London. 128 (1930) 480 LP-487. doi:10.1098/rspa.1983.0054.
- [46] J. Lowell, W.S. Truscott, Triboelectrification of identical insulators. I. An experimental investigation, J. Phys. D. Appl. Phys. 19 (1986) 1273–1280. doi:10.1088/0022-3727/19/7/017.
- [47] J. Lowell, W.S. Truscott, Triboelectrification of identical insulators : II . Theory and further experiments, J. Phys. D. Appl. Phys. 19 (1986) 1281–1298.
- [48] G.A. Cottrell, J. Lowell, A.C. Rose-Innes, Charge transfer in metal- polymer contacts and the validity of "contact charge spectroscopy", J. Appl. Phys. 50 (1979) 374–376. doi:10.1063/1.325673.
- [49] T.J. Fabish, C.B. Duke, M.L. Hair, H.M. Saltsburg, "Charge transfer in metal/polymer contacts and the validity of contact charge spectroscopy", J. Appl. Phys. 51 (1980) 1247–1249. doi:10.1063/1.327655.
- [50] 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. doi:10.1016/j.triboint.2012.05.017.
- [51] D.A. Seanor, Triboelectrification of Polymers — A Chemist's Viewpoint, in: Physicochem. Asp. Polym. Surfaces, Springer US, Boston, 1983: pp. 477–506. doi:10.1007/978-1-4615-7584-9_28.
- [52] V.K. Jasti, Thèse, Electrostatic charge generation and dissipation on woven fabrics treated with antistatic and hydrophilic surface finishes, North Carolina State University, 2011.
- [53] 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.
- [54] 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.
- [55] D.K. Davies, Charge generation on dielectric surfaces, J. Phys. D. Appl. Phys. 2 (1969) 1533. doi:10.1088/0022-3727/2/11/307.
- [56] J. Fuhrmann, Contact electrification of dielectric solids, J. Electrostat. 4 (1978) 109–118. doi:10.1016/0304-3886(78)90067-0.
- [57] J. Fuhrmann, R. Lamour, Gleichstromleitfähigkeit und Polarisationsströme des Polystyrols, 140 (1977) 131–140.

- [58] 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>.
- [59] W.R. Harper, *Contact and Frictional Electrification*, The Lapacian Press, Morgan Hill, 1967. doi:10.1049/ep.1967.0352.
- [60] 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. doi:10.1039/C4RA09604E.
- [61] P.E. Shaw, Experiments on Tribo-Electricity. I. The Tribo-Electric Series, *Proc. R. Soc. London.* 94 (1917) 16–33. doi:10.1098/rspa.1983.0054.
- [62] B. Neagoe, Y. Prawatya, T. Zeghloul, D. Souchet, L. Dascalescu, Laboratory bench for the characterization of triboelectric properties of polymers, *J. Phys. Conf. Ser.* 646 (2015) 12058. doi:10.1088/1742-6596/646/1/012058.
- [63] P.M. Ireland, The role of changing contact in sliding triboelectrification, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 41 (2008) 25305. doi:10.1088/0022-3727/41/2/025305.
- [64] M.B. Neagoe, Y.E. Prawatya, T. Zeghloul, L. Dascalescu, Influence of surface roughness on the tribo-electric process for a sliding contact between polymeric plate materials, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 174 (2017) 12003. doi:10.1088/1757-899X/174/1/012003.
- [65] Y.E. Prawatya, M.B. Neagoe, T. Zeghloul, L. Dascalescu, Optimization of continuous triboelectrification process for polymeric materials in dry contact, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 174 (2017) 12067. doi:10.1088/1757-899X/174/1/012067.
- [66] L. Liu, W. Oxenham, A.M. Seyam, T. Theyson, Effect of relative rubbing speed on the tribo- electrification of continuous filament yarn by stainless steel pins, *J. Text. Inst.* 102 (2011) 1075–1085. doi:10.1080/00405000.2010.536390.
- [67] T. Zeghloul, M.B. Neagoe, Y.E. Prawatya, L. Dascalescu, Triboelectrical charge generated by frictional sliding contact between polymeric materials, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 174 (2017) 12002. doi:10.1088/1757-899X/174/1/012002.
- [68] B. Lee, “Tribo-electric series,,” Trifield. (2009). <https://www.trifield.com/content/tribo-electric-series/>.
- [69] N. Zouzou, B. Dramane, E. Moreau, G. Touchard, EHD flow and collection efficiency of a DBD ESP in wire-to-plane and plane-to-plane configurations, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 47 (2011) 336–343. doi:10.1109/TIA.2010.2091473.
- [70] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Suarasan, A. Samuila, D. Rafiroiu, Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators, *J. Electrostat.* 29 (1993) 211–225. doi:10.1016/0304-3886(93)90025-3.
- [71] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, L.M. Dumitran, L. Herous, L. Dascalescu, Corona charging and charge decay characteristics of non-woven filter media, *IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.)* (2008) 1–6. doi:10.1109/08IAS.2008.109.

- [72] B. Tabti, Thèse, Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface, Université de Poitiers, 2011.
- [73] A. Samuila, M. Blajan, R. Beleca, M. Huzau, R. Morar, L. Dascalescu, A. Iuga, Modeling of wire corona electrode operation in electrostatic separation at small and large gaps, *J. Electrostat.* 63 (2005) 955–960. doi:10.1016/j.elstat.2005.03.068.
- [74] J.H. Dessauer, H.E. Clark, *Xerography and related processes*, Focal Press, 1965. <https://books.google.fr/books?id=7OpTAAAMAAJ>.
- [75] J. Chen, J.H. Davidson, Ozone Production in the Positive DC Corona Discharge: Model and Comparison to Experiments, *Plasma Chem. Plasma Process.* 22 (2002) 495–522. doi:10.1023/A:1021315412208.
- [76] A. Fatihou, Thèse, Amélioration des performances des matériaux fibreux non-tissés chargés par décharge couronne utilisés pour la filtration de l'air, Université de Poitiers, 2016.
- [77] J. Chen, J.H. Davidson, Model of the Negative DC Corona Plasma: Comparison to the Positive DC Corona Plasma, *Plasma Chem. Plasma Process.* 23 (2003) 83–102. doi:10.1023/A:1022468803203.
- [78] F. Koliatene, Thèse, Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique, Université Toulouse III – Paul Sabatier, 2009.
- [79] M. Morvová, The influence of water vapour and temperature on depletion of carbon monoxide in D.C. corona discharge, *Czechoslov. J. Phys.* 49 (1999) 1703–1719. doi:10.1023/A:1022832003737.
- [80] A. Reguig, Thèse, Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans e s différents types de configurations d'électrodes, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2017.
- [81] J.A. Giacometti, S. Fedosov, M.M. Costa, Corona charging of polymers: recent advances on constant current charging, *Brazilian J. Phys.* 29 (1999) 269–279. doi:10.1590/S0103-97331999000200009.
- [82] M. Strobel, V. Jones, C.S. Lyons, M. Ulsh, M.J. Kushner, R. Dorai, M.C. Branch, A comparison of corona-treated and flame-treated polypropylene films, *Plasmas Polym.* 8 (2003) 61–95. doi:10.1023/A:1022817909276.
- [83] P. Molinié, *Recherches en Electrostatique - Actualité d'une science ancienne et applications à la caractérisation des matériaux. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches*, 2010. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00540737>.
- [84] M. Remadnia, M. Nemamcha, Etude du déclin de potentiel d'une surface chargée par une décharge électrique de type couronne, in: *4th Int. Conf. Comput. Integr. Manuf. CIP'2007*, 2007.
- [85] Z. Ziari, Thèse, Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère, Université Mentouri de Constantine, 2008.

- [86] M. Ieda, G. Sawa, R. Takeuchi, Decay processes of different kinds of surface electric charges across polyethylene film, *Jpn. J. Appl. Phys.* 8 (1969) 809. doi:10.1143/jjap.8.809.
- [87] A. Alahmadi, Influence of triboelectrification on friction coefficient, *Int. J. Sci. Eng. Res.* 5 (2014) 22–29. <https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx?Influence-of-Triboelectrification-on-Friction-Coefficient.pdf>.
- [88] C. Guerret-Piecourt, S. Bec, D. Treheux, Electrical charges and tribology of insulating materials, in: *Comptes Rendus l'Academie Des Sci. - Ser. IV Physics, Astrophys.*, 2001: pp. 761–774. doi:10.1016/S1296-2147(01)01218-5.
- [89] 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.
- [90] 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.
- [91] S. Bai, P. Huang, Y. Meng, S. Wen, Modeling and analysis of interfacial electro-kinetic effects on thin film lubrication, *Tribol. Int.* 39 (2006) 1405–1412. doi:10.1016/j.triboint.2005.12.004.
- [92] Y. Chen, Q. Zuo, P. Huang, Influence of electric double layers on elastohydrodynamic lubricating water film in line contact, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part N J. Nanoeng. Nanosyst.* 227 (2013) 196–198. doi:10.1177/1740349913479588.
- [93] Q. Zuo, P. Huang, F. Su, Theory analysis of asymmetrical electric double layer effects on thin film lubrication, *Tribol. Int.* 49 (2012) 67–74. doi:10.1016/j.triboint.2011.12.021.
- [94] G. Xie, D. Guo, J. Luo, Lubrication under charged conditions, *Tribol. Int.* 84 (2015) 22–35. doi:10.1016/j.triboint.2014.11.018.
- [95] J.B. Gajewski, M.J. Glogowski, ZDDP content in mineral and synthetic motor base oils and its effect on electrostatic and tribological phenomena in a rotating shaft–oil–lip seal system, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 20 (2013) 1561–1566. doi:10.1109/TDEI.2013.6633684.
- [96] J.B. Gajewski, M.J. Glogowski, Influence of an applied electric field on the torque of rotary lip seals on metal shafts. Part I: Effects of lip seal type, *Tribol. Int.* 40 (2007) 49–55. doi:10.1016/j.triboint.2006.02.034.
- [97] J.B. Gajewski, K. Gatner, Interpretation of the results of research on tribocharging in a rotating shaft-oil-lip seal system, *J. Electrostat.* 67 (2009) 365–371. doi:10.1016/j.elstat.2008.12.015.
- [98] N.G. Green, A. Ramos, A. González, A. Castellanos, H. Morgan, Electric field induced fluid flow on microelectrodes: the effect of illumination, *J. Phys. D. Appl. Phys.* 33 (1999) L13–L17. doi:10.1088/0022-3727/33/2/102.

- [99] A. Ramosa, H. Morgan, N. Green, A. Castellanos, AC Electric-Field-Induced Fluid Flow in Microelectrodes During the AC electrokinetic manipulation of particles in sus-, *J. Colloid Interface Sci.* 422 (1999) 420–422. doi:jcis.1999.6346.
- [100] M. Vázquez Piñón, B. Cárdenas Benítez, B. Pramanick, V.H. Perez-Gonzalez, M.J. Madou, S.O. Martinez-Chapa, H. Hwang, Direct current-induced breakdown to enhance reproducibility and performance of carbon-based interdigitated electrode arrays for AC electroosmotic micropumps, *Sensors Actuators, A Phys.* 262 (2017) 10–17. doi:10.1016/j.sna.2017.05.023.
- [101] J.A. Tichy, A surface layer model for thin film lubrication, *Tribol. Trans.* 38 (1995) 577–582. doi:10.1080/10402009508983445.
- [102] H.M. Chu, W.L. Li, Y.P. Chang, Thin film elastohydrodynamic lubrication-a power-law fluid model, *Tribol. Int.* 39 (2006) 1474–1481. doi:10.1016/j.triboint.2005.10.013.
- [103] M. EL-Adawy, T. Paillat, G. Touchard, J. Cabaleiro, Numerical simulation of the electrical double layer development: physicochemical model at the solid and dielectric liquid interface for laminar flow electrification phenomenon, *IEEE Trans. Dielechics Electrical Insul.* 18 (2011) 1463–1475. doi:10.1109/tdei.2011.6032817.
- [104] T.J. Harvey, R.J.K. Wood, G. Denuault, H.E.G. Powrie, Investigation of electrostatic charging mechanisms in oil lubricated tribo-contacts, *Tribol. Int.* 35 (2002) 605–614. doi:10.1016/S0301-679X(02)00060-9.
- [105] H.T. Zhu, X. Zheng, P.B. Kosasih, A.K. Tieu, Tribo-surface charge and polar lubricant molecules on friction and lubrication under multiple 3D asperity contacts, *Wear.* 332–333 (2015) 1248–1255. doi:10.1016/j.wear.2015.02.045.
- [106] E. Németh, V. Albrecht, G. Schubert, F. Simon, Polymer tribo-electric charging: Dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity, *J. Electrostat.* 58 (2003) 3–16. doi:10.1016/S0304-3886(02)00137-7.
- [107] 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.
- [108] 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.
- [109] 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.
- [110] 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.
- [111] O. Gallot-Lavallée, *Dielectric Materials and Electrostatics*, Wiley, 2013. doi:10.1002/9781118753491.oth1.

- [112] A. Borjesson, A method for measurement of triboelectric charging, in: *Electr. Overstress / Electrostat. Disch. Symp.*, 1995: pp. 1–9. doi:10.1109/EOSESD.1995.478293.
- [113] 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.
- [114] W.D. Greason, Investigation of a test methodology for triboelectrification, *J. Electrostat.* 49 (2000) 245–256. doi:10.1016/S0304-3886(00)00013-9.
- [115] C.A. Rezende, R.F. Gouveia, M.A. da Silva, F. Galembeck, Detection of charge distributions in insulator surfaces, *J. Phys. Condens. Matter.* 21 (2009) 263002. doi:10.1088/0953-8984/21/26/263002.
- [116] P. Molinié, Charge injection in corona-charged polymeric films: potential decay and current measurements, *J. Electrostat.* 45 (1999) 265–273. doi:10.1016/S0304-3886(98)00053-9.
- [117] 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.
- [118] 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.
- [119] 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.
- [120] 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.
- [121] 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, *Tribol. Int.* 111 (2017) 107–115. doi:10.1016/j.triboint.2017.03.006.
- [122] R.H. Chan, C.W. Ho, M. Nikolova, Salt-and-pepper noise removal by median-type noise detectors and detail-preserving regularization, *IEEE Trans. Image Process.* 14 (2005) 1479–1485. doi:10.1109/TIP.2005.852196.
- [123] 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.
- [124] E.L. Decker, B. Frank, Y. Suo, S. Garoff, Physics of contact angle measurement, *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.* 156 (1999) 177–189. doi:10.1016/S0927-7757(99)00069-2.

- [125] T.S. Meiron, A. Marmur, I.S. Saguy, Contact angle measurement on rough surfaces, *J. Colloid Interface Sci.* 274 (2004) 637–644. doi:10.1016/j.jcis.2004.02.036.
- [126] L. Mazzola, E. Bemporad, F. Carassiti, An easy way to measure surface free energy by drop shape analysis, *Measurement*. 45 (2012) 317–324. doi:10.1016/j.measurement.2011.11.016.
- [127] Mitutoyo-Quick guide to precision measuring instrument, (n.d.). https://www.mitutoyo.co.jp/eng/products/menu/QuickGuide_Surftest.pdf.
- [128] Mitutoyo- Surface Finish Analysis, (n.d.). https://www.gagesite.com/documents/Training/Mitutoyo Surface Analysis_April 2 2014 at PQI.pdf.
- [129] Guide d'utilisation simplifié du Talysurf CCI 6000, (n.d.). <http://blogs.univ-poitiers.fr/surfacestopo/files/2014/01/guide.pdf>.
- [130] A. Golchin, Thèse, Polymeric materials for bearing applications, Luleå University of Technology, 2015.
- [131] B. Aldousiri, A. Shalwan, C.W. Chin, A review on tribological behaviour of polymeric composites and future reinforcements, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2013 (2013). doi:10.1155/2013/645923.
- [132] M.F. Bekkara, B. Neagoe, Y. Prawatya, Y. Benmimoun, T. Zeghloul, N. Zouzou, Modifying the surface characteristics of polymers by exposure to dielectric barrier discharges, in: *Société Française d'Électrostatique (SFE)*, 2016: pp. 1–7.
- [133] W. V. Smith, Material selection criteria for water lubrication, *Wear*. 25 (1973) 139–153. doi:10.1016/0043-1648(73)90067-7.
- [134] J.K. Lancaster, Lubrication of carbon fibre-reinforced polymers part I—Water and aqueous solutions, *Wear*. 20 (1972) 315–333. doi:10.1016/0043-1648(72)90413-9.
- [135] A. Ruggiero, R. D'Amato, M. Merola, P. Valašek, M. Müller, Tribological characterization of vegetal lubricants: Comparative experimental investigation on *Jatropha curcas* L. oil, Rapeseed Methyl Ester oil, Hydrotreated Rapeseed oil, *Tribol. Int.* 109 (2017) 529–540. doi:10.1016/j.triboint.2017.01.030.
- [136] A. Ruggiero, R. D'Amato, M. Merola, P. Valašek, M. Müller, On the tribological performance of vegetal lubricants: Experimental investigation on *Jatropha Curcas* L. oil, in: *Int. Conf. Manuf. Eng. Mater.*, 2016: pp. 431–437. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.689.
- [137] Y. Henry, Thèse, Analyse expérimentale de l'effet de la texturation des patins sur le comportement des butées hydrodynamiques à géométrie fixe, Université de Poitiers, 2013.
- [138] A. Maoui, Thèse, Etude numérique et expérimentale du comportement thermoelastohydrodynamique des joints à levre en elastomere, Université de Poitiers, 2006.

- [139] M. Ieda, G. Sawa, U. Shinohara, A Decay Process of Surface Electric Charges across Polyethylene Film, *Jpn. J. Appl. Phys.* 6 (1967) 793. <http://stacks.iop.org/1347-4065/6/i=6/a=793>.
- [140] H.J. Wintle, Surface- charge decay in insulators with nonconstant mobility and with deep trapping, *J. Appl. Phys.* 43 (1972) 2927–2930. doi:10.1063/1.1661633.
- [141] R.H. Young, Kinetics of xerographic discharge by surface charge injection, *J. Appl. Phys.* 72 (1992) 2993–3004. doi:10.1063/1.351507.
- [142] M. Debska, Surface potential decay on triglycine sulfate crystal, *J. Electrostat.* 63 (2005) 1017–1023. doi:10.1016/j.elstat.2004.12.006.
- [143] H.T.M. Haenen, The characteristic decay with time of surface charges on dielectrics, *J. Electrostat.* 1 (1975) 173–185. doi:10.1016/0304-3886(75)90047-9.
- [144] A.A. Teklu, R.M. Sullivan, A prototype DC triboelectric generator for harvesting energy from natural environment, *J. Electrostat.* 86 (2017) 34–40. doi:10.1016/j.elstat.2017.01.001.
- [145] B. Tabti, B. Yahiaoui, B. Bendahmane, L. Dascalescu, Surface potential decay dynamic characteristics of negative-corona-charged fibrous dielectric materials, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 21 (2014) 829–835. doi:10.1109/TDEI.2013.003854.
- [146] M. Remadnia, M. Nemamcha, L. Herous, L. Dascalescu, Decay of the electric potential at the surface of coronacharged uniform layers of HIPS granules, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 18 (2011) 579–587. doi:10.1109/TDEI.2011.5739464.
- [147] M. Kachi, L. Dascalescu, Corona discharges in asymmetric electrode configurations, *J. Electrostat.* 72 (2014) 6–12. doi:10.1016/j.elstat.2013.11.001.
- [148] M.C. Plopeanu, L. Dascalescu, B. Yahiaoui, A. Antoniu, M. Hulea, P.V. Notingher, Repartition of electric potential at the surface of nonwoven fabrics for air filtration, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 48 (2012) 851–856. doi:10.1109/TIA.2012.2190963.
- [149] J.M. Crowley, *Fundamentals of Applied Electrostatics*, Wiley, 1986. <https://books.google.fr/books?id=ECIRAAAAMAAJ>.
- [150] M.N. Horenstein, Measuring isolated surface charge with a noncontacting voltmeter, *J. Electrostat.* 35 (1995) 203–213. doi:[https://doi.org/10.1016/0304-3886\(95\)96917-T](https://doi.org/10.1016/0304-3886(95)96917-T).
- [151] P. Llovera, P. Molinié, A. Soria, A. Quijano, Measurements of electrostatic potentials and electric fields in some industrial applications: Basic principles, *J. Electrostat.* 67 (2009) 457–461. doi:10.1016/j.elstat.2009.01.004.
- [152] S.-H. Sheen, H.-T. Chien, A.C.P. Raptis, Instrumentation for Fluid-Particle Flow: Acoustics, in: *Instrum. Fluid Part. Flow*, WILLIAM ANDREW PUBLISHING, New York, 1999: pp. 162–211. doi:10.1016/b978-081551433-6.50007-4.
- [153] A. Pandey, J. Kieres, M.A. Noras, Verification of non-contacting surface electric potential measurement model using contacting electrostatic voltmeter, *J. Electrostat.* 67 (2009) 453–456. doi:10.1016/j.elstat.2009.01.053.

- [154] H.T.M. Haenen, Potential probe measurement analysis and charge distribution determination, *J. Electrostat.* 2 (1977) 203–222. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886\(77\)90054-7](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3886(77)90054-7).
- [155] R. Kacprzyk, Measurements of electrical potential of constant charge objects, in: *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, IEEE, 2012: pp. 134–139. doi:10.1109/TDEI.2012.6148511.
- [156] X.N. Shan, X.P. Huang, K.J. Foley, P.M. Zhang, K.P. Chen, S.P. Wang, N.J. Tao, Measuring Surface Charge Density and Particle Height Using Surface Plasmon Resonance Technique, *Anal. Chem.* 82 (2010) 234–240. doi:10.1021/ac901816z.
- [157] M.A. Noras, Non-contact surface charge/voltage measurements. Capacitive probe - principle of operation, (n.d.). http://www.trekinc.com/pdf/3001_Vibrating_Probe.PDF.
- [158] D.M. Taylor, P.E. Secker, *Industrial electrostatics: fundamentals and measurements*, Research Studies Press, 1994. <https://books.google.fr/books?id=YmgeAQAIAAJ>.
- [159] D.C. Faircloth, N.L. Allen, High resolution measurements of surface charge densities on insulator surfaces, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 10 (2003) 285–290. doi:10.1109/TDEI.2003.1194112.
- [160] A. Tatematsu, S. Hamada, T. Takuma, H. Morii, A study on the accuracy of surface charge measurement, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 9 (2002) 406–415. doi:10.1109/TDEI.2002.1007704.
- [161] H.T.M. HAENEN, Experimental investigation of the relationship between generation and decay of charges on dielectrics, *J. Electrostat.* 2 (1976) 151–173.
- [162] A.-L. Schubert, D. Hagemann, A. Voss, K. Bergmann, Evaluating the model fit of diffusion models with the root mean square error of approximation, *J. Math. Psychol.* 77 (2017) 29–45. doi:10.1016/j.jmp.2016.08.004.
- [163] M.A. Noras, A. Pandey, Surface charge density measurements. Uses and limitations of Kelvin probe-based instruments, *IEEE Ind. Appl. Mag.* 16 (2010) 41–47. doi:10.1109/MIAS.2010.936971.
- [164] M. Kachi, M. Nemamcha, B. Tabti, L. Dascalescu, Comparison between three measurement methods for characterizing the charge state of granular insulating materials, *J. Electrostat.* 69 (2011) 394–400. doi:10.1016/j.elstat.2011.05.002.
- [165] B. Yahiaoui, M. Magharbi, A. Smaili, A. Antoniu, B. Tabti, L. Dascalescu, Distribution of electric potential at the surface of corona-charged polypropylene non-woven fabrics after neutralization Belkacem Yahiaoui , Mohamed Magharbi , Belaid Tabti Atallah Smaili, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 49 (2013) 1758–1766.
- [166] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medics, M. Rahli, M. Huzau, L. Dascalescu, Characterisation of dual corona electrodes for electrostatic processes applications, *Conf. Rec. - IAS Annu. Meet. (IEEE Ind. Appl. Soc.* 3 (2004) 1552–1558. doi:10.1109/IAS.2004.1348677.

- [167] Y.E. Prawatya, M.B. Neagoe, T. Zeghloul, L. Dascalescu, Surface-Electric-Potential Characteristics of Tribo- and Corona-Charged Polymers: A Comparative Study, *IEEE Trans. Ind. Appl.* 53 (2017) 2423–2431. doi:10.1109/TIA.2017.2650145.
- [168] H.S. Kong, M.F. Ashby, Friction-Heating Maps and Their Applications, *MRS Bull.* 16 (1991) 41–48. doi:10.1557/S0883769400055822.
- [169] K. Pearson, Mathematical contributions to the theory of evolution. III. Regression, heredity, and panmixia, *Philos. Trans. R. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.* 187 (1896) 253–318. doi:10.1098/rsta.1896.0007.
- [170] L.A. O’Hare, S. Leadley, B. Parbhoo, Surface physicochemistry of corona-discharge-treated polypropylene film, *Surf. Interface Anal.* 33 (2002) 335–342. doi:10.1002/sia.1217.
- [171] R.J. Good, L. a. Girifalco, A theory for estimation of surface and interfacial energies. III. Estimation of surface energies of solids from contact angle data, *J. Phys. Chem.* 64 (1960) 561–565. doi:10.1021/j100834a012.
- [172] A. Agrawal, Surface tension of polymers, *Massachusetts Inst. Technol.* (2005) 1–29. <http://web.mit.edu/nnf/education/wettability/summerreading-2005short.pdf>.
- [173] W. Wei, Z. Gu, Electrification of particulate entrained fluid flows-Mechanisms, applications, and numerical methodology, *Phys. Rep.* 600 (2015) 1–53. doi:10.1016/j.physrep.2015.10.001.
- [174] D.A. Medvedev, Lattice Boltzmann model for simulation of the electric breakdown in liquids, *Procedia Comput. Sci.* 1 (2010) 811–818. doi:10.1016/j.procs.2010.04.088.
- [175] M. Held, A. Kendl, Lattice Boltzmann model for collisionless electrostatic drift wave turbulence obeying Charney-Hasegawa-Mima dynamics, *J. Comput. Phys.* 298 (2015) 622–635. doi:10.1016/j.jcp.2015.06.018.

MODELISATION EXPERIMENTALE DE PHENOMENES ELECTROSTATIQUES ET TRIBOLOGIQUES AUX INTERFACES SOLIDE/SOLIDE

L'objectif de cette thèse a été d'explorer la possibilité d'utiliser la charge électrique pour améliorer les conditions de contact glissant sec ou lubrifié (deux huiles avec viscosités différentes et de l'eau distillée) entre matériaux polymères (PP, PE, PS, ABS et deux types de PVC). Trois nouvelles installations expérimentales ont été conçues et réalisées. La première installation est un tribomètre linéaire qui permet le réglage de quatre variables de contrôle du processus de charge (la force normale, la vitesse, la durée et l'amplitude du mouvement de glissement) et la mesure de trois caractéristiques du régime de frottement (la force tangentielle, la variation de la force normale et le déplacement relatif entre les éprouvettes). La deuxième installation est un dispositif pour mesurer la distribution de la charge électrique de surface et la corrélérer avec des cartographies de température. Une troisième installation est destinée à l'étude de l'influence de la charge électrique sur l'angle de contact de gouttelettes déposées en surface. Les expériences réalisées ont montré que le niveau de la charge générée par frottement sec dépend du temps de frottement, de l'usure, de la pression de contact et de la rugosité des surfaces. Une charge générée par effet triboélectrique ou par décharge couronne peut augmenter le frottement à sec. En revanche, la présence d'une charge électrique à la surface du polymère améliore le frottement lubrifié. Les mesures d'angles de contacts ont mis en évidence que celui-ci dépend de la nature du liquide et du polymère étudiés, ainsi que de l'état de charge électrique des échantillons.

Mots clés : Effet tribo-électrique, Matériaux polymères, Electrostatique, Charge électrique, Potentiel électrique de surface, Frottement sec, Frottement lubrifié, Angle de contact.

EXPERIMENTAL MODELING OF ELECTROSTATIC AND TRIBOLOGICAL PHENOMENA AT SOLID / SOLID INTERFACES

The approach undertaken in this thesis is to explore the possibility of using the electric charge to improve the dry or lubricated (two oils with different viscosity and distilled water) sliding contacts between polymeric materials (PP, PE, PS, and ABS, two types of PVC). Three experimental benches were designed and built. The first installation is a linear tribometer designed to study the sliding contacts between solids with dry or lubricated friction. It allows the adjustment to four control variables of the tribocharging process: normal force, sliding speed, time and stroke, and the measurement of three characteristics of the friction regime: the tangential force, the variation of the normal force and the relative displacement between the specimens. The second installation is a device for measuring the distribution of the surface electrical charge, and for correlating it with the temperature mappings. A third installation is designed to study the influence of the electric charge on the contact angle of droplets deposited on the surface. The experiments showed that the level of the charge generated by dry friction depends on the friction time, the wear, the contact pressure and the roughness. A charge generated by friction or by corona discharge can increase dry friction. On the other hand, the presence of electric charge on the surface of polymers can improve a lubricated contact. The contact angle measurements pointed out the influence of the nature of both solid and liquid materials involved in the contact, as well as of the electric charge of the samples.

Key words: Triboelectrification, Polymeric materials, Electrostatics, Electric charge, Surface electric potential, Dry friction, Lubricated friction, Contact angle.