

# Université Kasdi Merbah Ouargla

Faculté des sciences appliquées  
Département de génie mécanique



**Mémoire**

**MASTER ACADIMIQUE**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité: Maintenance Industrielle**

Presenté par:

Kehekache nour elyakine

Fatimetou med moustapha khouna

## Thème

**Analyse de la dynamique des charges  
électriques générées pendant le tribochargement**

Soutenu publiquement le: 20 /06/2019

Devant le jury :

M.GUEBAILIA

MCA

Président

UKM Ouargla

R. KHETTABI

MAA

Examineur

UKM Ouargla

K. ROUAGDIA

MCB

Encadreur

UKM Ouargla

Année Universitaire 2018 / 2019

# *Remerciement*

*Non sincères remerciements vont en premier lieu à Dieu, le tout puissant de nous avoir donné la force, la volonté et le courage pour concrétiser notre travail.*

*Nous remercions notre encadreur monsieur : ROUAGDIA karim. Qui nous avoir confié le sujet et de l'aide précieuse qu'il a toujours bien voulu m'apportons et dirigés ce travail de fin d'étude, pour avoir veillé à la bon marche de ce projet, et fournir les documents nécessaires à l'accomplissement de notre travail.*

*Nous tenons à remercies également, les membres de jury pour nous avoir honoré de leur présence et accepté de juger notre travail.*

*Des remerciements vont également à tous ceux qui nous ont apporté, de prés ou de loin, orientation, soutien, et aide dans la réalisation et la concrétisation de ce travail.*

*Nos vifs remerciements à tous nos enseignants de l'université pour la bien vaillance et les efforts déployés tous le long de notre étude.*

*Un grand merci tous les membres de Laboratoire de Génie Electrique de  
Guelma (LGEG)*



## *Dédicaces*

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, J'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.

A toute ma famille

A mes très chères sœurs : Assma, Massaouda, Hamida Rahima et leurs enfants

A mes très chères frères : Radouane, Bilal

A mon chère fiancé : Abdelkrime

A tout mes Amis : Safa, Kenza, Houda, Yousra, Ratiba, Hanan

A mon Binôme «Fatima» qui a partagée avec moi les moments difficiles de ce travail.

A toute personne ayant contribué de près ou de loin à la Réalisation de ce travail.

***NOUR EL YAKINE***





## *Dédicaces*

Je dédie ce modeste travail à:

Mes très chers parents qui ont été toujours la source de ma réussite et du succès. Que dieu les protèges

À toute ma famille :

À mes très chers soeurs: Ahlam, Khadouj

À mes très chers frères: Dahi, Mohamed

À tout mes amis: Keïta, Menmen, Lemneya

À mon binôme << Nour elyakine >> qui a partagé avec moi les moments difficiles de ce travail

À toutes les personnes qui m'ont aidé dans ce travail

**Fatima**

# Sommaire

Introduction générale .....	1
-----------------------------	---

## Chapitre I : Etat de l'art

I.1. Définition d'un polymère .....	3
I.2. Classification des polymères.....	3
<i>a)</i> Leurs nature chimique.....	3
<i>b)</i> Leur origine .....	3
<i>c)</i> Leur domaine d'application. ....	3
<i>d)</i> Selon leur dimensionnalité .....	3
<i>e)</i> Selon leur comportement thermique .....	3
I.3. Caractéristiques des polymères .....	4
I.3.1. Structure du polymère.....	4
I.3.2. Type de polymères.....	4
I.4. Amélioration des propriétés physico-chimique des polymères.....	5
I.4.1. Les additifs.....	5
I.4.2. Les charges.....	6
I.4.3. Les renforts.....	6
I.5. Avantages et inconvénients des polymères .....	7
I.5.1. Avantages.....	7
I.5.2. Inconvénients.....	7
I.6. Applications des polymères.....	7
I.7. Electrification des polymères isolants.....	8
I.7.1. Charge par effet triboélectrique.....	8
I.7.2. Charge par rouleau électrostatique.....	9
I.7.3. Charge par influence (induction) .....	9
I.7.4. Charge par décharge couronne.....	10
I.7.4.1. Décharge couronne positive.....	10
I.7.4.2. Décharge couronne négative .....	11
I.7.4.3. Décharge couronne alternative.....	12

I.8. Propriétés des polymères solides.....	12
I.8.1 Propriétés physiques.....	12
I.8.2 Propriétés thermiques.....	13
I.9. Propriétés diélectriques.....	13
I.9.1. Conduction de surface.....	13
I.9.2. Polarisation de l'échantillon.....	14
I.9.3. Neutralisation par le gaz.....	14
I.9.4. Phénomènes piézoélectriques.....	15
I.9.5. Injection de charges.....	15
I.10. Théorie des bandes d'énergie.....	16
I.10.1. Cas des matériaux isolants parfaits.....	16
I.10.2. Défauts et impuretés.....	17
I.10.3. Modèle de la surface .....	18
I.10.4. Contact métal-isolant.....	19
I.10.5. Le travail de sortie.....	20
Conclusion.....	21
Références bibliographiques du chapitre I.....	22

## **Chapitre II : Comportement diélectrique et tribologique des polymères isolants**

II.1. Introduction.....	25
II.2. Effet de la charge électrique dans les polymères isolants.....	25
II.2.1. Approche mécanique.....	25
II.2.1.1. Adhésion.....	25
II.2.1.2. Coefficient de frottement et usure.....	25
II.2.1.3. Frottement- Energie- Usure.....	26
II.2.1.4. Particularité du frottement des matériaux isolants.....	26
II.2.1.5. Usure des matériaux isolants.....	26
II.2.2. Approche diélectrique .....	27
II.2.2.1. Physique des isolants chargés.....	27
II.2.2.2. Phénomènes de polarisation .....	27
II.2.2.3. Charges en mouvement dans les isolants.....	29
II.3. Chargement par effet triboélectrique.....	30

II.3.1. Description.....	30
II.3.2. Série triboélectrique.....	30
II.4. Mécanismes de chargement triboélectrique des isolants.....	31
Conclusion.....	34
Références bibliographiques du chapitre II.....	35

### **Chapitre III : Caractérisation des échantillons par la technique de déclin de potentiel de surface**

III.1. Introduction.....	38
III.2. Approche expérimentale.....	38
III.3. Procédure expérimentale.....	39
III.4. Résultats expérimentaux.....	41
III.4.1. L'influence de PEHD.....	42
III.4.2. L'influence de la nature du matériau isolant.....	43
III.4.3. L'influence du temps de traitement.....	44
III.4.4. L'influence de la mouillabilité.....	45
III.4.4. L'influence de la vitesse de frottement .....	46
Conclusion générale.....	47
Références bibliographiques du chapitre III.....	48

## *Liste des figures du chapitre I*

N°	Titre	Page
1	Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin ( <span style="color: orange;">■</span> Partie cristalline, et <span style="color: blue;">■</span> Partie amorphe)	4
2	Les trois types de polymères.	4
3	Dispositif de charge par effet triboélectrique.	8
4	Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique	9
5	Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)	10
6	Description de la décharge couronne positive.	11
7	Description de la décharge couronne négative	12
8	Conduction de surface	13
9	Polarisation de l'échantillon	14
10	Neutralisation par le gaz.	15
11	Phénomène piézoélectrique	15
12	Injection de charges	16
13	Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le cas d'un isolant cristallin parfait. $E_F$ est le niveau de Fermi	17
14	Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels.	18
15	Energétique de la surface d'un isolant	19
16	Modèle énergétique du contact métal-isolant.	20
17	Travail de sortie $\phi$ d'un métal.	20



## *Liste des figures du chapitre II*

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Représentation schématique des quatre types de polarisation	<b>28</b>
<b>2</b>	Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique	<b>29</b>
<b>3</b>	Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.	<b>30</b>
<b>4</b>	Modélisation des niveaux superficiels des polymères en triboélectrisation.	<b>32</b>
<b>5</b>	Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux polymères de différentes matières par la théorie des niveaux superficiels de haute densité : (a) avant le contact ; (b) durant le contact	<b>5</b>

### *Liste des figures du chapitre III*

<b>N°</b>	<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>1</b>	Représentation schématique (a) position de chargement (b) position de mesure de potentiel de surface sans contact	<b>39</b>
<b>2</b>	Photographie d'échantillon de la peau de chèvre utilisé : (a) coté poilu, (b) coté non poilu	<b>39</b>
<b>3</b>	Photographie de l'électrode mise à la terre avec le système de suspension	<b>40</b>
<b>4</b>	Dispositif expérimental de caractérisation des échantillons de la peau de chèvre par la mesure de potentiel de surface installé à laboratoire de génie électrique de Guelma (LGEG)	<b>40</b>
<b>5</b>	Photographie des échantillons du peigne et brosse du cheveu	<b>41</b>
<b>6</b>	Evolution de la charge triboélectrique sur la surface des cheveux secs de chèvre	<b>41</b>
<b>7</b>	Evolution de la charge triboélectrique des cheveux secs en fonction de différents matériaux isolants	<b>42</b>
<b>8</b>	Evolution de la charge triboélectrique des cheveux secs en fonction de différent temps du traitement	<b>43</b>
<b>9</b>	Comparaison entre l'évolution de la charge triboélectrique générée sur des cheveux secs et des cheveux mouillés	<b>43</b>
<b>10</b>	L'évolution de la charge triboélectrique générée sur des cheveux secs en fonction de la vitesse de frottement	<b>44</b>

## *Liste des abréviations*

<b>Symbole</b>	<b>Désignation</b>
P V C	Polychlorure de vinyle
H C L	Chlorure d'hydrogène
$f$	Fréquence
$d$	Distance inter-électrodes
$\mu$	La mobilité des ions
$E$	l'amplitude du champ électrique
UV	Les radiations
Tg	La température de transition vitreuse
Tf	Température de fusion
DPS	Déclin de potentiel de surface
Eg	Energie de gap
Ef	Energie de fermi
B.C	Bande de conduction
B.V	Bande de valence
$U$	Energie de Hubbard
$\chi$	L'affinité électronique de l'isolant.
$\phi_0$	Le travail de sortie des pièges.
$\mu$	Coefficient de frottement
$F_T$	Force tangentielle
$F_N$	Force normale
$E_a$	Champ appliqué
P	Unité de volume noté P
$E_{dip}$	Champ créé
NaCl	Chlorure de sodium
PS	Polystyrène
PE	Polyéthylène
PP	Polypropylène
Nylon 6.6	Une matière plastique de type polyamide
PV OH	Polyvinyle alcool
PV Ac	Photovoltaic
PC	Le polycarbonate

PI	Polyimide
Al	Aluminum
PMMA	Le poly(méthacrylate de méthyle)
PTFE	Le polytétrafluoroéthylène
ABS	L'acrylonitrile butadiène styrène
HDPE	Le polyéthylène haute densité
GPPS	General Purpose Polystyrene
LDPE	Low-density polyethylene
HOMOPP	Homo- Polypropylene
COPP	Copolymer Polypropylene
$E_F^A, E_F^B$	Energie libres
$W_A, W_B$	Le travail d'extraction superficiel

# Introduction générale

L'industrie de polymères isolants est l'un des plus importants secteurs dans les pays développés. L'un des volets de cette industrie consiste à modifier la surface de certains polymères pour Permettre l'obtention de matériaux multi-fonctionnels présentant des propriétés améliorées et pouvant conduire à des avancées technologiques importantes.

Les polymères sont généralement utilisés pour leurs propriétés particulières et leur aptitude à être mis en oeuvre, Ces propriétés sont étroitement liées à leur structure. Ce sont des matériaux très versatiles, légers, malléables et ayant souvent des propriétés physiques et chimiques pouvant être modifiées. Ces propriétés ont permis leur utilisation dans une grande variété d'applications, s'étendant de l'emballage alimentaire, l'industrie automobile, l'électroménager, l'industrie électronique, les revêtements protecteurs, le secteur médical, etc.

Les phénomènes électrostatiques liés à la charge triboélectrique jouent souvent un rôle important dans nombreux processus industriels impliquant le transport, le stockage, le tri et l'écoulement des matériaux isolants en forme de granules. Ces phénomènes peuvent causer des problèmes allant d'un simple choc électrique jusqu'aux conséquences les plus graves telles que les incendies.

Le redressement des cheveux humain en utilisant des brosses et des peignes qui sont fabriqués en polymère isolant, fait apparaître des charges électrostatiques indésirable au niveau des cheveux ou plutôt au niveau de la tête ! Il devient dès lors très important de pouvoir contrôler ces charges en procédant à leur élimination ou au moins d'en réduire la quantité à des niveaux non gênants.





# Introduction générale

---

Dans ce travail, nous allons simuler expérimentalement le processus de redressement des cheveux humain avec des brosses en polymère isolant, l'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau des charges triboélectriques générées pendant le processus et leur comportement au cours du temps.

Ce mémoire comporte trois chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre est consacré dans une première partie à la présentation de quelques notions sur les polymères, leurs techniques de chargement électrostatique et la description de quelques phénomènes physiques responsables du déclin de potentiel.

Dans le second chapitre nous rappellerons quelques approches et théories qui décrivent le comportement diélectrique et tribologique des polymères isolants.

Le troisième chapitre réservé à la démarche expérimentale avec les résultats expérimentaux obtenus

# CHAPITRE I

### I.1. Définition d'un polymère:

Le mot polymère d'origine Grec *polus -meros*, est composé de deux mots, « polus » qui veut dire plusieurs et « méros » qui veut dire partie est par définition une macromolécule organique ou inorganique constituée de l'enchaînement répété d'un même motif. Les monomères sont liés les uns aux autres par des liaisons covalentes.

Les polymères peuvent être constitués d'un seul motif ou d'un seul monomère dans ce cas on parle d'un homopolymère. Dans le cas où il y'a deux monomères différents on parle d'un copolymère [1].

### I.2. Classification des polymères :

Les polymères peuvent être classés selon plusieurs modes qui sont :

#### a) *Leurs nature chimique :*

- Polymères minéraux
- Polymères organiques
- Polymères mixtes.

#### b) *Leur origine :*

- Polymères naturels : caoutchouc naturel, cellulose.
- Polymères artificiels : obtenus par modification de polymères naturels.
- Polymères synthétiques : obtenus à partir de monomères qui n'existent pas dans la nature.

#### c) *Leurs domaine d'application:*

- Polymères techniques : ces polymères peuvent remplacer les matériaux traditionnels (métaux, céramiques...)
- Polymères spéciaux : ces polymères possédant une propriété particulière (adhésion...) qui permet leur utilisation dans une application spécifique.

#### d) *Selon leur dimensionnalité :*

- Polymère monodimensionnel (linéaire).
- Polymère bidimensionnel (plan).
- Polymères tridimensionnel (réseau).

#### e) *Selon leur comportement thermique :*

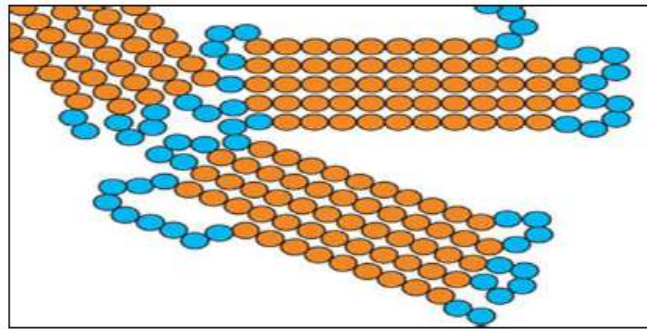
- Les thermoplastiques : sont des polymères qui peuvent être moulés par chauffage et durcis par refroidissement.
- Les thermodurcissables : sont durs à la chaleur, ils se transforment de façon irréversible.
- Les élastomères : ils subissent de très grandes déformations sous l'action de contraintes mécaniques [2].

### I.3. Caractéristiques des polymères :

#### I.3.1. Structure du polymère:

Il existe plusieurs types de polymères :

- Les polymères amorphes: dans ce cas les chaînes macromoléculaires ne sont pas arrangées, il y'a un désordre total.
- Les polymères cristallins : il existe dans ce cas les zones cristallines (les chaînes sont ordonnées).
- Les polymères semi-cristallins : ils se composent d'une phase cristalline (l'ordre) et une phase amorphe (désordre) [3].

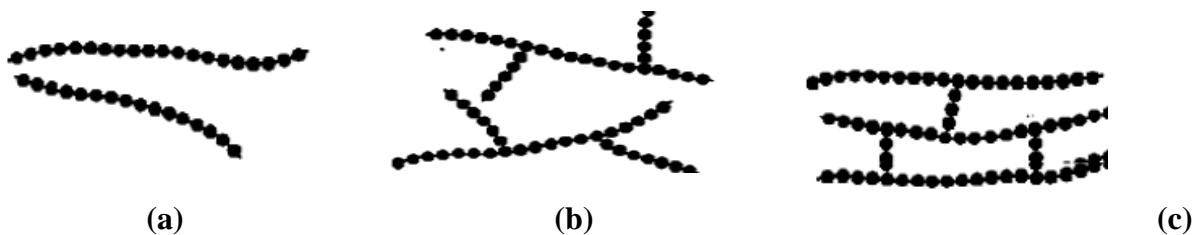


*Figure I.1: Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin (■ Partie cristalline, et ■ Partie amorphe)*

#### I.3.2. Type de polymères :

On distingue deux types de chaînes :

- **les polymères linéaires:** les motifs s'enchaînent de manière unidimensionnelle comme le montre la figure I.2.a, c'est le cas des polymères thermoplastiques.
- **les polymères ramifiés:** s'il existe des ramifications sur la chaîne, elles peuvent être courtes (polymère branché) ou longues et reliées entre elles (polymère réticulé). Ils sont montrés sur la figure I.2.b et I.2.c respectivement [4,5].



*Figure I.2: Les trois types de polymères.*

#### **I.4. Amélioration des propriétés physico-chimique des polymères.**

La charge monomère est polymérisée pour former un polymère, divers composés peuvent être introduits dans le polymère pour améliorer les propriétés physiques et chimiques (sa résistance aux flammes, sa coulabilité et sa résistance au choc) du matériau et faciliter sa mise en œuvre. S'il entre dans une proportion inférieure à 10 % du produit on les qualifie d'additifs, sinon on les appelle adjuvants [6].

##### **I.4.1. Les additifs.**

Ils peuvent être des chaînes courtes de polymères, des oligomères ou de petites molécules. Le produit obtenu est un polymère. Parmi les additifs utilisés on distingue :

- **Les plastifiants.**

Ils augmentent la souplesse en diminuant la température de transition vitreuse. En effet ces derniers agissent en réduisant les forces de liaisons intermoléculaires ce qui augmente le volume libre entre les molécules permettant ainsi aux macromolécules de glisser les unes sur les autres. Cet état mène à une grande mobilité moléculaire en dessous de la température de la transition vitreuse et par conséquent une modification de la rigidité du produit fini.

On utilise un minimum de 10% de plastifiant en masse dans la composition, sinon le matériau durcit. Le problème rencontré est que les plastifiants migrent. Une augmentation du facteur de dissipation est enregistrée dans le cas d'utilisation des plastifiants dans l'isolation électrique pour les hautes tensions et les hautes fréquences.

- **Les antioxydants.**

Ils évitent la dégradation du polymère par l'oxygène.

- **Les stabilisants thermiques.**

Ralentissent la dégradation des polymères pendant la mise en œuvre où l'utilisation améliore la résistance aux effets de chaleur, radiation et oxydation.

Sous l'effet de la chaleur, le P V C se décompose en libérant de l'acide chlorhydrique H C L et devient très cassant. Conduisant alors à une perte de ces propriétés électriques. Le problème de cette dégradation rapide de l'isolant est résolu par l'ajout de ces stabilisants qui ont pour effet de piéger une part d'H C L et de surpasser tout effet catalytique et accorder une stabilité thermique au produit fini, en préservant ses propriétés diélectriques.



- **Stabilisants U.V.**

Un photon U.V. a une longueur d'onde comprise entre 0,28 et 0,40 microns. Ce qui correspond à une énergie de 72 à 100 kcal/mole. Cette énergie est suffisante pour casser une liaison d'un carbone tertiaire. Pour éviter de fragiliser des polymères, on utilise de la phénylsalicylate dont les liaisons tertiaires sont particulièrement faibles. Ce sont celles là et non celles du polymère qui se casseront.

- **Antistatiques.**

Se sont des agents hydroscopiques, acides gras, lubrifiant, pellicule métallique,..... Ils permettent d'augmenter l'écoulement des charges en augmentant la conductivité superficielle.

- **Les pigments.** inorganiques (denses et opaques, volumineux (oxydes de fer,...)) ou organiques (plus brillants et plus petits).

- **Agent démoulant, lubrifiants.** silicones ou esters d'acide gras.

- **Les fongicides.** pour tuer les microorganismes qui croissent dans le polymère.

#### I.4.2. Les charges

Ce sont des éléments organiques et inorganiques d'environ 10 microns que l'on ajoute. Il n'y a pas d'interactions entre charges et polymères. Les charges n'ont donc pas d'effet spécifique sur les propriétés du produit final que l'on appelle alors un polymère chargé.

- **Les charges organiques.**

Le carbone (en sphère d'environ 80 microns de diamètre) améliore la résistance aux U.V. et la conductivité électrique. Ils sont utilisés surtout pour les élastomères et les polyoléfines. Les charges cellulosiques (farine de bois ...) s'utilisent surtout pour le P V C et les polyoléfines.

- **Les charges inorganiques.**

Des billes de verre d'un diamètre proche de 40 microns, pleines ou creuses permettent de faire un polymère lisse. Les silicates (talcs, caolin, micas, ....) Ont un effet légèrement renforçant.

#### I.4.3. Les renforts.

Se sont des particules d'environ 50 microns de diamètre, ajoutés aux polymères pour optimiser ces propriétés (surtout mécanique). Ces derniers interagissent avec les polymères originaux. Le produit obtenu est un composite, comme les fibres de verre[7].

## I.5. Avantages et inconvénients des polymères :

### I.5.1. Avantages

L'avantage des polymères par rapport aux autres matériaux comme les métaux ou les céramiques, est de pouvoir modifier leur composition pour obtenir une plus grande variété de structures et de propriétés. S'il existe des polymères d'origine naturelle tels que la soie ou la cellulose, les polymères d'origine synthétique sont d'une manière générale plus intéressants par la malléabilité de leur composition.

### I.5.2. Inconvénients

Reste le manque de biocompatibilité de la majorité de ces matériaux qui sont la cause de réactions inflammatoires lors de la mise en contact avec un milieu vivant. Malgré cela, certains de ces matériaux sont déjà très utilisés dans le milieu médical. La liste des applications présentée est loin d'être exhaustive, mais elle donne une vision globale du rôle des polymères dans la médecine actuelle.

## I.6. Applications des polymères :

Les polymères constituent une des principales révolutions techniques. Ceux-ci sont utilisés pour un nombre extraordinaires d'applications à tous les échelons de la vie.

**Tableau 1** : Les domaines d'application des polymères

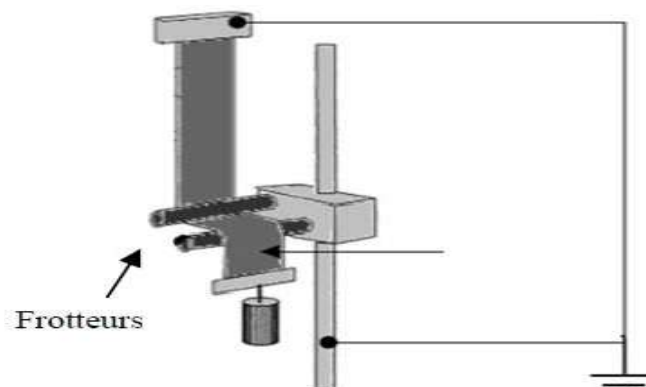
<b>Domaines</b>	<b>Exemples</b>
<b>Le secteur de la construction</b>	Les portes, conduites d'eau et l'assainissement, peinture des murs des planchers et des plafonds, revêtement du sol.
<b>Médecine et santé</b>	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les prothèses, Seringues, industrie dentaire, outils de la chirurgie
<b>Articles ménagers</b>	Meuble, seaux, vaisselle,...
<b>Matériel électrique et électronique</b>	Isolation, ordinateurs et les caméras, Radio et télévision, téléphone....
<b>Industrie automobile</b>	Tapie, tableau de bord, habillage intérieur, pneus, par choc,....

<b>Industrie textile</b>	Vêtement, fibres textiles synthétiques, sacs, skaï, similicuir,...
<b>Le domaine alimentaire</b>	Procédés de fabrication d'aliments, emballages (bouteilles, pots de yaourt, briques de lait, boîtes à oeufs) ou industriel (flacons de détergent, sachets et sacs, casiers)...
<b>Technologie avancée</b>	Avions, bateaux, satellites,...

## I.7. Electrification des polymères isolants:

### I.7.1. Charge par effet triboélectrique

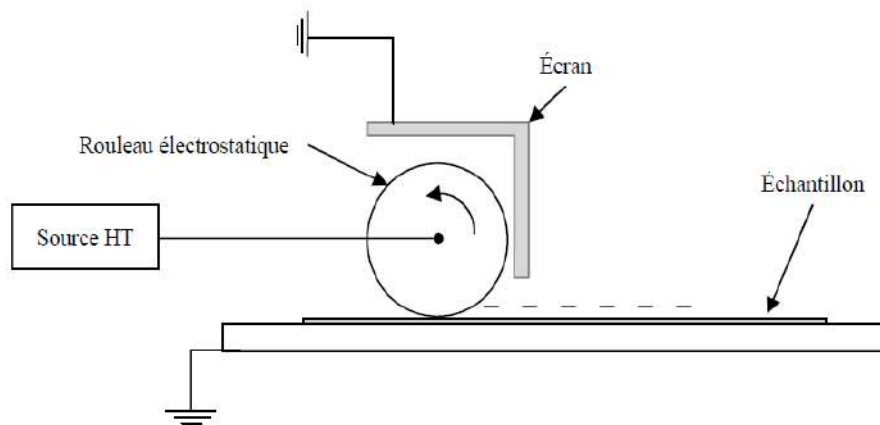
L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux. Sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact. Le frottement impliquant des contacts suivis de séparations, améliore les conditions de charge. Lorsque deux matériaux différents et électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation. La charge transférée augmente généralement avec la surface du contact, la pression entre les deux matériaux en contact ainsi qu'avec la vitesse du frottement. Elle diminue avec la rugosité des surfaces de contact [10-14]. La charge par effet triboélectrique s'accompagne de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. La reproductibilité de la charge est très difficile à obtenir par ce mécanisme. La figure I.4 présente un dispositif de charge par effet triboélectrique utilisé dans l'évaluation de l'aptitude d'un textile fibreux à se charger par frottement et à atteindre des potentiels de surface plus ou moins importants [9]. Cette évaluation permet de prévenir la manifestation des courants de décharge.



*Figure I.4 : Dispositif de charge par effet triboélectrique.*

### I.7.2. Charge par rouleau électrostatique

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation. Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension [15,16].



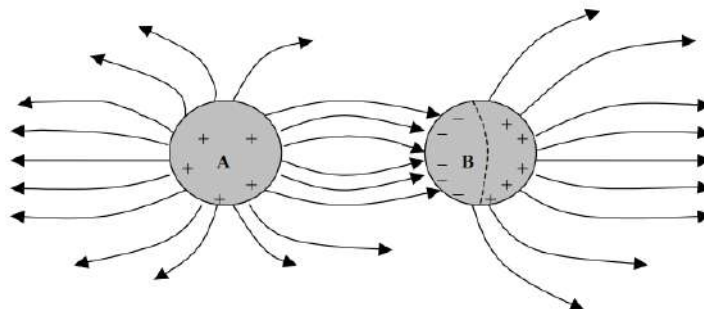
*Figure I.5 : Principe d'un dispositif de charge par rouleau électrostatique.*

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est très probablement de type électronique. La charge séparée résulte des différences dans la structure électronique des deux corps en contact. Elle est influencée tout d'abord par la nature des matériaux et par les traitements subis par leurs surfaces [17]. La distribution de charge de surface déposée étant homogène à l'échelle macroscopique et ces rouleaux sont utilisés pour charger les feuilles de papier dans les imprimantes laser.

### I.7.3. Charge par influence (induction)

Le phénomène d'influence correspond à l'apparition de charges électrostatiques sur un corps conducteur dû à la proximité d'un corps déjà chargé, sans qu'il y ait contact entre les deux. En effet la présence du corps chargé induit un champ électrique à l'intérieur du corps influencé produisant ainsi des forces qui vont s'exercer sur les porteurs de charges libres ayant pour conséquence une redistribution de ceux-ci. La charge ainsi induite sera de signe opposé à la charge du corps influençant.

En fait, en présence d'un champ électrique le matériau se polarise, une charge surfacique induite dite de polarisation apparaît alors [18,19]. Comme le montre la figure I.6, il y apparaît autant de charges (+) que de charges (-).



**Figure I.6:** Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)

A la séparation des deux zones chargées formées sur le corps influencé, il existe une ligne neutre. La région qui est la plus proche du corps influençant est chargée de signe contraire, et comme on peut le voir sur la figure, une partie des lignes de champ partant du corps influençant n'arrivent pas sur le corps influencé, de telle sorte que la charge ainsi induite sera toujours plus faible en valeur absolue que celle portée par le corps A [20].

#### **I.7.4. Charge par décharge couronne**

La création des charges sur la surface des isolants polymères peut être réalisée par plusieurs procédés : décharge couronne, triboélectricité, piézoélectricité ou par faisceaux d'électrons. Dans la plupart des applications électrostatiques actuelles, le chargement est réalisé soit par décharge couronne soit par triboélectricité, en raison de leur simplicité, sûreté et faible coût. La décharge couronne est une décharge autoentretenu non destructive qui peut apparaître lorsqu'une différence de potentiel suffisamment élevée est appliquée entre des électrodes asymétriques, tels que fil – plan ou pointe – plan. La dissymétrie des électrodes conduit à un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes. Au voisinage de l'électrode pointue, le champ peut être suffisamment élevé pour provoquer l'ionisation de l'air et les charges qui en résultent sont entraînées vers l'électrode à faible champ où se situe la surface à charger. L'intervalle d'aire entre électrodes comporte deux zones : une zone ionisée et une zone de dérive.

##### **I.7.4.1. Décharge couronne positive**

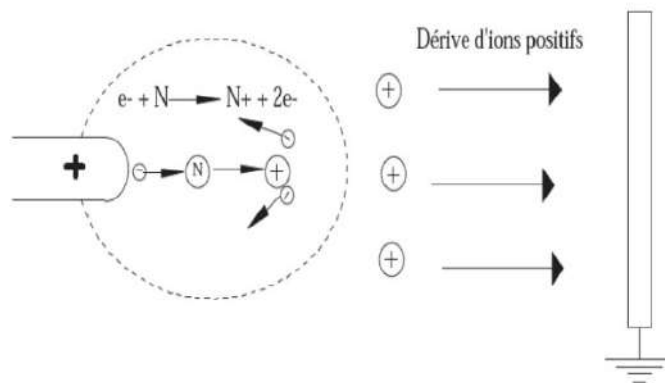
La décharge couronne positive est celle qui se produit quand la pointe est portée à un potentiel positif et la plaque à la terre. Dans ce cas, dans la zone de champ intense autour de la pointe, des électrons sont produits par photo-ionisation et sont accélérés vers l'anode (la pointe). Autour de celle-ci, se développe alors une région de forte ionisation : zone en pointillé sur la figure I.7. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode [24], sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible



(< 30 kV/cm dans l'air à pression atmosphérique) ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque).

Différents régimes existent pour la décharge couronne [21]. Juste au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne positive est pulsatoire. En augmentant la tension, la décharge positive devient une décharge lumineuse continue. Pour les tensions très élevées, la décharge se transforme en claquage (arc).

Dans l'air ambiant, les espèces dominantes, en décharge positive, sont des ions hydratés de formule générale  $(\text{H}_2\text{O})_n \text{H}^+$ , où  $n$  est un entier qui augmente avec l'humidité. À faible taux d'humidité d'autres ions deviennent dominant, tels que  $(\text{H}_2\text{O})_n \text{NO}^+$  et  $(\text{H}_2\text{O})_n (\text{NO}^2)^+$ .



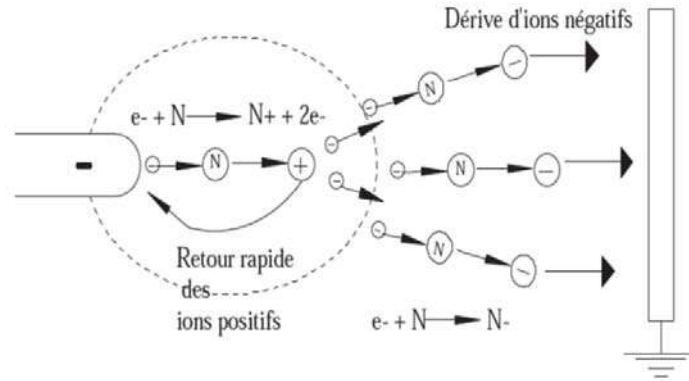
**Figure I.7 :** Description de la décharge couronne positive.

#### I.7.4.2. Décharge couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. Les ions positifs alors créés reviennent rapidement à la cathode (figure I.8).

Au-delà du seuil d'apparition, la décharge couronne négative a un régime pulsateur. En augmentant la tension, la décharge négative atteint le régime d'impulsions de Trichel [21-23] dont la fréquence dépend de la tension appliquée. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode [24]. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques. Une fois ces ions migrés vers l'anode, de nouvelles avalanches apparaissent. L'intervalle entre deux pics de courant, impulsions de Trichel, dépend donc du temps nécessaire aux ions négatifs à atteindre l'anode [22].

En décharge couronne négative, les ions les plus dominants sont les ions  $\text{CO}^{3-}$  ; à 50 % d'humidité relative environ 10 % des ions sont hydratés  $(\text{H}_2\text{O})_n \text{CO}^{3-}$ .



**Figure I.8 :** Description de la décharge couronne négative.

### I.7.4.3. Décharge couronne alternative

Dans ce cas, le processus de la décharge soumise à une excitation alternative est identique à ceux décrits pour une excitation continue [22], dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence  $f$  et d'une distance inter-électrodes  $d$  limites reliées par l'expression suivante [22] :

$$d_{\max} = \frac{\mu E}{\pi f} \Rightarrow f_{\max} = \frac{\mu E}{\pi d} \quad (\text{I.1})$$

Avec  $\mu$  la mobilité des ions et  $E$  l'amplitude du champ électrique.

## I.8. Propriétés des polymères solides

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles que celles des métaux aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, les radiations UV et les agents chimiques.

Les caractéristiques de résistance peuvent différer seulement d'un ordre de grandeur. Hormis les paramètres spécifiques ou matériaux (masse molaire, taux de ramification, mobilité des chaînes, taux de réticulation,.....), et les conditions extérieures (humidité, agents chimiques, température, vitesse de sollicitation, type et intensité des contraintes appliquées) [8].

### I.5.1 Propriétés physiques :

Avant tout, rappelons qu'il existe une grande variété de matières plastiques, tout comme il existe un grand nombre d'alliages métalliques, une des caractéristiques physiques générales des polymères est :

La masse volumique : La masse volumique des matières plastiques est peu élevée. La légèreté des polymères est sans aucun doute une des qualités qui a le plus largement contribué à leur diffusion. En ce qui concerne le rapport (résistance à la traction / masse volumique), certains polymères sont en fait supérieurs bien à des matériaux métalliques.

La faible masse volumique des plastiques est due au faible poids atomique des principaux atomes de leurs chaînes (principalement l'hydrogène et le carbone).

### **I.5.2 Propriétés thermiques :**

La température de transition vitreuse "**T<sub>g</sub>**" et la température de fusion "**T<sub>f</sub>**" sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères.

La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement.

Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante :

**Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.**

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température.

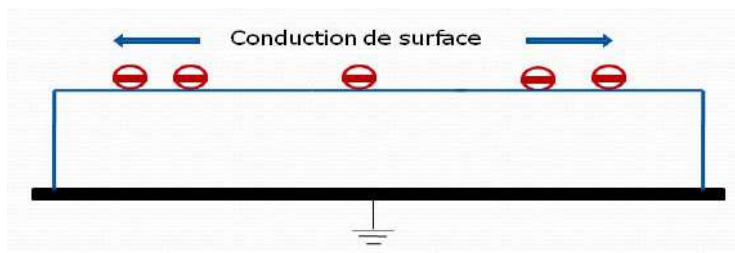
### **I.8. Propriétés diélectriques**

Les modélisations de l'évolution de potentiel de surface ont surtout mis en évidence la complexité des causes physiques qui donnent naissance à cette évolution.

Nous allons expliquer rapidement les différentes causes physiques possibles de l'évolution de potentiel de surface (déclin de potentiel de surface DPS).

#### **I.8.1. Conduction de surface**

La conduction de surface constitue une des causes du déclin. Elle est observée surtout dans les cas d'échantillons épais vieillis par décharges couronnes [28]. Les charges se déplacent sur les couches primaires de la surface.



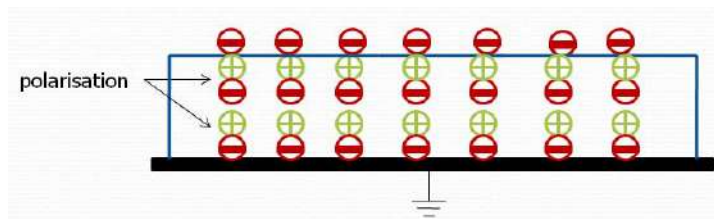
**Figure I.9 :** Conduction de surface.

Lorsque la surface d'un isolant est soumise à la décharge couronne pendant un certain temps, il apparaît une modification rapide et importante des propriétés de la surface [28].

Grâce à la présence de l'oxygène, l'ensemble de la surface présente une structure différente sous forme de couche dégradée fortement oxydée [27]. Les propriétés physico-chimiques de cette couche sont très différentes de celle du matériau initial. Il en résulte une importante conductivité de surface. L'évolution de cette surface est assez complexe et dépend de plusieurs paramètres tels que la structure de l'isolant, du mode de vieillissement, etc.... [27].

### I.8.2. Polarisation de l'échantillon

Plusieurs études [25,26] ont montré que les phénomènes de polarisation sont responsables pour une partie du déclin de potentiel et parfois même pour expliquer à eux seuls le déclin.



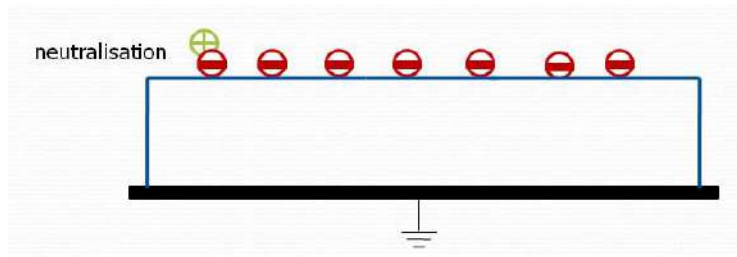
**Figure I.10 :** Polarisation de l'échantillon.

La charge déposée sur la surface de l'isolant modifie le champ existant dans le matériau. Sous l'action du champ électrique créé par ces charges surfaciques, des dipôles s'orientent sous ce champ ; les dipôles les plus proches de la surface s'orientent de telle manière qu'ils viennent compenser la charge surfacique. Ces charges ne peuvent se déplacer que sur une distance de l'ordre de grandeur d'une molécule. Chaque molécule présente alors un dipôle.

Ce phénomène est caractérisé par l'apparition d'une mince couche de charges positives, à l'intérieur, il y a compensation des charges de polarisation. La circulation de la charge peut être alors expliquée en partie par l'apparition de charges de polarisation. Ce phénomène est généralement caractérisé par la constante diélectrique qui demeure sensible à la température.

### I.8.3. Neutralisation par le gaz

La neutralisation des charges déposées sur la surface de l'isolant par les charges libres provenant directement du gaz qui entoure l'isolant est un autre processus qui peut contribuer au déclin de potentiel de surface.

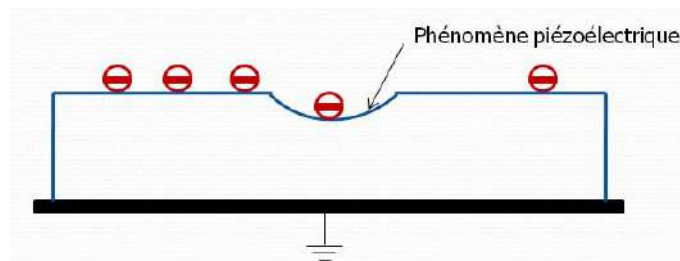


*Figure I.11 : Neutralisation par le gaz.*

Lors du dépôt de charges, le champ électrique environnant la surface de l'isolant est complètement modifié. Les atomes et les molécules subissent alors l'effet du champ et s'orientent de manière à créer une charge opposée à celle de la surface [32].

### I.8.4. Phénomènes piézoélectriques

L'effet piézoélectrique a été cité souvent comme processus physique qui peut participer au déclin de potentiel [16].



*Figure I.12 : Phénomène piézoélectrique.*

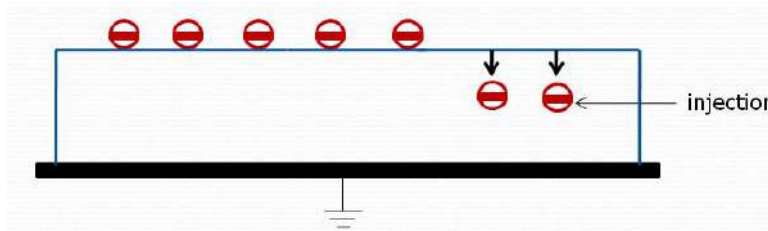
Les polymères ont une structure moléculaire désordonnée, ils contiennent des zones cristallines et des zones amorphes. La piézo-électricité est un phénomène propre à certains types de cristaux. Cet effet apparaît à la surface de ces corps quand on les soumet à des pressions ou à des charges électriques.

Sous l'effet d'un champ électrique, la structure piézoélectrique sera le siège de champs de déformations et de contraintes induites. De plus, la charge déposée sur la surface crée une force sur le matériau qui subit une contraction de son volume, cela se traduit alors par l'apparition d'une polarisation électrique à la surface [30].



### I.8.5. Injection de charges

Le phénomène d'injection de charge à partir de la surface du matériau isolant dans le volume est une injection des porteurs de charges déposés sur la surface de l'isolant à travers le volume. Ainsi, une partie du volume de l'isolant change de propriétés électriques et devient chargée.



*Figure I.13 : Injection de charges.*

Par ailleurs, la conduction en volume correspond à un déplacement de charges dans le volume, alors que le matériau reste plutôt neutre.

Le phénomène d'injection de charges est le processus qui domine les mécanismes observés dans la littérature sur les mesures de déclin de potentiel [31]. C'est un phénomène assez complexe qui dépend de plusieurs paramètres. L'état de surface ou son contact avec un autre matériau joue un rôle important sur le processus de l'injection. La décharge couronne, le temps d'exposition à la décharge, ainsi que la température et l'humidité volumique sont des facteurs qui peuvent jouer un rôle de premier plan, la conduction en volume est surtout présente dans le cas des échantillons minces (épaisseur de l'ordre du micron) [28], mais elle reste également observée dans des échantillons épais.

Tous ces phénomènes peuvent agir en même temps et devront être considérés pour interpréter le déclin. Toutefois, on peut noter la présence prédominante de trois interprétations dans la littérature : la conduction de surface, la conduction de volume et le phénomène de polarisation des matériaux diélectriques. Depuis les premières mesures sur l'évolution du DPS [29], bon nombre de travaux ont été réalisés, dans ce sens. Nous allons passer en revue les principaux modèles de DPS et les différents modèles physiques préconisés.

## I.9. Théorie des bandes d'énergie

### I.9.1. Cas des matériaux isolants parfaits

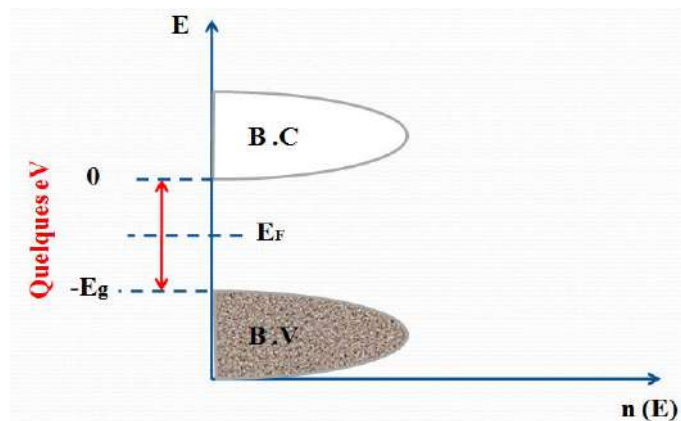
La structure de bande d'énergie d'un isolant résulte de la combinaison de la nature ondulatoire de l'électron et de la périodicité du réseau cristallin. Les électrons du cristal (intrinsèque ou injectés) ne peuvent occuper qu'un certain nombre d'états d'énergie permis qui se répartissent en bandes séparées par des intervalles d'énergies interdits, communément désignés par le mot anglais « gap » [33-35].

Comme l'illustre la figure I.14, le matériau isolant présente deux particularités la bande suivante (bande de conduction) est vide et séparée de la bande de valence par un gap,  $E_g$  de l'ordre de quelques eV ( $E_g > 5$  eV).

La seule possibilité offerte à un électron pour changer d'état sous l'application (par exemple) d'un champ électrique est de transiter vers la bande vide suivante (bande de conduction). Cependant, étant donnée l'importante valeur de  $E_g$ , l'énergie fournie par le champ électrique reste insuffisante pour produire une telle transition et l'application d'un champ électrique (modéré) ne s'accompagne pas d'une circulation de charges.

Par contre si un électron excédentaire est injecté dans ce cristal parfait mis à la masse, il sera rapidement évacué et aucune localisation (ou piégeage) de charge n'est possible. Ceci constitue la définition « académique » d'un isolant.

En pratique cependant la situation est beaucoup plus complexe, car d'une part la présence de défauts et d'impuretés dans l'isolant est un fait inévitable et d'autre part le plus grand nombre des isolants qui nous entourent sont souvent des milieux polycristallins ou amorphes (ils ne présentent pas de structure cristalline parfaite). Ces « imperfections » jouent un rôle important dans le comportement des isolants soumis à une injection de charges en général et une irradiation électronique en particulier. Nous allons donc rappeler leur rôle dans le transport et la localisation de charges.



**Figure I.14 :** Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le cas d'un isolant cristallin parfait.  $E_F$  est le niveau de Fermi.

### I.9.2. Défauts et impuretés

Les défauts peuvent être aussi bien des défauts ponctuels (lacune, impureté en substitution, atome en position interstitielle, défauts de Schottky et Frenkel, etc.) que des défauts linéaires et bidimensionnels (dislocations et joints de grains) ou bien encore des défauts d'empilement inhérents à la structure du matériau.

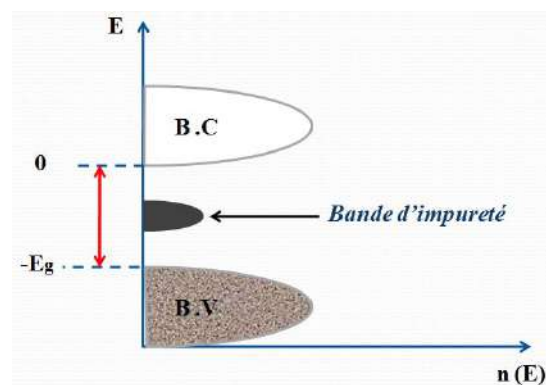
La présence de ces défauts se traduit par la modification de la structure de bande de l'isolant. Les impuretés, les lacunes, ...etc, sont capables (si les perturbations qu'elles génèrent sont assez importantes) de créer des niveaux localisés dans la bande interdite. Selon la configuration du défaut, le niveau créé est susceptible de localiser (pendant un temps plus ou moins long) un ou plusieurs électrons pour les restituer, sous l'action d'une excitation, à la bande de conduction (niveau donneur) ou bien de localiser un ou plusieurs trous pour les céder par la suite à la bande de valence (niveau accepteur).

Un isolant contient en général plusieurs types de défauts ponctuels répartis aléatoirement dans l'espace. Par conséquent, l'ensemble des niveaux créés forme une ou plusieurs bandes d'énergie dans la bande interdite (figure I.15). La largeur de cette bande ou de ces bandes est d'autant plus importante que la densité des défauts ponctuels est grande. Plus la concentration en défauts est importante plus cette bande est large. À très forte concentration de défauts, cette bande peut atteindre la bande de conduction.

La description de la bande d'impuretés ne considère souvent qu'un seul électron, or les états de cette bande peuvent généralement contenir plusieurs électrons. Tout électron introduit dans le solide subit une interaction avec l'électron qui occupe le même site, il apparaît donc une énergie de répulsion  $U$  appelée énergie de Hubbard.

Cette interaction induit la séparation en deux bandes distinctes de la bande d'impureté appelées bandes Hubbard, distantes de l'énergie  $U$ . La bande inférieure contient les électrons de valence de l'atome d'impureté. La bande supérieure contient les électrons qui forment un site chargé négativement.

La mobilité des électrons dépend fortement de la température et de la concentration des défauts. Plus cette concentration est importante et plus la distance entre défauts est faible et plus la mobilité des électrons par sauts successifs est accrue. Notons en plus que le changement d'état (et donc la mobilité) d'un électron localisé dans ces bandes ne peut se faire sans le concours d'une énergie fournie par les phonons. La mobilité dans les bandes d'impuretés est donc activée par la température.



**Figure I.15 :** Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels.



vident de façon à retrouver l'équilibre des niveaux de Fermi et donc la neutralité globale du matériau (figure I.17).

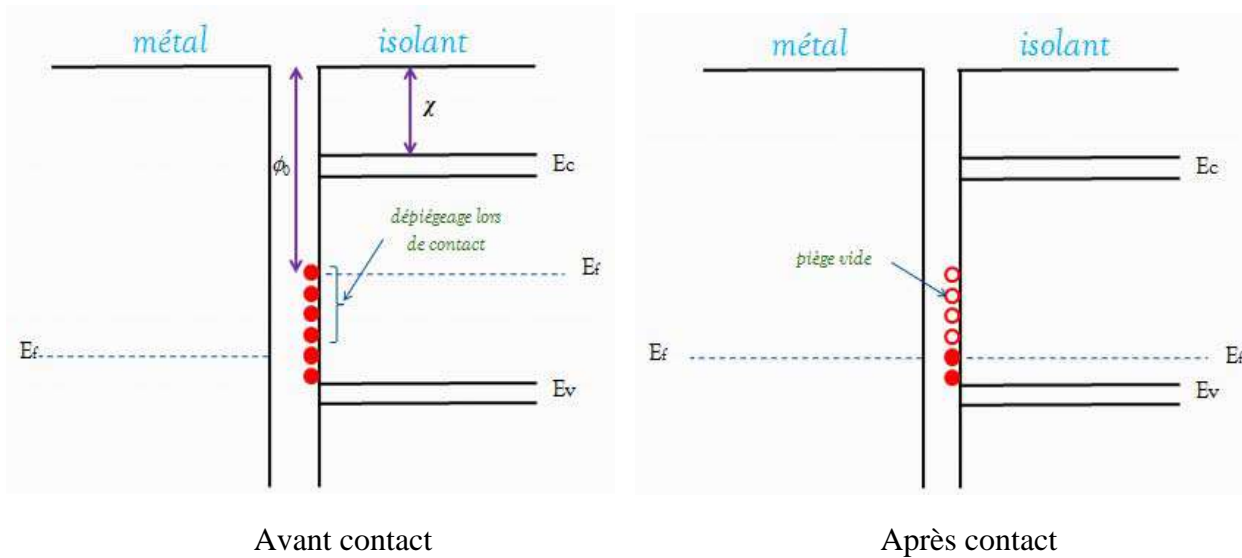


Figure I.17 : Modèle énergétique du contact métal-isolant.

Où :

$\chi$  est l'affinité électronique de l'isolant.

$\phi_0$  est le travail de sortie des pièges.

La hauteur de la barrière de potentiel dépend de la nature du contact, dans le cas du contact avec un isolant, la hauteur de la barrière est diminuée par l'affinité électronique de l'isolant  $\chi$ .

### I.9.5. Le travail de sortie

Un métal contient des électrons libres qui peuvent se mouvoir, mais qui ne peuvent pas spontanément quitter le métal à cause de la barrière de potentiel à l'interface métal-vide (figure I.18). Cependant, du fait de leur mouvement, ces électrons acquièrent une certaine énergie cinétique occupant ainsi des niveaux d'énergie différents. Le niveau d'énergie le plus élevé occupé par un électron est appelé niveau de Fermi. Le travail de sortie  $\phi$  d'un métal est la différence  $\phi = \xi - \chi$  qui correspond donc à l'énergie nécessaire à un électron pour quitter le métal [39,40].

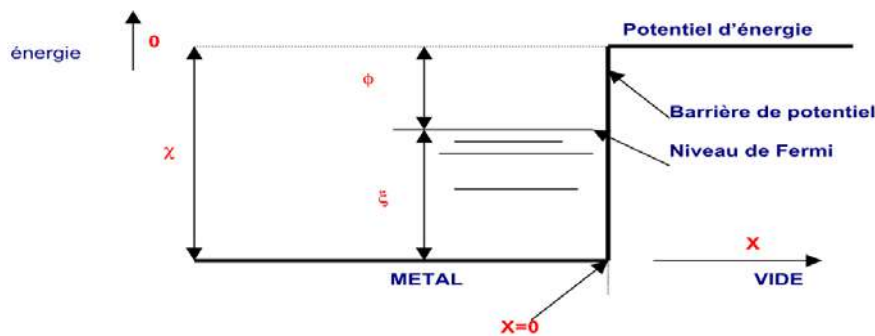


Figure I.18 : Travail de sortie  $\phi$  d'un métal.

**Conclusion**

Dans cette partie, nous avons rappelé de manière bibliographique quelques notions sur les polymères, leurs structures et quelques domaines d'application, nous avons ensuite présenté différentes techniques de chargement notamment la décharge couronne, l'effet triboélectrique, ainsi que les phénomènes physiques responsables de l'évolution de potentiel de surface.

## Références bibliographiques du chapitre I

- [1] C.M. Chan, T.M. Ko, H. Hiraoka, " Polymer surface modification by plasmas and photons ", *Surface Science Reports*, no. 24, pp. 1-54, 1996
- [2] DALI-YOUCHEF Boumédiène, "Acrylates Cristaux liquides Diagrammes de phases Diffusion Photo polymérisation Plan d'expérience Rayonnement ultraviolet Relaxation moléculaire Réseaux polymères Réticulation Solvants organiques", *Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen*, 2009.
- [3] ZOUBIR Ibtissam, "Elaboration et caractérisation d'un matériau composite polymère-ZnO", *Mémoire de MASTER, Université de Tlemcen*, 2017.
- [4] MERAH Dounya, " Cinétique de polymérisation des systèmes acryliques en absence et en présence d'un cristal liquide" , *Mémoire de MASTER, Université de Tlemcen*, 2014.
- [5] Michel Fontanille, Yves Gnanou, Chimie et physico-chimie des polymères, Sciences Sup, Dunod, 2014.
- [6] Adam elisabeth, Bouffandeau pascal, Darraspen alexandre, Fix romuald, Jouve sebastien, Welker olivier, "Méthodes d'analyse des composés amorphes", *Axe : Génie des Procédés, centre SPIN, Ecole des Mines de Saint-Etienne*.
- [7] ABID Djamila, " caractérisation des polymères par la méthode de courants thermiquement stimulés", *Mémoire de MAGISTER, Université de des Sciences et de la Technologie d'Oran*, 2010.
- [8] ATMANI Abderaouf, " comportement mécanique en traction monotone d'un polymère associé au carbonate de calcium (PEHD 5502/CaCO<sub>3</sub>)", *Mémoire de MASTER, Université BADJI MOKHTAR ANNABA*, 2017.
- [9] T. Hammi, "Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles, " *Thèse de Doctorat, Université de Lille*, 2005.
- [10] K. C. Kao, " Dielectric phenomena in solids ", *Elsevier Academic Press*, ISBN:0-12-396561-6, 2004.
- [11] B. Tabti, " Contribution à la modélisation de dispositifs et la caractérisation de matériaux en électrotechnique ", *Thèse de Doctorat, Université de Bejaia*, 2011.



- [12] K. L. Kaiser, " Electrostatic discharge ", *Taylor & Francis Group*, ISBN 0-8493-7188-0, 2006.
- [13] N. Berger, M. Denozière, J. C. Gilet, D. Guionnet, H. Romat, "Electricité statique ", *Edition INRS ED 874, 2<sup>ème</sup> édition*, ISBN 2-7389-1196-X, 2004.
- [14] R. Kacprzyk, C. Stec, " Measurements of the surface charge density on moving webs ", *Journal of Electrostatics*, vol. 40-41, pp. 455-46, 1997.
- [15] C. MENGUY, " Électricité statique : Principes. Problèmes. Applications ", *Techniques de l'Ingénieur*, D1035, pp. 1-25.
- [16] P. Llovera Segovia, " Étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel. Nouveaux outils d'analyse", *Thèse de Doctorat, Université de Paris*, 2002.
- [17] T. H. Pratt, " Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions ", *Burgoyne Incorporated, Consulting Scientists & Engineers, Marietta, Georgia*. ISBN 0-8169-9948-1, 2000.
- [18] DURAND E, " Electrostatique – I ", les distributions Masson, 1964
- [19] DURAND E, " Electrostatique – II ", Problèmes généraux, conducteurs Masson, 1966.
- [20] Fardjaoui Roqiya, "Neutralisation des charges sur la surface des isolants : application sur les cheveux", *Université 8 Mai 1945 – Guelma*, 2018
- [21] J. A. Giacometti and O. N. O. Jr, " Corona Charging of Ploymers ", *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 27, no. 5, pp. 924-943, 1992.
- [22] A. Labergue, " Étude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas – Application au contrôle de décollements d'écoulements ", *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers*, 2005.
- [23] G. G. Raju, *Gaseous electronics, theory and practice: CRC Taylor and Francis*, 2006.
- [24] M. Kachi, " Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires ", *Thèse de Doctorat, Université de Guelma*, 2012.
- [25] P. Molinie, " Potential decay interpretation and insulating film: cesity of combining charge injection and slow volume polarisation processus ", *Seven. Int. Conf. Of Diele. Mate. Meas*, 1996.
- [26] P. Molinie, M. Goldman and J. Gatellet, " Surface potential decay on corona charged epoxy samples due to polarization processes ", *J. Phys. D : App. Pyhs*, vol. 28, pp. 1606-1610, 1995.

- [27] P. Molinie. " Étude de la neutralisation de la charge électrique déposée par effet couronne à la surface d'un isolant. Application au suivi des premiers stades de vieillissement d'un isolateur époxyde ", *Thèse de doctorat. Université de Paris*, 1992.
- [28] A. Crisci, " Etude du déclin de potentiel d'une surface chargée par une décharge électrique de type couronne ", *Rapport pour maîtrise de physique LEMD*, 1996.
- [29] M. Ieda, G. Sawa, U. Schinohara, "A decay process of surface electric charges across polyethylene film ", *Japan. J. Appl. Phys*, vol. 6, pp. 793-794, 1967.
- [30] P. Llovera, P. Molinié, " New methodology for surface potential decay measurements-application to study charge injection dynamics on polypropylene films ", *IEEE. Trans. Dielect. Elec. Ins*, vol. 11, pp. 1049-1056, 2004.
- [31] P. Molinie, " Charge injection in corona charged polymeric films: Potential decay and current measurement ", *J. of Electrostatics*, pp. 265-273, 1999.
- [32] R. Coelho, L. Levy, D. Serrail, " On the naturel decay of corona charged Teflon sheet I ", *IEEE Transactions on Industry Applications*, pp. 1033-1037, 1984.
- [33] A. Guinier et R. Julien, *La matière à l'état solide*. Edité par Hachette-CNRS : Liaisons Scientifiques, pp. 107-129.
- [34] C. Kittel, *Physique de l'état solide*, 5<sup>ème</sup> édition. Edité par Dunod Université pp 179-202.
- [35] S. Fakhfakh, " Etude des phénomènes de charge des matériaux diélectriques soumis a une irradiation électronique permanente ", *Thèse de Doctorat, Université de Reims*, 2004.
- [36] P. S. Llovera, " étude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel, nouveaux outil d'analyse ", *Thèse de Doctorat, Université de Paris*, 2002.
- [37] B. Bouattou; et Lowell. " Contact charging and small-scale charge migration in polymers ", *J. Phys. D*, vol. 21, pp.1787, 1988.
- [38] N. Bouguila, " Sur le contact métal-isolant ", *Rev. Phys. Appl*, vol. 23, pp. 1467, 1988.
- [39] M. Hairour, " Etude diélectrique d'une isolation hybride gaz-solide pour appareillage haute tension ", *Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II*, 2007.
- [40] ROUAGDIA karim, "Analyse de la dynamique des charges à la surface des polymères isolants ", *Thèse de Doctorat, Université de Guelma*, 2015.

# CHAPITRE II

## II.1. Introduction

Les domaines d'utilisation des polymères ne cessent de croître au fur et à mesure des progrès technologiques (industrie aérospatiale, aéronautique et automobile...). De ce fait ils sont de plus en plus retenus pour leurs propriétés d'isolations électriques associées à de bonnes propriétés mécaniques pour des structures résistantes et légères.

## II.2. Effet de la charge électrique dans les polymères isolants

### II.2.1. Approche mécanique

De nombreux processus mécaniques accompagnent les phénomènes mettant en évidence des particules chargées (triboélectrification, fractoémission...). Pour comprendre ces phénomènes, diverses approches (mécanique, physico-chimiques,...) ont été proposées. C'est en combinant les informations provenant de ces différents domaines qu'il est possible de comprendre le rôle des charges électriques dans les bilans énergétiques (stockage, dissipation ...) et la nature des forces qui existent lors du contact (adhésion, adhérence, frottement, usure...).

#### II.2.1.1. Adhésion

Lors de la mise en contact entre deux corps différents, il apparaît [1] des forces superficielles à courte, moyenne et longue portée participant à l'adhésion. Elles regroupent.

- Les interactions inter atomiques (0.1 à 0.2 nm) par recouvrement des orbitales de surfaces, transferts électroniques et équilibrages des niveaux de Fermi.
- Les interactions dipolaires de type van der Waals, à moyenne distance.
- Les forces électrostatiques à grande distance liées à la polarisation des matériaux et à l'apparition d'une charge d'espace, ils viennent s'ajouter ou se soustraire aux forces à courte et moyenne portée.

#### II.2.1.2. Coefficient de frottement et usure

Un système tribologique ou tribosystème est constitué de deux antagonistes (1<sup>er</sup> et 2<sup>ème</sup> corps) qui frottent l'un sur l'autre. De façon quantitative, on caractérise généralement les phénomènes tribologiques par deux paramètres:

- Le coefficient de frottement  $\mu$ : défini par le rapport entre l'effort tangentiel  $F_T$  s'établissant au cours du frottement et l'effort normal  $F_N$  appliqué.

$$\mu = \text{Force tangentielle} / \text{Force normale} = F_T / F_N$$

Ce coefficient permet de quantifier la quantité d'énergie dissipée dans le système.

Plus le coefficient de frottement est élevé, plus l'énergie dissipée est importante.

L'usure, se traduit par la détérioration des surfaces en contact. Elle peut être douce quand le dommage se localise aux couches superficielles (détachement à l'échelle cristalline des atomes ou des ions du réseau). Elle peut être sévère quand elle entraîne une perte de matière hors du tribosystème avec, par exemple, des arrachements de grain ou des fissurations. L'usure est généralement quantifiée par un taux d'usure défini comme le volume usé par unité de longueur parcourue et par unité de charge. Il est souvent relié à la propagation des fissures [2].

### II.2.1.3. Frottement- Energie- Usure

La manière la plus immédiate d'aborder les problèmes tribologiques consiste à les décrire d'un point de vue mécanique. Après la mise en contact des surfaces des deux échantillons, on définit une force normale  $F_N$  qui entraîne une déformation élastique ou plastique des solides, donc un champ de contraintes. Lors du mouvement il faut pouvoir déplacer les deux corps l'un par rapport à l'autre. Il est donc nécessaire de communiquer une quantité d'énergie au système qui induit une force interfaciale  $F_T$  liée à l'existence du frottement. Une partie de l'énergie introduite dans le système par l'action de l'effort tangentiel est dissipée partiellement sous forme de ruptures de liaisons, création de défauts ponctuels (site de piégeage) et étendus (dislocation), de chaleur etc....

### II.2.1.4. Particularité du frottement des matériaux isolants

Dans le cas des isolants nous avons vu qu'il existe des sites de piégeage de charges et des mouvements de ces charges électriques. Ceci aboutit à la création d'une charge d'espace et par conséquent à une polarisation du milieu diélectrique. Une partie de l'énergie de frottement peut donc être stockée sous forme " d'énergie de polarisation ". Cette polarisation apparaît sous l'effet d'un champ électrique.

### II.2.1.5. Usure des matériaux isolants

D'un point de vue énergétique, un système qui stocke de l'énergie possède un coefficient de frottement élevé car il est moins dissipatif. Or, d'après la physique des isolants chargés, le piégeage des charges est associé au stockage d'une énergie mécanique et de polarisation [3] ce qui est bien observé dans le cas d'un frottement saphir sur saphir [4]. Dans ce cas, le piégeage de charge et la polarisation du milieu diélectrique qui lui est associé correspond à une augmentation du coefficient de frottement. Donc le frottement génère à la fois de nouveaux pièges et provoque le piégeage des charges de façon continue. Si le champ total résultant est localement supérieur au champ critique de dépiégeage caractéristique des défauts, il entraîne alors le dépiégeage et l'écoulement des charges. La polarisation du milieu diminue et par conséquent le système doit relaxer une certaine énergie de polarisation, c'est à dire de nouveau stocker et dissiper. Dans ce cas, un régime stationnaire est

observé entre piégeage et dépiégeage. Le coefficient de frottement se stabilise autour d'une valeur caractéristique du milieu polarisé. On aboutit à un équilibre entre stockage et relaxation de polarisation.

Le dépiégeage massif des charges piégées aboutit à une dépolarisation brutale du milieu diélectrique: toute l'énergie associée à la polarisation permanente doit donc être relaxée brutalement. Compte tenu des valeurs de cette énergie [5], il est clair que cela va se traduire par une usure catastrophique. On voit ainsi l'analogie entre le mécanisme d'usure et le claquage diélectrique [6].

## II.2.2. Approche diélectrique

### II.2.2.1. Physique des isolants chargés

Dans le cas de la physique des isolants chargés, il faut étudier les sites de piégeages qui s'avèrent d'un intérêt tout particulier, car ils sont à l'origine de la présence d'une charge d'espace dans les isolants. Ces sites restent jusqu'à maintenant mal définis, en particulier pour les polymères.

Une approche macroscopique montre que la polarisation du matériau tend à diminuer le champ appliqué  $E_a$  en créant un champ  $E_{dip}$  proportionnel au moment dipolaire par unité de volume noté  $P$ :

Soit :

$$E = E_a + E_{dip}$$

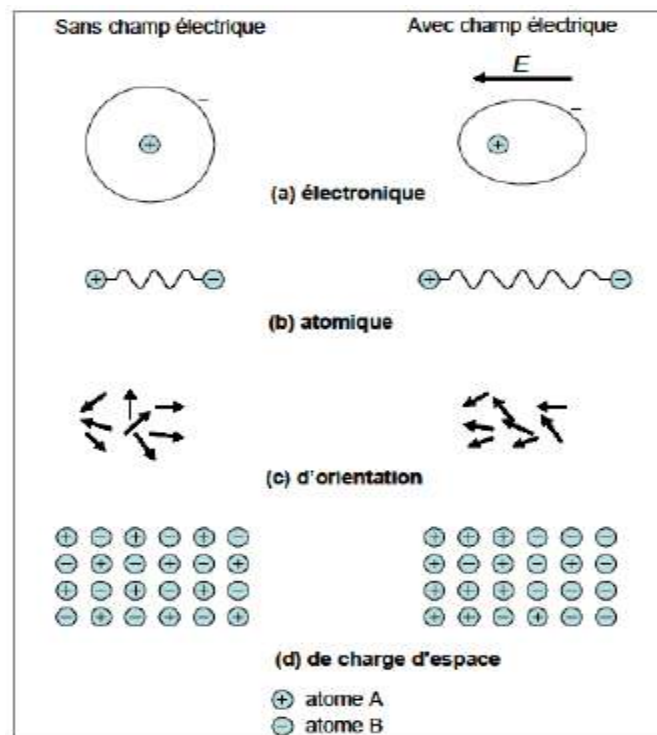
### II.2.2.2. Phénomènes de polarisation

Toute matière est composée d'atomes qui contiennent à leur tour des charges positives et négatives d'égale quantité. Lorsqu'un matériau est soumis à un champ électrique, venant d'une distribution de charge surfacique ou provenant d'un champ extérieur, ses molécules internes, composées de charges liées, se trouvent sous l'action d'une force électrique qui tend à les orienter dans la direction du champ. Ainsi, les charges négatives sont pausées dans le sens inverse au champ et les charges positives dans le même sens du champ de sorte que le matériau devient chargé positivement sur une face et négativement sur l'autre.

Dans les matériaux polaires, tels que le polyamide, le polychlorure de vinyle ou la résine époxy, des dipôles existent même en absence de champ. Ces dipôles résultent de la déformation du nuage électronique le long d'une liaison chimique dissymétrique. En l'absence de champ, ces dipôles sont en règle générale orientés aléatoirement, et par conséquent, la polarisation macroscopique est nulle. Sous l'effet d'un champ électrique appliqué, ces dipôles sont soumis à un couple qui tend à les orienter dans sa direction. La polarisation produite par l'orientation dipolaire étant importante, la permittivité des matériaux polaires est supérieure aux matériaux apolaires.

Dans les matériaux apolaires, tels que le polyéthylène ou le polycarbonate, il y a absence de dipôles lorsque le champ est nul. Les dipôles se forment suite à un champ appliqué par les phénomènes suivants: (i) la déformation des nuages électroniques autour des noyaux, se traduisant par le déplacement relatif des nuages dans le sens inverse par rapport au centre du noyau (positive), et donc inversement au champ ; (ii) la liaison ionique (exemple le NaCl) se déforme et mènent au déplacement des centres de charges comme précédemment.

On distingue quatre types de polarisation (figure II.1) [8-10] : électronique, atomique, d'orientation, dite de Debye, et interfaciale. Chacune de ces polarisations contribue à la valeur de la permittivité relative, les deux premières étant des polarisations de déformation.



**Figure II.1** : Représentation schématique des quatre types de polarisation

**Polarisation électronique** : quand un champ électrique constant est appliqué, le nuage électronique dans chaque atome est déplacé légèrement par rapport au noyau (figure II.1.a), donnant un dipôle induit.

**Polarisation atomique** : lorsque différents atomes sont présents dans une molécule ne possédant pas de moment dipolaire permanent, les électrons participant aux liaisons de covalence se déplacent préférentiellement vers l'atome le plus électronégatif, créant ainsi, sans contrainte extérieure, un moment de liaison (moment dipolaire induit). Si l'on superpose un champ électrique, les atomes se déplacent les uns par rapport aux autres, donnant naissance à une polarisation atomique (figure II.1.b) qui met en jeu le déplacement des atomes au sein de la molécule.

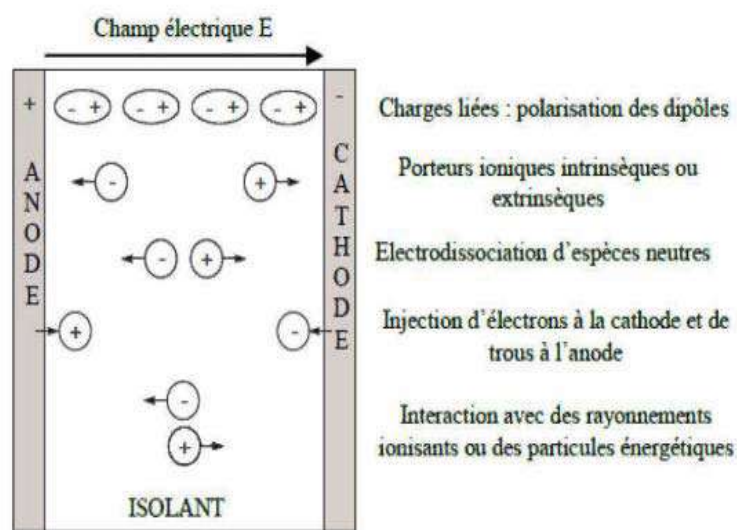
**Polarisation d'orientation ou polarisation de Debye:** Si la résultante des différents moments dipolaires est différente de zéro, la molécule possède un moment dipolaire permanent (figure II.1.c). Lorsqu'on applique un champ électrique, la molécule tend à s'orienter dans le sens du champ. C'est le phénomène de polarisation d'orientation, étudié par Debye, qui apparaît lorsqu'une molécule ou un groupement d'atomes possède un moment dipolaire permanent.

**Polarisation interfaciale ou de charge d'espace : effet Maxwell – Wagner – Sillars :** Ce type de polarisation apparaît dans les matériaux hétérogènes. Il provient de l'accumulation des charges aux interfaces des différentes phases constituant les matériaux (figure II.1.d) lorsque ces différentes phases ont des permittivités et des conductivités différentes. Ce type de polarisation est encore appelé effet Maxwell – Wagner – Sillars [10,11].

### II.2.2.3. Charges en mouvement dans les isolants

Les matériaux diélectriques réels contiennent un certain volume de charges libres. Ainsi, dans les diélectriques, on peut également observer une très légère conduction, détectable surtout à basses fréquences (figure II.2). Cette conduction est due aux mouvements des ions et des électrons. Leur origine peut être classée en deux catégories :

- **Les charges intrinsèques:** sont des ions contenus initialement dans l'isolant ou générés soit par électro dissociation d'espèces neutres, soit par ionisation des constituants du solide par interactions avec des rayonnements énergétiques ou des particules.
- **Les charges extrinsèques:** sont des électrons, des trous ou des ions injectés à partir des électrodes métalliques vers l'isolant sous l'action d'un champ électrique [7].



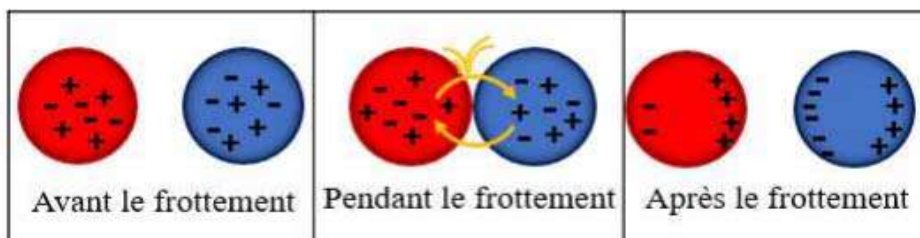
**Figure II.2:** Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique



### II.3. Chargement par effet triboélectrique

#### II.3.1. Description

La triboélectricité – du grec « tribein » qui signifie frotter – désigne le phénomène électrostatique par lequel un transfert de charges électriques est créé lorsque deux matériaux de nature différente sont mis en contact. Quand deux matériaux électriquement neutres se frottent l'un à l'autre, des charges électriques sont transférées au niveau surfacique de l'un vers l'autre, dans un même sens, il en résulte l'obtention de deux matériaux différemment chargés. La charge statique ainsi acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, elle persiste donc même après rupture du contact, et de nouveaux contacts auront pour effet de produire d'autres transferts [12-15], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés (Figure II.3). C'est le mécanisme physique le plus utilisé pour charger des matériaux granulaires ou micronisés plastiques en vue de leur séparation dans un champ électrique intense.



*Figure II.3: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps ; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.*

#### II.3.2. Série triboélectrique

Afin de prédire la polarité des matériaux chargés par contact, un classement des matériaux, est appelé « série triboélectrique » a été établi sur la base des expériences. Selon les observations, il était évident que la polarité de la charge était tributaire des propriétés du matériau [16]. Shaw a déterminé expérimentalement la première série triboélectrique en 1917.

Il a mesuré la charge sur les surfaces des divers matériaux chargés par le frottement en utilisant un électroscope [17]. Ce classement a permis de ranger les matériaux ayant la charge la plus positive jusqu'aux matériaux les plus négatifs. Plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre dans la liste triboélectrique, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée.

A travers les années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies. Le Tableau II.1 montre des séries triboélectriques étudiées par des différentes méthodes. Il apparaît du tableau qu'il n'y a aucune série triboélectrique universelle. Ceci est dû au fait que les conditions expérimentales varient d'une

expérience a l'autre. En plus, les additifs en plastiques commerciaux peuvent influencer les résultats de chargement et, en conséquence, sur le classement des matériaux dans la série [18].

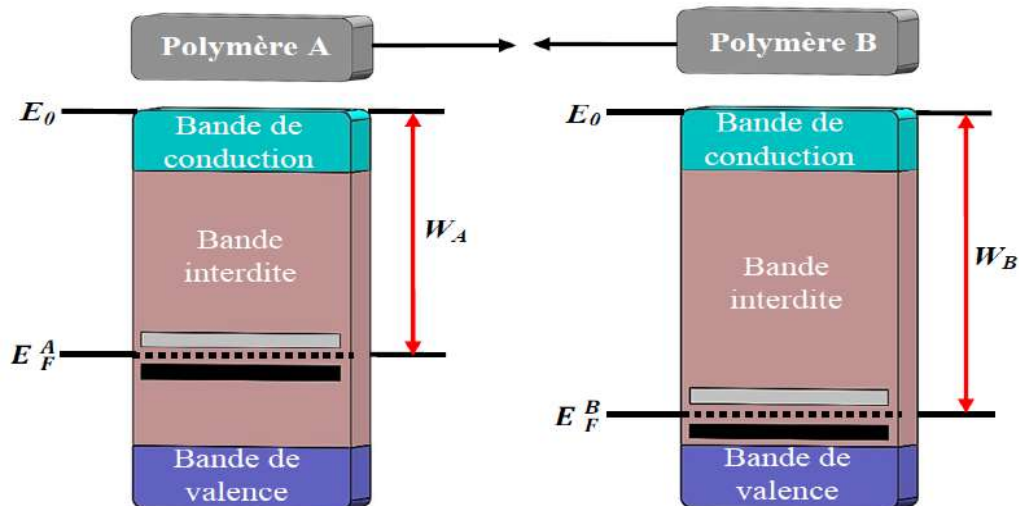
**Tableau II.1** : Différentes séries triboélectriques de plastiques issues de la littérature.

Réf. [18].	Réf. [19].	Réf. [20].	Réf. [21].	Réf. [22].
↑ (+) Charge positive				
PS	Nylon 6.6	Al	PMMA	PMMA
PE	PV OH	PMMA	ABS	GPPS
PP	PV Ac	PE	PET	ABS
PVC	PMMA	PET	Cu	Calibre
	PC	PP	HDPE	HIPS
	PS	PVC	PP	Rubber
	PI		PVC	PET
	PP		PTFE	HDPE
	PET			LDPE
	PVC			HOMOPP
				COPP
				PVC doux
				PVC dur
Charge positive ↓ (-)				

#### II.4. Mécanismes de chargement triboélectrique des isolants

La génération de charge électrostatique par contact est un phénomène basé sur la physique de surface des polymères [23, 24]. Dans un solide, les niveaux d'énergie permis sont confinés dans une bande dont la largeur, de l'ordre de l'électronvolt, dépend du cristal et du recouvrement des orbitales atomiques. Les solides ont une structure de bandes; on distingue les bandes d'énergie permises, et les bandes d'énergie interdites (Figure II.4). Les bandes d'énergie se remplissent selon la loi statistique de Fermi, les électrons occupent tous les niveaux d'énergie inférieure à l'énergie de Fermi, ou niveau de Fermi, sa valeur est caractéristique du cristal considéré. On met alors en évidence la bande de valence et la bande de conduction.

La modélisation des niveaux superficiels, qui explique le processus de triboélectrisation, est basée sur le transfert de charge entre les surfaces de contact et la présence des niveaux d'énergie dans la bande interdite des polymères. Les bandes noires situées au-dessous des niveaux Fermi représentent des niveaux d'énergie occupés tandis que les bandes grises, des niveaux d'énergie libres  $E_F^A$ ,  $E_F^B$  sont les niveaux Fermi superficiels et  $W_A$ ,  $W_B$  représentent le travail d'extraction superficiel de deux matériaux polymères [25].

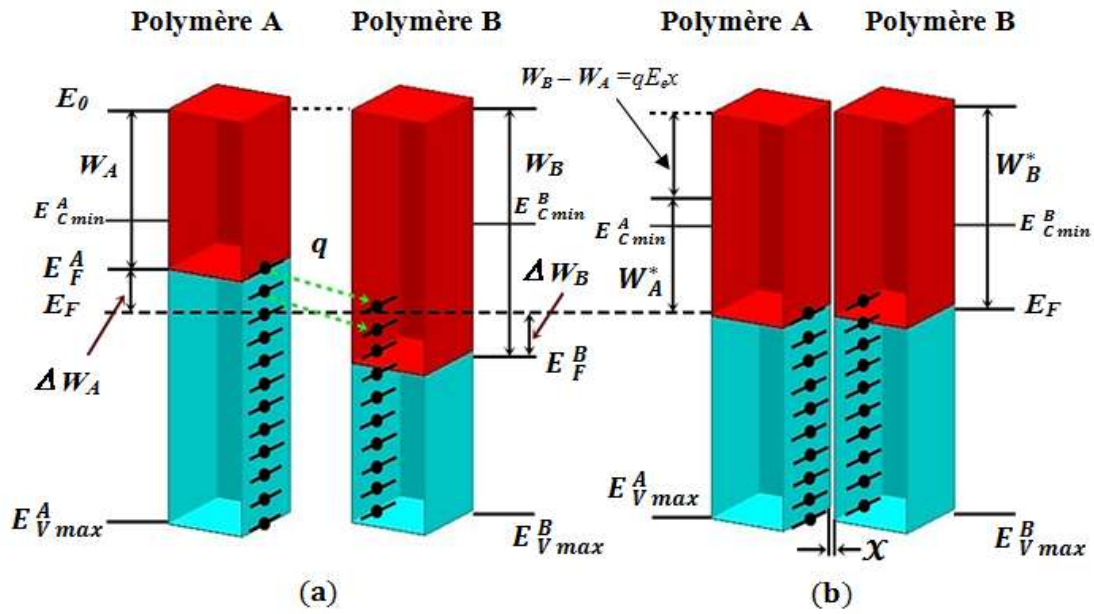


**Figure II.4 :** Modélisation des niveaux superficiels des polymères en triboélectrisation.

Quand deux matériaux isolants entrent en contact, des échanges d'électrons se produisent entre les différents niveaux d'énergie libres localisés à la surface des deux matériaux. Dans le même matériau, la théorie suppose que les électrons dans un état d'énergie élevée (les états occupés) ne sont pas capables de redescendre seuls, par transition, vers des niveaux plus bas en énergie (les états vides), même si cela est favorisé thermodynamiquement, en raison de la grande différence entre les énergies de deux niveaux qui sont très localisés à la surface du matériau. Ainsi, si deux matériaux isolants sont frottés l'un contre l'autre, il se produira un transfert d'électron à l'interface par effet tunnel d'un isolant à l'autre ou des états occupés de haute énergie rencontrent des états vides de basse énergie. Cet échange d'électrons permet aux deux matériaux de se rapprocher de l'équilibre thermodynamique [26].

La Figure II.5 montre le transfert d'électrons entre deux polymères isolants en contact jusqu'au moment où les niveaux Fermi s'égalisent.

Le polymère A est caractérisé par un travail d'extraction faible  $W_A$  se charge positivement par rapport au polymère B qui est caractérisé par un travail d'extraction  $W_B$ . Le processus de triboélectrisation prend fin par l'accumulation de la charge «  $q$  » à l'interface et par renforcement du champ électrique de contact  $E_C$  dans l'intervalle  $x$ , jusqu'à l'équilibre thermodynamique (les niveaux Fermi  $E_F^A$ ,  $E_F^B$  sont égaux).



**Figure II.5 :** Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux polymères de différentes matières par la théorie des niveaux superficiels de haute densité : (a) avant le contact ; (b) durant le contact [25].

Dans la nature, la matière est électriquement neutre. C'est-à-dire, les charges positives (des protons) sont égales aux charges négatives (des électrons). Du point de vue de la structure de matière, le processus de triboélectrification est généralement le responsable du transfert de charge entre les mêmes ou les différents matériaux [27].

L'électrification ou le chargement par contact est un phénomène mal compris, caractérisé par le transfert de charge à partir d'un matériau à l'autre quand ces deux matériaux sont mis en contact puis séparés. Pratiquement, il n'est pas habituellement facile de distinguer les procédés de chargement, et donc le terme "chargement triboélectrique" est employé dans un large sens [28]. La compréhension des mécanismes physiques de génération de charges par contact n'est pas totale, ils sont assez bien connus pour les interfaces métal/métal et métal/isolant [29, 30], mais ils restent généralement méconnus et complexes pour les interfaces isolant/isolant [31, 32].

Le transfert de charge peut se produire par des électrons, des ions ou par le transfert de matière [24, 28, 33]. Il n'est pas encore clair lequel de ces mécanismes de transfert de charge est le plus dominant.

**Conclusion**

Ce chapitre a permis de :

- Mettre en évidence deux approches générales qui décrivent le comportement diélectrique et tribologique des polymères isolants.
- La génération de charges par effet triboélectrique est un phénomène extrêmement complexe, qui peut influencer par plusieurs facteurs externes et internes.

## Références bibliographiques du chapitre II

- [1] S. Fayeulle, D. Tréheux, J. Bigarré, J. Vallayer, "Effect of space charge on the friction behavior of dielectrical materials", supplément à la revue *Le vide : science, technique et applications*, N° 275 , pp. 74-83, 1995.
- [2] A.G. Evans, In " The Sciences of Ceramic Machining and Surface Finishing II", Eds. *B.J.Hockey and R.W.Rice, National Bureau of Standards special Publication 562 (US Government Printing Office, Washington D.C)*, pp. 1-15, 1979
- [3] J. Bigarré, "Effet des impuretés sur la charge d'espace dans l'alumine. Application au frottement", *Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon* 1996.
- [4] B. Vallayer, "Développement d'une méthode de caractérisation des matériaux isolants: la méthode du miroir. Application à l'étude des propriétés de charge d'oxydes", *Thèse de l'Ecole Centrale de Lyon* 1995.
- [5] G. Blaise, and C. Le Gressus, "Charging and Flashover induced by surface polarization relaxation Process", *J.App.Phy. Vol. 69*, pp. 6334-6339, 1991.
- [6] Y. Berriche, J. Vallayer, R. Trabelsi, D. Tréheux, "Severe wear mechanisms in Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-AlON ceramic composite", *J. Eur. Ceram. Soc*, pp. 1311 -1318, 2000.
- [7] ELLOUMI Imen, "Caractérisation des propriétés diélectriques du bois et des composites bois-polymères", *Mémoire de la maîtrise en ingénierie, Université du Québec en Abitibi Témiscamingue, 2016*
- [8] R. Fournie, "Les isolants en électrotechnique, concepts et théories". Paris: Editions Eyrolles, 1986.
- [9] C. Menguy. "Mesure des caractéristiques des matériaux isolants solides", *Technique de l'ingénieur D 2310*.
- [10] J.-C. Dubois. "Propriétés diélectriques des plastiques", *Techniques de l'ingénieur AM 3140*.
- [11] M. Kachi, " Caractérisation et contrôle de l'état de charge des matériaux polymères granulaires ", *Thèse de Doctorat, université de Guelma* 2011.

- [12] Messal sarra, " Procèdes de separation electrostatique de materiaux pulverulents. applications au recyclage des dechets et dans l'industrie agro-alimentaire ", *Thèse de Doctorat, université de Poitiers 2016*
- [13] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, and L. Dascalescu, "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device", *J. Electrostat*, Vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [14] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, "Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation.", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 46, pp.1558 - 1563, 2010.
- [15] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, and L. Dascalescu, "Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids", *J. Electrostat*. Vol. 71, pp. 407-412, 2013.
- [16] Forward, K. M., Lacks, D. J., & Sankaran, R. M. "Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle Particle Interactions.", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48(5), pp. 2309-2314, 2008.
- [17] Shaw, P. E. "Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series.", *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 94(656), pp. 16-33, 1917.
- [18] Matsushita, Y., Mori, N., & Sometani, T. "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades.", *Electrical engineering in Japan*, vol. 127(3), pp. 33-40, 1999.
- [19] Diaz, A. F., & Felix-Navarro, R. M. "A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties ", *Journal of Electrostatics*, vol. 62(4), pp. 277-290, 2004.
- [20] Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L. "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device ", *Journal of Electrostatics*, vol. 63(6-10), pp. 937-942, 2005.
- [21] Park, C. H., Jeon, H. S., Cho, B. G., & Park, J. K. "Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire.", *Polymer Engineering & Science*, vol. 47(12), pp. 1975-1982, 2007.
- [22] Park, C. H., Park, J. K., Jeon, H. S., & Chun, B. C. "Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger " *Journal of Electrostatics*, vol. 66 (11-12), pp. 578-583, 2008.

- [23] Escalante, S. L., Touchard, G., & Dominguez, G. "Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes ", *In Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report Conference on. IEEE*, pp. 694-697, 2002.
- [24] McCarty, L. S., & Whitesides, G. M. "Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets.", *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47(12), pp. 2188-2207, 2008.
- [25] Călin, L. F. "Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé.", *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers*, 2008.
- [26] Hammi, T. "Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles ", *Thèse de Doctorat, Université de Lille 1*, 2005.
- [27] Wei, W., & Gu, Z. "Electrification of particulate entrained fluid flows—mechanisms, applications, and numerical methodology ", *Physics Reports*, vol. 600, pp. 1-53, 2015.
- [28] Zhu, G., Chen, J., Liu, Y., Bai, P., Zhou, Y. S., Jing, Q., ... & Wang, Z. L. "Linear-grating triboelectric generator based on sliding electrification.", *Nano letters*, vol. 13(5), pp. 2282-2289, 2013.
- [29] Greason, W. D. "Investigation of a test methodology for triboelectrification.", *In Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, vol. 1999, pp. 344-351. *IEEE*, 1999.
- [30] Brennan, W. J., Lowell, J., O'Neill, M. C., & Wilson, M. P. W. "Contact electrification: the charge penetration depth.", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 25(10), pp. 1513, 1992.
- [31] Davies, D. K. "Charge generation on dielectric surfaces.", *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2(11), pp. 1533, 1969.
- [32] Bailey, A. G. "The charging of insulator surfaces.", *Journal of Electrostatics*, vol. 51, pp. 82-90, 2001.
- [33] Lowell, J., & Rose-Innes, A. C. "Contact electrification.", *Advances in Physics*, vol. 29(6), pp. 947-1023, 1980.



# CHAPITRE III

### III.1. Introduction

De nombreux secteurs industriels sont touchés par des problèmes liés aux phénomènes électrostatiques là où des matériaux isolants sont susceptibles d'acquérir des charges électrostatiques. Il devient dès lors très important de pouvoir contrôler ces charges en procédant à leur élimination ou au moins d'en réduire la quantité à des niveaux non gênants. A cet égard, on a besoin de comprendre l'évolution de ces charges au cours du temps, le processus de conduction, la nature et la migration des charges sur la surface de l'isolant, la caractérisation des isolants, pour la prévention des risques catastrophique.

Nous présenterons dans ce chapitre la technique expérimentale utilisée dans cette étude pour la caractérisation des propriétés électriques des cheveux naturel. Dans un premier temps, nous présenterons les matériaux d'étude et la procédure de mise en œuvre. Ce chapitre s'achèvera sur la présentation et la description du banc de mesures, et différents résultats expérimentaux obtenus.

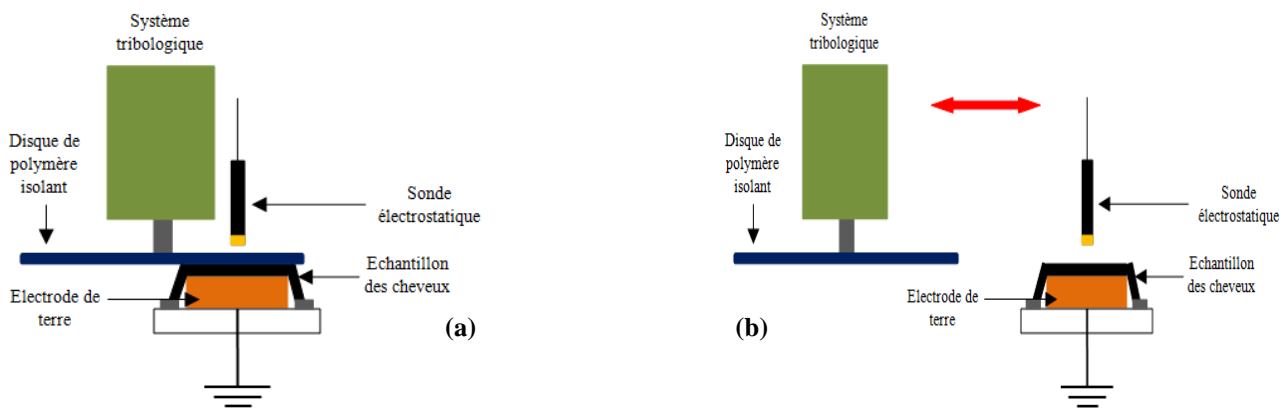
### III.2. Approche expérimentale

La technique de déclin de potentiel de surface (DPS) est une méthode d'investigation des propriétés électriques des matériaux isolants. Son intérêt réside essentiellement dans sa simplicité et sa puissance dans la caractérisation de l'aptitude d'un matériau à évacuer une charge électrique déposée à sa surface.

Le principe de la méthode du DPS est de suivre en fonction du temps l'évolution du potentiel de surface d'un échantillon chargé préalablement. La mesure du potentiel en surface de l'échantillon au cours du temps à partir d'une sonde électrostatique à condensateur vibrant permet de fournir des informations sur le mode d'écoulement (surfacique et/ou volumique) des charges déposées et sur la mobilité de ces charges [1,2].

La technique du DPS comprend pour son fonctionnement deux phases principales:

1. Une phase de chargement par un système tribologique (figure 1.a)
2. Une phase de mesure de potentiel en surface qui se fait sans aucun contact avec par une sonde électrostatique (figure 1.b).



**Figure III.1:** Représentation schématique (a) position de chargement (b) position de mesure de potentiel de surface sans contact

### III.3. Procédure expérimentale

L'échantillon nettoyé de la peau de chèvre (Figure 2) est fixé sur une électrode métallique reliée à la terre (50 mm x 25 mm x 9 mm en cuivre) et placé sur un système de suspension pour assurer un contact conforme entre le matériau isolant glissant et l'échantillon de la peau de chèvre (Figure 3). Les matériaux isolants glissants (forme de disque de 60 mm de diamètre) sont fixés à un dispositif de tribochargement qui peut tourner à une vitesse rotationnelle de 4 tour/s.

Le dispositif est porté par une tige qui ne peut se déplacer que dans le sens horizontal et qui superpose le matériau isolant en contact conforme avec l'échantillon de peau de chèvre. Juste après le cycle de chargement (la phase de chargement), le système tribologique s'éloigne en permettant la sonde électrostatique de relever le potentiel de surface (figure 1.b).

Les mesures du potentiel de surface ont été mesurées avec la sonde Monroe d'un voltmètre électrostatique (TREK, modèle 347) connecté à un PC. L'acquisition (NI 9221) et le traitement des données expérimentales ont été réalisés à l'aide d'un instrument virtuel développé dans l'environnement Dasylab (Figure 4).



**Figure III.2:** Photographie d'échantillon de la peau de chèvre utilisé : (a) côté poilu, (b) côté non poilu

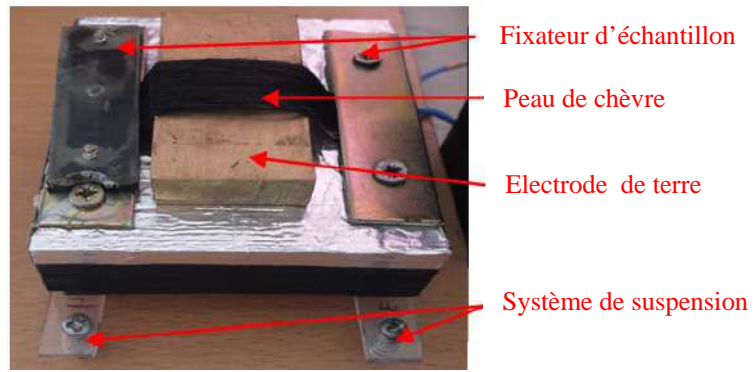


Figure III.3: Photographie de l'électrode mise à la terre avec le système de suspension

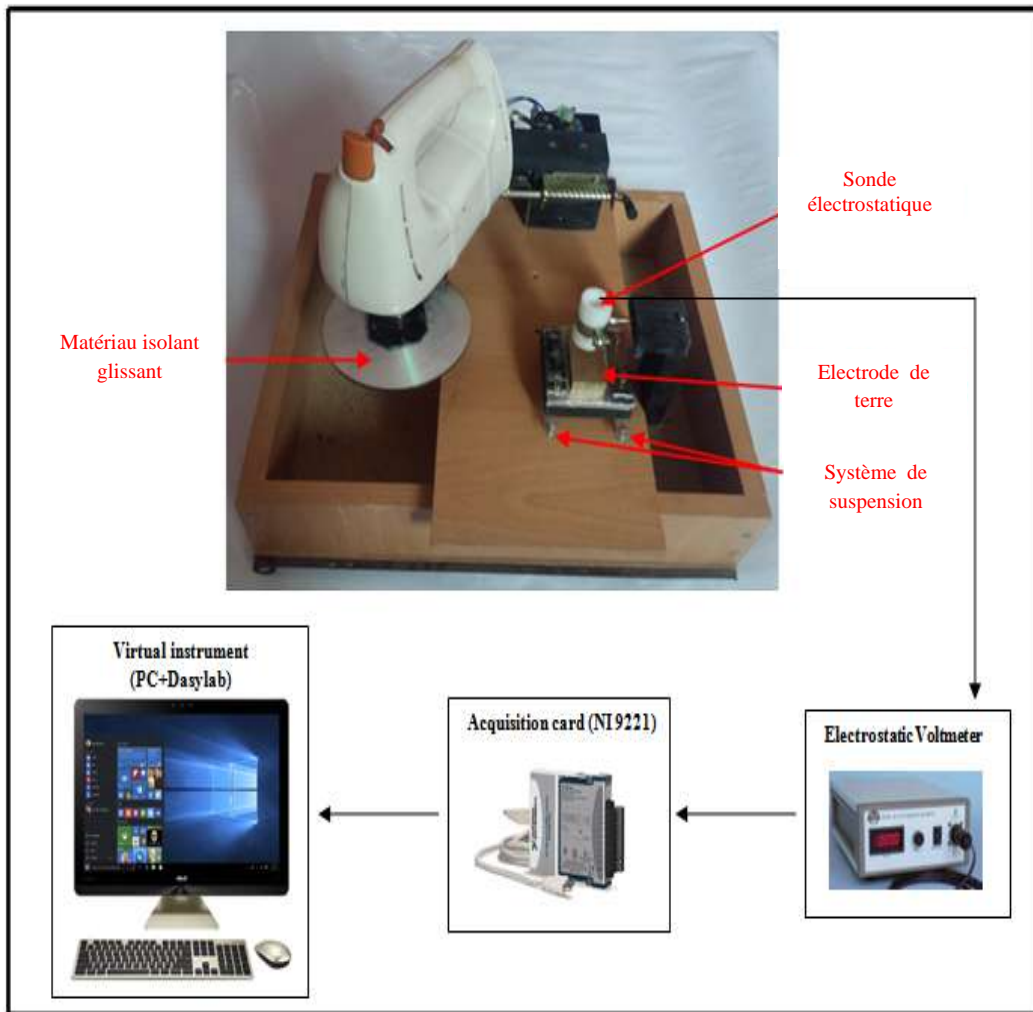


Figure III.4: Dispositif expérimental de caractérisation des échantillons de la peau de chèvre par la mesure de potentiel de surface installé à laboratoire de génie électrique de Guelma (LGEG)

### III.4. Résultats expérimentaux

Dans cette partie, nous présenterons des mesures de DPS en montrant l'effet de certains paramètres et conditions sur le niveau de la charge triboélectrique acquise par les cheveux de chèvre. Les mesures ont été effectuées moyennant le dispositif de la figure III.4, à l'air ambiant (l'humidité relative : 56 à 62 % et la température  $T=20$  à  $24$  °C).

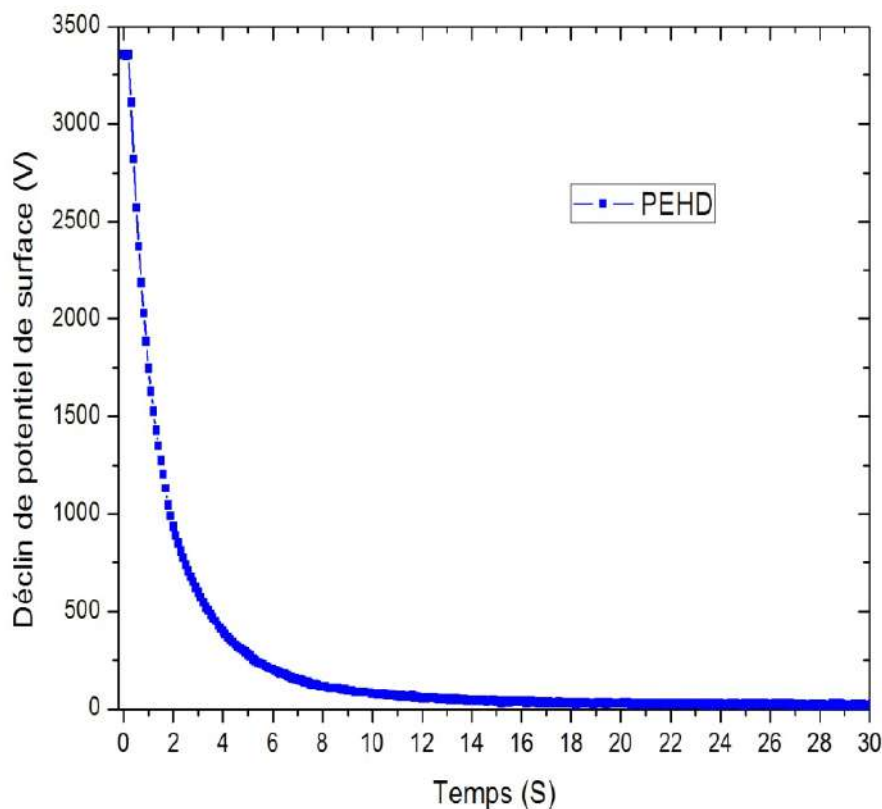
**Remarque** : l'analyse spectrale des brosses et peignes qui se trouve dans le marché algérien sont constitués principalement du polyéthylène haut densité (PEHD)



**Figure III.5:** *photographie des échantillons du peigne et brosse des cheveux*

### III.4.1. L'influence de PEHD

La figure III.6, présente l'évolution de la charge triboélectrique acquise par les cheveux sec de chèvre frotté contre le polyéthylène haut densité (PEHD) pendant une seconde.

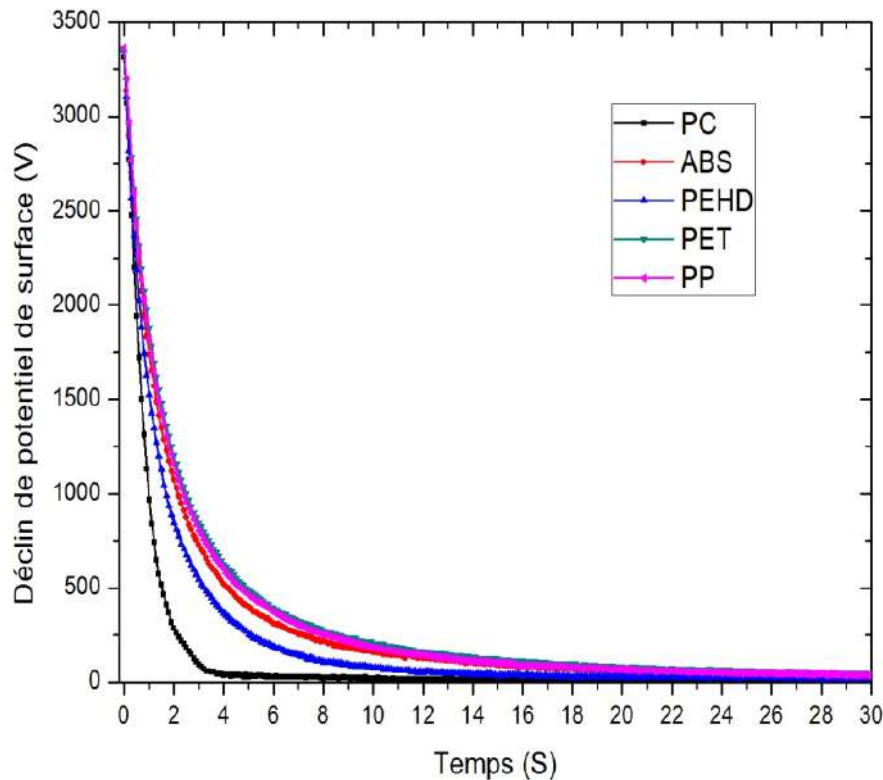


**Figure III.6:** Evolution de la charge triboélectrique sur la surface des cheveux secs de chèvre

On observe que le niveau de potentiel de surface de signe positive enregistré sur des cheveux secs de cheve est très important, ou ce potentiel atteint jusqu'à 3400V. Dès aux premiers moments, on voit clairement un effondrement de potentiel de surface en quelques seconde. Plusieurs phénomènes peuvent agir sur l'évolution de la charge triboélectrique acquise par les cheveux, leur distinction est parfois complexe à cause de la morphologie des cheveux.

### III.4.2. L'influence de la nature du matériau isolant

La figure suivante monte l'influence de différents matériaux isolants sur la génération des charges triboélectriques sur la surface des cheveux secs de chèvre.

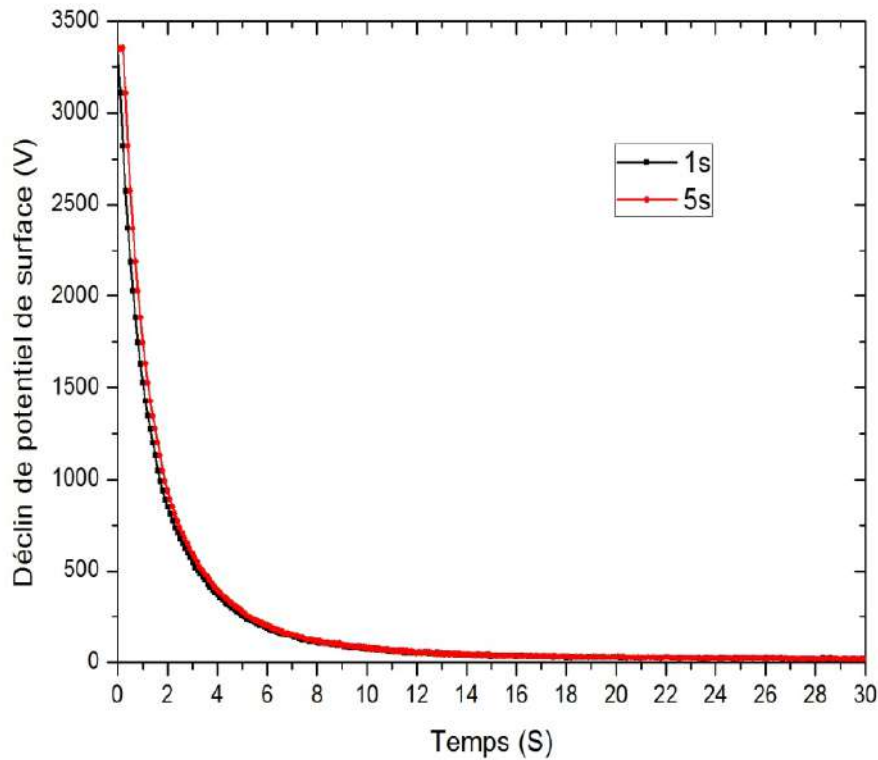


**Figure III.7:** Evolution de la charge triboélectrique des cheveux secs en fonction de différents matériaux isolants

On observe que la charge triboélectrique générée sur des cheveux secs traités sous les mêmes conditions par différents matériaux est de signe positif et avec la même amplitude, ces charges se disparaissent rapidement dans quelques secondes, notamment avec le polycarbonate (PC) ou la charge disparaît complètement dans les quatre premières seconde. Ce résultat inspire que la kératine qui constitué la couche externe du poil se situe à la proximité de la limite positive de la série triboélectrique [3].

### III.4.3. L'influence du temps de traitement

La figure III.8, présente la courbe de déclin de potentiel de surface d'un échantillon des cheveux secs de chèvre frotté contre le PEHD pour deux cycles différents de frottement ( $t=1s$  et  $t=5s$ ).



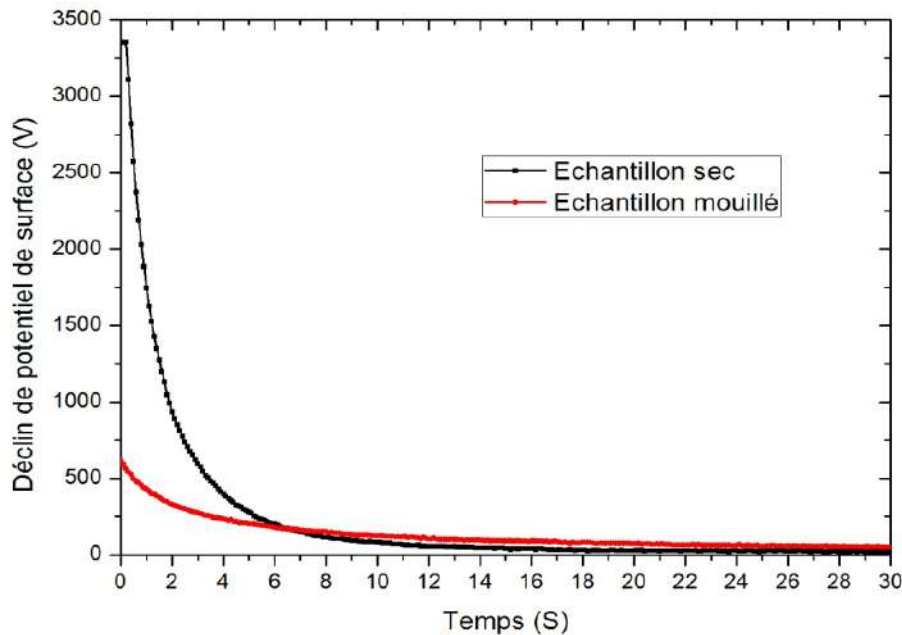
**Figure III.8:** Evolution de la charge triboélectrique des cheveux secs en fonction de différent temps du traitement

La figure III.8 montre une évolution quasi identique de déclin de potentiel de surface avec le meme niveau de la charge triboélectrique générée, cela signifié que le temps de traitement n'a aucune influence sur le niveau et l'évolution de la charge triboélectrique, on peut explique cette saturation à l'activation thermique liée à l'énergie dissipée dans le processus de frottement [4].



### III.4.4. L'influence de la mouillabilité

Pour monter l'influence de la présence de l'eau aux cheveux sur la génération des charges électriques pendant le processus de tribochargement, nous avons traité deux échantillons des cheveux de chèvre, (un échantillon mouillé et l'autre sec). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure III.9.

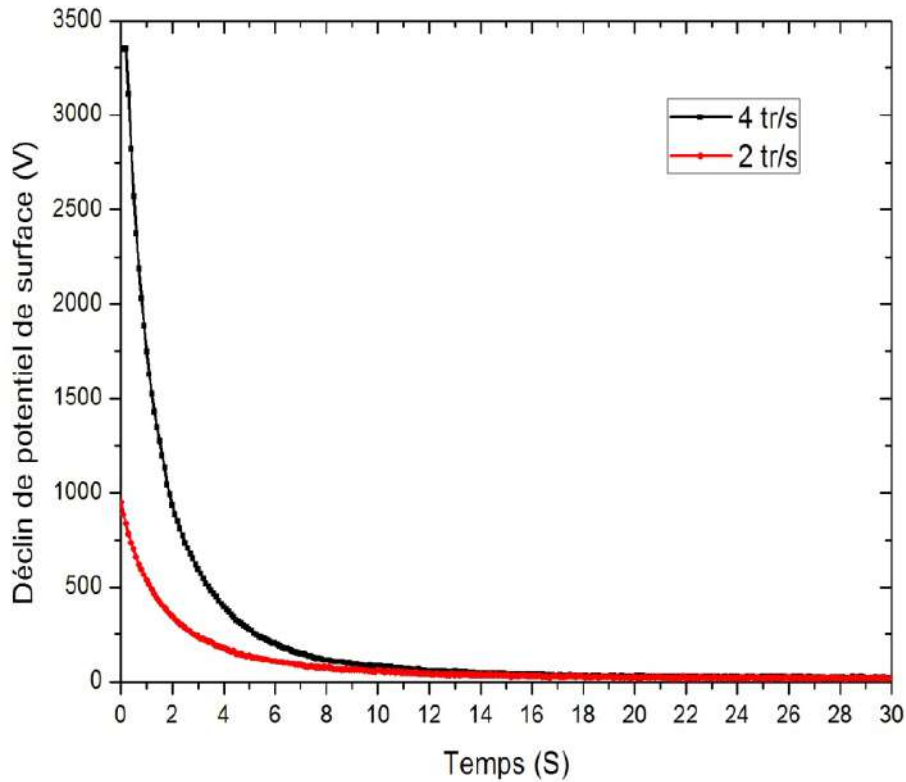


**Figure III.9:** Comparaison entre l'évolution de la charge triboélectrique générée sur des cheveux secs et des cheveux mouillés

On voit clairement que la charge triboélectrique acquise par des cheveux humidifiés elle est moins importante que des cheveux secs, Différents travaux de recherches indiquent que le niveau de la charge diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Le comportement de chargement et déchargement des polymères isolants pourrait être expliqué par la formation d'une couche de l'eau sur la surface du matériau. En effet, des cheveux humidifiés offre un nombre élevé de molécules d'eau ce qui peut introduire plus d'ions dans les systèmes et diminuer la résistivité de surface [5].

### III.4.5. L'influence de la vitesse de frottement

Dans cette expérience, nous avons frotté l'échantillon des cheveux par le même matériau (PEHD) avec des vitesses différentes sous les mêmes conditions, les résultats obtenus sont représentés par la figure III.10



**Figure III.10:** L'évolution de la charge triboélectrique générée sur des cheveux secs en fonction de la vitesse de frottement

D'après les courbes représentées sur la figure III.10, on remarque que la vitesse de frottement a une influence significative, il semble clairement que le niveau de la charge triboélectrique générée avec une vitesse de 2 tr/s est moins importante qu'à la vitesse de 4 tr/s, on peut expliquer cette différence à la surface de contact réduite pendant le frottement du matériau glissant contre les cheveux avec des faibles vitesses [6].

## Conclusion générale

Le but de notre travail de ce mémoire est d'évaluer le niveau des charges triboélectriques générées pendant le redressement des cheveux avec des brosses qui sont fabriqués en polymères isolants en espérant de pouvoir limiter ou réduire la quantité de ces charges triboélectriques indésirables à des niveaux non gênants. Les résultats expérimentaux obtenus au fil de cette étude nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

La majorité des brosses et des peignes construites des polymères isolants dans le marché algérien qui est destiné au redressement des cheveux humain génèrent une quantité considérable de la charge électrique qui peut causer de risque pour la santé de l'utilisateur

Le redressement des cheveux humide avec des brosses en polymères isolants permet de limiter le niveau de la charge triboélectrique générée pendant le processus à des niveaux bas relativement aux cheveux secs.

Le brossage en douceur des cheveux humain est une opération efficace qui permet de réduire le niveau de la charge triboélectrique.

## Références bibliographiques du chapitre III

- [1] K. Rouagdia, L. Herous, M. Nemamcha, L. Dascalescu, A. Fatihou, B. Tabti, " Experimental modeling of the electric potential decay at the surface of polypropylene films (PP) ", *Journal of Electrostatics*, vol.76, pp. 262-267, 2015.
- [2] K. Rouagdia, M. Nemamcha, L. Herous, "Analyse de la dynamique des charges électriques à la surface des polymères isolants, " 2<sup>ème</sup> CIMGLE, Oran, Algérie, 2012.
- [3] C. A. Lunn, R.E. Evans, "The electrostatic properties of human hair", *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 28 pp.549–569, 1977
- [4] T. Zegloul, L. Dascalescu, K. Rouagdia, A. Fatihou, P. Renoux, D. Souchet, "Sliding conformal contact tribocharging of polymeric materials", *IEEE Tran. Ind. Appl. Vol. 52*, pp.1808-1813, 2016
- [5] Németh, E., Albrecht, V., Schubert, G., & Simon, F. "Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity." *Journal of Electrostatics*, vol. 58(1-2), p. 3-16, 2003.
- [6] Yopa Eka Prawatya, "Multivariate optimisation and statistical process control of polymer triboelectric charging", *Thèse de Doctorat, Université de Poitiers* , 2018.