

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf: 0982/2018



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: FARDJAOUI Roqiya

Thème

**Neutralisation des charges sur la surface des isolants:
Application sur les cheveux**

Soutenu publiquement, le **25 Juin 2018**, devant le jury composé de:

M. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. KACHI Miloud	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
Mme. MOUSSAOUI Aida	Doctorante	Univ. Guelma	Co-Encadreur
M. FERAGA Chams-Eddine	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. GOUAIDIA Said	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2017/2018

18/3801

Remerciement

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de Génie Eclectique de Guelma (LGEG) à l'université de Guelma Algérie, il est le fruit de tant d'années d'étude.

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur **Kachi Miloud** et à la doctorante **Moussaoui Aïda** qui m'ont fait l'honneur de diriger ce travail, aussi pour leur disponibilité, leur passion, leur patience et toute l'attention qu'ils m'ont accordée le long de la réalisation de ce travail. Qu'ils trouvent dans l'aboutissement de ce travail le témoignage de ma profonde gratitude.*

Il me donne l'occasion de remercier tous les enseignants de notre département de Génie Electrotechnique et Automatique ayant participé d'une manière ou d'une autre à ma formation. Finalement nous souhaitons exprimer notre gratitude envers les membres du jury.

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A mes chers parents ma mère et mon père
pour leur patience, leur amour, leur soutien et
leurs encouragements*

A mes sœurs : Nor El Houda et Assia

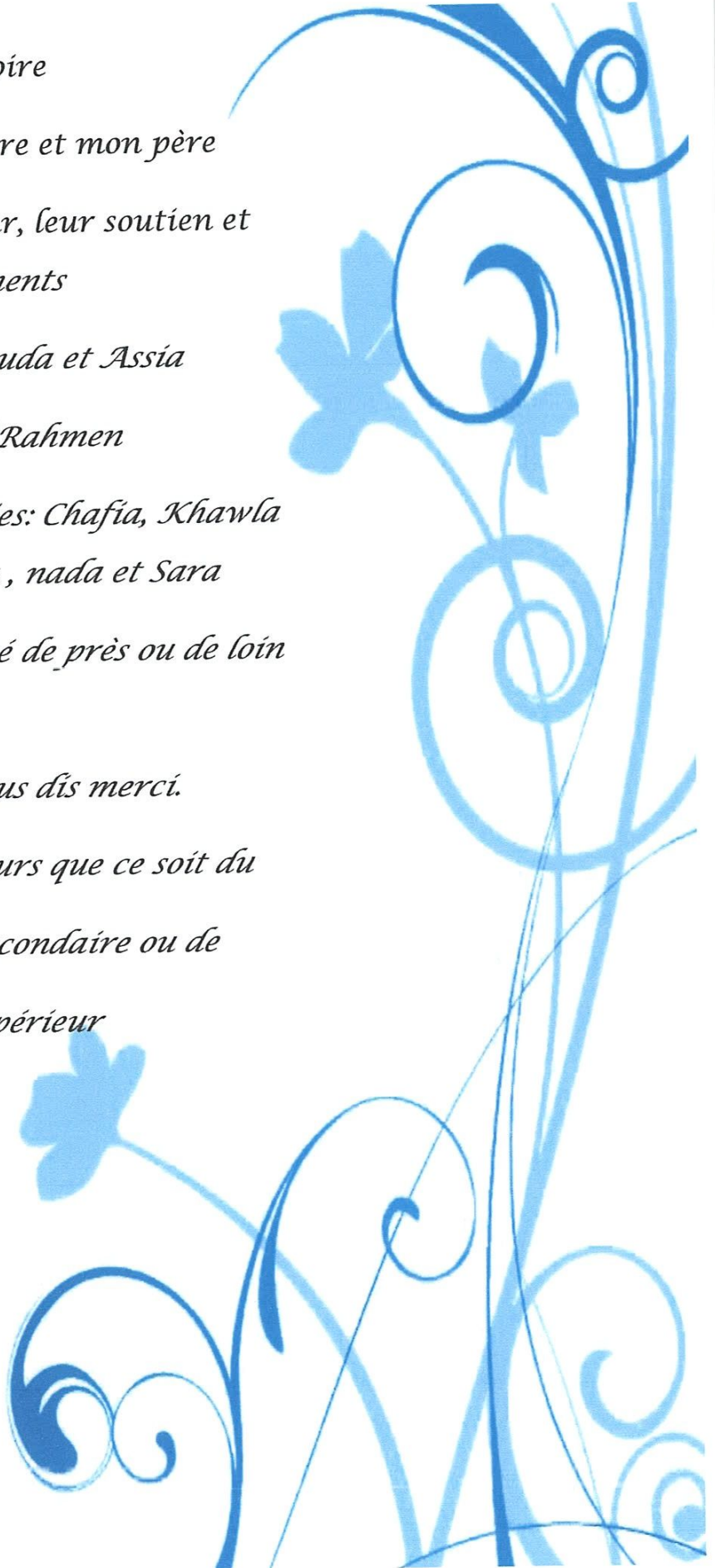
A mon frère: Abd el Rahmen

*toute ma famille, et mes amies: Chafia, Khawla
,Loubna, Semesem , Rahma , nada et Sara
à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
pour que ce*

projet soit possible, je vous dis merci.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du
Primaire, du moyen, du secondaire ou de
L'enseignement supérieur*

FARJAOUI Rokaia



Liste des figures

- Figure I.1:** Représentation schématique d'un type des polymères
- Figure I.2:** Classification des architectures macromoléculaires
- Figure I.3:** Polarisation électronique
- Figure I.4:** Polarisation atomique
- Figure I.5:** Polarisation inter faciale
- Figure I.6:** Polarisation dipolaire
- Figure I.7:** Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique
- Figure I.8:** Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.
- Figure I.9:** Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique
- Figure I.10:** Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)
- Figure I.11:** Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)
- Figure I.12 :** Caractéristique courant- tension alimentée par une tension continue
- Figure I.13:** Configuration pointe-plan pour le dépôt de charges
- Figure I.14:** Descriptif de la décharge couronne négative
- Figure I.15:** Descriptif de la décharge couronne positive
- Figure I.16:** Configuration classique d'une DBD
- Figure I.17:** Schéma de principe d'une décharge à barrière diélectrique
- Figure I.18:** Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD)
- Figure I.19:** Schéma de la décharge surfacique
- Figure I.20:** phénomène de l'électrostatique des cheveux

Figure II.1: Structure d'un atome

Figure II.2: Structure d'un atome: (a) atome nette équilibré charge zéro, (b) déficit d'électrons charge positive nette, (c) excès d'électrons charge négative nette

Figure II.3: Neutralisation par mise à la terre

Figure II.4: Types de neutralisants actifs (a) charges entraînées par le champ, (b) charges entraînées par un flux d'air

Figure II.5: Ioniseur passif

Figure II.6: Ionisation par rayonnement alpha

Figure II.7: Principe de la neutralisation par décharge couronne

Figure III.1: Matériaux utilisé dans cette étude(a) cheveux naturels, (b) un postiche noir, (c) Extension, (d) film PVC.

Figure III.2: Représentation schématique de la configuration du chargement et neutralisation des matériaux

Figure III.3: Matériel de coiffure utilisé dans cette étude

Figure III.4: Schéma du montage du système de neutralisation

Figure III.5: Courbes de déclin potentiel à la surface de: cheveux naturels, extension, postiche, film de PVC

Figure III.6: Variation du potentiel de surface en fonction du temps pour: cheveux et film de PVC chargé avec un séchoir

Figure III.8: Variation de potentiel de surface en fonction du nombre de balayage

Figure III.9: Taux de neutralisation en fonction de la tension

Figure III.10: Taux de neutralisation en fonction de la tension

Figure III.11: Schéma du montage du système d'acquisition

Figure III.12: Potentiel de la plaque généré par séchoir

Figure III.13: Acquisition par séchoir du test discontinu

Liste des tableaux

Tableau I.1: Applications courantes de quelques polymères

Tableau III.1: Cheveux chargé par séchoir seul

Tableau III.2: PVC chargé par séchoir seul

Tableau III.3: Cheveux chargé par brosse seul

Tableau III.4: Cheveux chargé par séchoir (Philips) et brosse

Tableau III.5: Cheveux chargé par séchoir (Sonashi) et brosse

Tableau III.6: Cheveux chargé par séchoir (Selecline) et brosse

Tableau III.7: Taux de neutralisation pour différentes tensions

Tableau III.8: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 10s

Tableau III.9: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 20s

Tableau III.10: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 30s

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre 1: Etat de l'art	
I.1. Problèmes d'électrostatiques.....	3
I.1.1. Les nuisances techniques.....	3
I.1.2. Cas du textile.....	4
I.2. Généralités sur les polymères.....	4
I.2.1. Définition d'un polymère.....	5
I.2.2. Différentes classes de polymères.....	5
I.2.3. Applications des polymères.....	8
I.3. Propriétés diélectriques des polymères.....	10
I.3.1. La polarisation.....	11
I.3.1.1. Polarisation électronique.....	11
I.3.1.2. Polarisation atomique (ionique).....	11
I.3.1.3. Polarisation interfaciale.....	12
I.3.1.4. Polarisation dipolaire ou d'orientation (Debye).....	13
I.3.2. La conduction.....	13
I.4. Mécanismes d'apparition de charge.....	14
I.4.1. Phénomène d'électrisation.....	14
I.4.1.1. L'effet triboélectrique.....	15
I.4.1.2. L'influence ou induction.....	16
I.4.2. La décharge électrique.....	18
I.4.2.1. La décharge couronne.....	19
I.4.2.1.1. Différents systèmes d'électrodes.....	20
I.4.2.1.2. Décharge couronne négative.....	20
I.4.2.1.3. Décharge couronne positives.....	21
I.4.2.1.4. Décharge en régime alternatif.....	22
I.4.2.1.5. Applications de la décharge couronne.....	22
I.4.2.2. La Décharge a Barrière Diélectrique (DBD).....	23
I.4.2.2.1. Définition et caractéristique d'une DBD.....	23
I.4.2.2.2. Principe de la décharge à barrière diélectrique.....	24
I.4.2.2.3. Configurations typiques.....	26
I.4.2.2.4. Les différents régimes de décharges à barrière diélectrique.....	27
I.4.2.2.5. Applications industrielles des décharges à barrière diélectrique.....	29
I.5. La problématique: Electrostatique des cheveux.....	30

CHAPITRE II: Techniques de neutralisation

II.1. Introduction.....	31
II.2. Techniques de neutralisation	32
II.2.1. Mise à la terre et liaison	33
II.2.1.1. But de liaison et de mise à la terre.....	34
II.2.1.1. Résistance au sol	34
II.2.2. Contrôle de la relaxation de charge	34
II.2.2.1. Augmentation de la conductivité.....	34
II.2.2.2. Effet d'augmenté l'humidité	35
II.2.2.3. Les neutralisants de la charge.....	35
II.2.2.3.1. Neutralisants statique actifs	36
II.2.2.3.2. Neutralisants statiques passifs	36
II.2.2.3.3. Neutralisants statiques nucléaires	37
II.3. Neutralisation par décharge couronne.....	38

CHAPITRE III: Neutralisation des cheveux

III.1. Introduction	41
III.2. Matériaux étudiés et méthodes expérimentales.....	41
III.2.1. Description.....	41
III.2.2. Système de chargement	43
III.2.3. Système de neutralisation	44
III.3. Résultats et discussion	45
III.3.1. Caractérisation des matériaux	45
III.3.2. Identification des mécanismes de génération des charges sur les cheveux	47
III.4. Neutralisation des charges	52
III.4.1. Influence de la tension.....	52
Conclusion générale	57
Bibliographie.....	58



Introduction générale



Introduction générale

La découverte de l'électricité statique a été faite au temps des Grecs. Les Grecs constatent qu'en tentant d'enlever la poussière sur certains objets avec un chiffon, celle-ci est encore plus attirée. Par la suite, ils découvrent une des propriétés de l'ambre (résine fossilisée), qui une fois frottée, peut attirer des petits objets légers comme des plumes ou des petits morceaux de papier. Les Grecs vont donc nommer cette propriété « électricité » (en grec: « Elektron »), qui signifie « ambre ».

L'électricité statique, à travers le chargement des matériaux isolants, présente aujourd'hui l'une des technologies innovante utilisée dans beaucoup d'applications. Grâce au maîtrise des charges électriques, des applications comme les appareils de la photocopie ou xérogaphique, les filtres électrostatiques ou même les séparateurs électrostatiques ont pu être développés. Cependant, malgré tous ces avantages l'électricité statique peut être gênante voire même dangereuse, que ce soit dans les foyers ou dans les industries. En effet, elle peut conduire au mauvais fonctionnement, à la détérioration d'équipements sur le long terme, ou, dans les cas à risque à des explosions. Les « décharges électriques » par frottement de tissus sont l'une des premières sources d'inflammation en zone à risque d'explosion comme par exemple dans l'agro-alimentaire, la chimie, la pharmacie, l'industrie du bois, la sidérurgie...etc. Par ailleurs, concernant la santé, l'électricité statique peut causer du stress, une augmentation artérielle ou des crampes nocturnes. Afin de contrer ces risques, des méthodes, des matériaux antistatiques et des essais d'évaluation du risque ont été développés et sont toujours en développement.

Parmi les différentes façons de contrôler les charges d'électricité statique, la plus simple consiste à mettre à la terre. Cependant, cette mise à la terre n'est pas toujours possible le cas des isolateurs ou des grands espaces ouverts. La solution standard pour neutraliser un isolant chargé est de l'exposer à des charges de vis-à-vis signe. De cette manière, les charges sur le matériau isolant sont éliminées par recombinaison. La technique la plus utilisée pour éliminer la charge de surface est basée sur la décharge corona comme un mécanisme de la génération d'ions mono- ou bipolaires.

Dans ce travail la neutralisation des charges électrostatiques apparaissant sur des cheveux humains a été étudiée. Les cheveux chargés en électricité statique sont attirés par les objets tels que les vêtements ou les brosses portant une charge de signe contraire. De plus, le problème de chargement de cheveux peut être très gênant au cours de la coiffure des dames, en particulier celles ayant des cheveux fins et peu danse. Ce problème suscite beaucoup

d'intérêt chez les fabrications des outils de coiffure qui tentent à chaque occasion d'en limiter les effets. Ainsi, on trouve des sèche-cheveux ou des plaques de lissage « antistatique ».

Notre objectif durant le présent mémoire est d'identifier d'abord les mécanismes de génération des charges au cours d'un processus de coiffure pour ensuite étudier la neutralisation par une décharge à barrière Diélectrique (DBD).

Pour bien cerner le sujet, nous avons structuré le mémoire en trois chapitres:

Le premier présente l'état de l'art du sujet. On présentera les problèmes d'électrostatique dans les différents domaines et un aperçu sur les matériaux isolants de type polymère et leurs propriétés. Les mécanismes d'apparition de la charge sur la surface des isolants sont également présentés.

Le deuxième chapitre est consacré aux techniques d'élimination des charges statiques à la surface des isolants.

Les méthodes et les matériaux utilisés ont été présentés dans le dernier chapitre. Le chapitre présent les résultats obtenus avec leurs interprétations.

Le mémoire se termine par une conclusion qui englobe les résultats finaux.



Chapitre 01

Etat de l'art



Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Problèmes d'électrostatiques

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... En effet, les charges créées à la surface des isolants peuvent causer des problèmes allant d'un simple choc électrique jusqu'aux conséquences les plus graves telles que les incendies. Principalement, c'est lors du transport de matières isolantes pendant les phases de production industrielle que des problèmes d'électricité statique peuvent survenir. En effet de nombreux matériaux non-conducteurs tel que: les matières plastiques, le caoutchouc, le papier, les hydrocarbures...etc, auront tendance à se charger en électricité statique par frottement lors de ces manipulations qui se font souvent à des vitesses élevées (transport sur tapis pneumatiques...). Dans des conditions d'atmosphères très sèches, un grand nombre d'autres matières peuvent être concernées par ces problèmes alors qu'elles ne le sont pas en condition normale. La génération d'électricité statique concerne aussi bien les matières solides que les fluides: les liquides non-conducteurs comme l'essence risquent de se charger pendant les phases d'écoulement dans des canalisations... Dans ce dernier cas de figure, le risque pour la sécurité des individus est le problème principal, en effet, une étincelle qui peut déclencher une explosion [01].

I.1.1. Les nuisances techniques

L'électricité statique peut être une source de problèmes pendant les phases de production dans de nombreux domaines différents et cela à tous les niveaux de fabrication. Par exemple:

- Dans le domaine de la microélectronique, les composants réalisés sont de plus en plus miniaturisés, et par-là même, de plus en plus sensibles à de très faibles parasites. Une décharge électrostatique produit suffisamment d'énergie pour endommager gravement ces composants.
- L'apparition de charges électriques engendre des phénomènes de répulsions et d'attractions qui ont pour conséquence de gêner les travaux industriels notamment dans les industries du papier, du plastique... Des poussières peuvent également être attirées, se déposant alors en une couche épaisse sur les parois des machines, et obstruant parfois certains conduits ou filtres [01].

I.1.2. Cas du textile

Les problèmes dus au développement de charges électrostatiques sur des fibres, des tissus ou d'autres étoffes textiles sont nombreux et variés. En général, ils sont plus importants avec des fibres dont la teneur en eau est relativement basse et dans des milieux où le taux d'humidité ambiante est faible, car cela donne lieu à des accumulations de charges importantes et persistantes. Les nuisances surviennent d'abord lors des productions industrielles textiles. En effet, les charges peuvent s'accumuler sur les matériaux textiles pendant leurs manipulations et être transmises à des conducteurs isolés. Ces troubles continuent pendant l'utilisation de ces matières textiles à cause de l'accroissement de la quantité de charge sur les textiles, les corps en contact ou à proximité.

Une fois encore les problèmes peuvent apparaître à divers niveaux de la filière textile. Aussi bien au niveau de la filature qu'au niveau du tissage.

-Les phénomènes d'attractions et de répulsions entraînent souvent divers problèmes de bobinage.

-Lors de la préparation des fils parallèles pour le métier à tisser (ourdissage), ces mêmes causes peuvent également entraver le bon fonctionnement du système.

-Un autre cas fréquent peut survenir à la sortie du métier à tisser, le tissu se charge électriquement en sortant et l'électricité statique peut empêcher le repliement sur lui-même. De nombreux autres exemples sont rencontrés fréquemment dans l'industrie du textile, mais plus important encore est la généralisation de l'utilisation de matières textiles dans de nombreux domaines et donc les risques de voir apparaître des problèmes électrostatiques liés à ces textiles [01].

I.2. Généralités sur les polymères

Grâce leur performance physico-chimique, les matériaux diélectriques à base de polymères trouvent un champ d'application de plus en plus dans l'industrie et notamment dans le domaine du génie électrique : câble de transport d'énergie, condensateurs... etc [03].

L'utilisation des polymères dans la microélectronique est plus récente (fin des années 70) avec la réalisation des premiers systèmes micro fluidiques. Les polymères ont également été utilisés comme couches sensibles en utilisant directement certaines de leurs propriétés chimiques ou indirectement comme supports matriciels pour des agents actifs. Les polymères apparaissent comme des biomatériaux très prometteurs. En effet, leur utilisation est de plus en plus courante dans des domaines tels que la médecine où ils sont utilisés dans certains

procédés chirurgicaux notamment oculaires, comme implants artificiels, prothèses ou bien dans les systèmes de distribution automatique de médicaments.

Dans le domaine des micro-technologies, les polymères sont utilisés depuis très longtemps comme encapsulant avec des propriétés tels que la conduction thermique, la protection électromagnétique ou encore la protection contre les radiations Ultra-Violette [04].

I.2.1. Définition d'un polymère

Un polymère est une macromolécule formée de l'enchaînement covalent d'un très grand nombre d'unités de répétition qui dérivent d'un ou de plusieurs monomères (qui sont également appelés motifs) et préparée à partir de molécules appelées monomères [05].

Le nombre moyen de ces unités de base (monomères) dans les molécules finale (polymères) représente le degré de polymérisation. Si ce degré est élevé, on parle de hauts polymères par contre s'il est faible, le composé est une oligomère [06]. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple: polyéthylène, poly (acide glycolique), polytétrafluoroéthylène, polyimideetc [07].

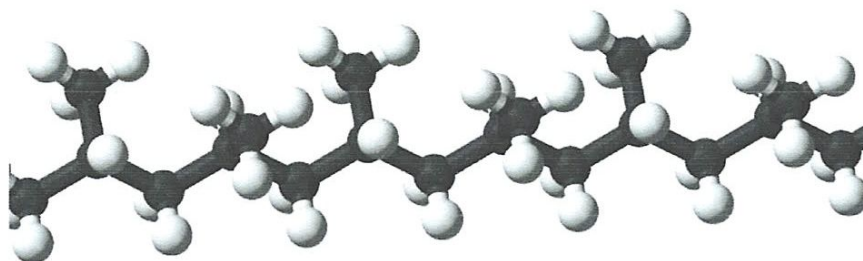


Figure I.1: Représentation schématique d'un type des polymères

D'une façon générale, un polymère est un mélange de macromolécules de différentes tailles et de compositions variées si l'on a différents monomères. Ainsi, on peut caractériser un polymère par [06]:

- Sa composition chimique moyenne.
- Sa masse moléculaire moyenne.
- Son degré de polymérisation.
- Sa structure (amorphe ou semi-cristalline).

I.2.2. Différentes classes de polymères:

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on

choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou structure moléculaire, comme base de la classification.

Classification selon l'origine:

Les polymères classés selon l'origine peuvent être:

- Des polymères naturels: ce sont des composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, la chitine...etc.
- Des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, exemple: méthyl cellulose.
- Des polymères synthétiques: ce sont les matières plastiques élastomères, les fibres, les adhésifs [08].

Classification selon l'architecture:

Selon [9,10], les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles: les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques.

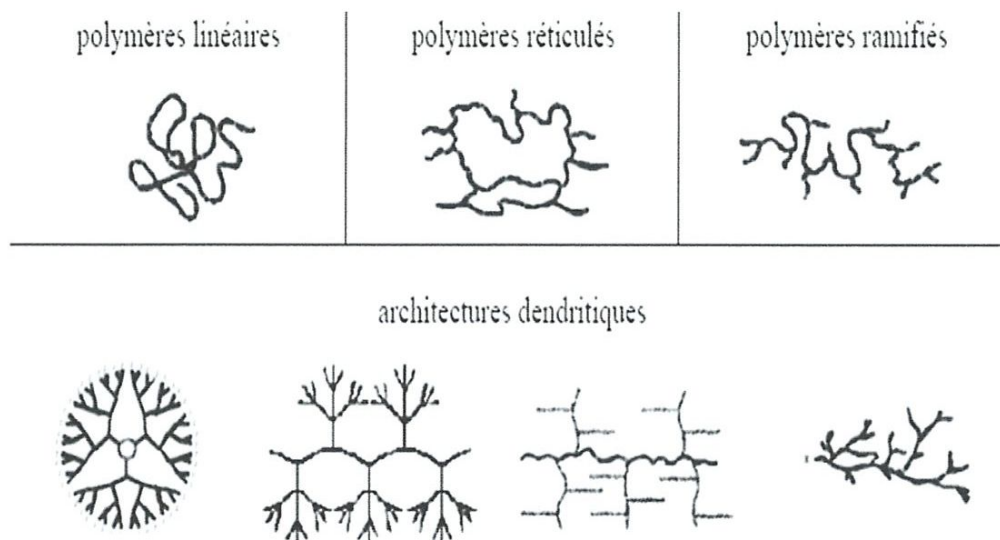


Figure I.2: Classification des architectures macromoléculaires

-Les polymères d'architecture linéaire: sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement di fonctionnels).

-Les polymères d'architecture ramifiées: découlent de réactions de transfert de

chaîne, ou bien sont générées par des réactions de greffage. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le domaine des thermoplastiques. Le Nylon, le Plexiglas (polymères linéaires), dont la production a débuté dans les années 1930, ou bien le polyéthylène basse densité (polymère branché), produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques.

-L'introduction de liaisons covalentes entre chaînes de polymères linéaires ou ramifiés aboutit à la troisième famille, **les polymères réticulés** ou « crosslinked polymers ». Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures dès le début des années 1940. Elles définissent aujourd'hui le domaine communément appelé des thermodurcissables. Les résines époxy et les caoutchoucs sont des exemples de systèmes polymères réticulés.

Classification selon la structure chimique

La structure chimique des motifs permet une classification des composés macromoléculaires homopolymères et copolymères.

-a- Les homopolymères: sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes [11]. Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

-b- Les copolymères: sont des polymères qui possèdent plusieurs unités, comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles, citons: le mode statistique, alterné, séquencé et greffé.

Classification selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classés d'après leurs propriétés thermodynamiques en trois types:

-a- Les thermoplastiques: ramollissent sous l'effet de la chaleur, ils deviennent souples, malléables et durcissent à nouveau quand on les refroidit, ces matériaux conservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être rompues sous l'effet de la chaleur ou de fortes contraintes, elles peuvent alors glisser les unes par rapport aux autres pour prendre une forme différente et quand la matière refroidit, les liaisons se reforment et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes [12].

-b- Les thermodurcissables: les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires

tridimensionnels qui sont des matières thermo durcies ou thermo rigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel [13].

-c- Les élastomères: ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc, un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles même, sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer [14].

I.2.3. Applications des polymères

Il existe toutes sortes de polymères caractérisés par différentes propriétés : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Hormis les applications électriques nous pouvons citer leur utilisation dans les emballages textiles, la peinture, les adhésifs, les cosmétiques, les pneumatiques, etc. Le tableau I.1 décrit quelques matériaux polymères courants leur abréviation et leurs utilisations principales [15].

Tableau I.1: Applications courantes de quelques polymères

Matériaux	Abréviation	Applications courantes
Polyéthylène	PE	Isolation électrique (câbles), emballages
Polypropylène	PP	Boîtier d'appareil électrique
Polychlorure de vinyle	PVC	Boîtiers, diapositive couleur, protection anti-poussière, reliure de livre, câble basse tension
Polystyrène	PS	Disque d'enregistrement sonore et emballage
Poly méthacrylate de méthyle	PMMA	Vitrines et cadre
Polyamides	PA	Produit de doublage pour lamination à chaud
Polyéthylène naphthalate	PEN	Isolation électrique et électronique
Polyéthylène téréphtalate	PET	Composants électriques (condensateurs etc..), circuits imprimés, isolation moteur, bandes magnétiques
Polyacétate de vinyle	PVAC	Câble de latex pour les réparations et liant pour les peintures décoratives

I.3. Propriétés diélectriques des polymères [15]

Les propriétés des matériaux polymères dépendent de la structure chimique des macromolécules qui les constituent mais aussi de différents facteurs et en particulier des adjuvants volontaires ou non. L'absorption d'eau, la nature de la charge minérale ou organique jouent un rôle déterminant sur les propriétés électriques essentielles des matériaux isolants par sa constante diélectrique ϵ_r , définie comme le rapport entre la capacité C_x d'un système d'électrodes immergées dans le diélectrique et la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide.

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_v} \dots\dots\dots (I.1)$$

La plupart des diélectriques courants ont une permittivité relative qui varie entre 2 et 10. Dans des diélectriques réels (donc imparfaits) on considère la permittivité relative comme une fonction complexe ϵ_r^* de la fréquence qui tient compte de la dissipation d'énergie dans le diélectrique:

$$\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \dots\dots\dots (I.2)$$

La partie réelle ϵ_r' représente la permittivité relative en courant alternatif à une fréquence et une température données, ϵ_r'' est définie comme l'indice de pertes. Le facteur de dissipation diélectrique également appelé tangente de l'angle de pertes $\tan \delta$ est donné par :

$$\tan \delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'} \dots\dots\dots (I.3)$$

Le fait que les charges présentes dans un diélectrique ne sont pas libres ne signifie pas qu'elles sont liées de façon absolument rigide les unes aux autres. Si on applique un champ électrique E les centres de charges positives et négatives ne vont plus coïncider, provoquant ainsi l'apparition de dipôles électrique (polarisation). Différents mécanismes concourent à l'apparition de ces dipôles.

Si \vec{E} varie au cours du temps, sinusoïdalement, on observe à partir de certaines fréquences, un déphasage entre ce champ et l'établissement des dipôles. Ce déphasage provoque la dissipation d'énergie responsable des pertes diélectriques. Selon la structure chimique des polymères et d'après l'évolution de leur permittivité en fonction de la fréquence et de la température, ils peuvent être

classés en polymères polaires et apolaires. Les polymères polaires possèdent dans leurs molécules des atomes (généralement électronégatifs tels que F, O, N) qui fournissent des dipôles électriques. A ce groupe appartiennent les polyesters tels que le PET et les groupes esters en général.

I.3.1. La polarisation

La polarisation est la résultante des mécanismes de répartition des charges sous l'influence d'un champ électrique. Dans le cas d'un objet soumis à un champ électrique E , on la désigne par le vecteur P . On a la relation [16] :

$$P = \chi \varepsilon_0 E \dots \dots \dots (I.4)$$

Où χ est la susceptibilité diélectrique du matériau et ε_0 la permittivité absolue ($\varepsilon_0 = 8,85.10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$).

Les mécanismes de polarisation dans les matériaux polymères sont [15] :

I.3.1.1. Polarisation électronique

La polarisation électronique résulte du déplacement du noyau de l'atome par rapport au nuage électronique sous l'influence du champ électrique \vec{E} , donnant un dipôle induit (figure. I.3).

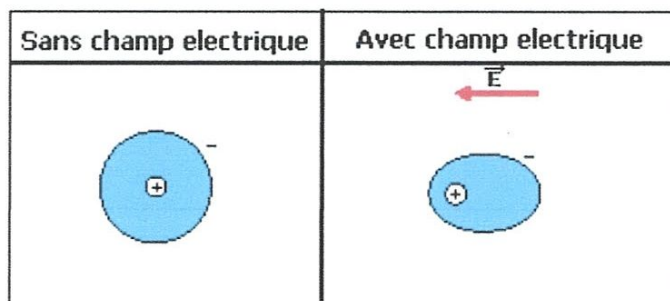


Figure I.3: Polarisation électronique

Cette polarisation peut être observée jusqu'à des fréquences dépassant celle de la lumière visible (10^{15} Hz). A cause de l'inexistence d'une relaxation diélectrique (retard à l'établissement de ce phénomène), ce phénomène est considéré comme instantané.

I.3.1.2. Polarisation atomique (ionique)

La distorsion de l'arrangement atomique d'une molécule sous l'effet d'un champ électrique fait apparaître un mouvement dipolaire induit (figure I.4).

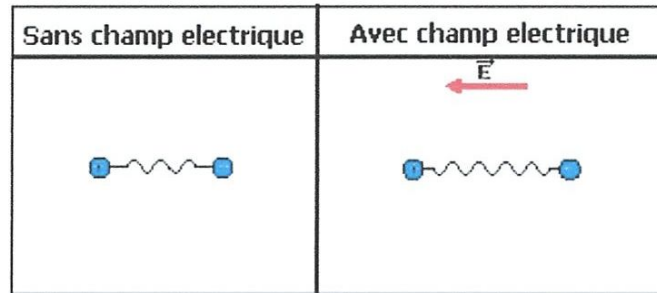


Figure I.4: Polarisation atomique

L'inertie des masses mises en jeu augmente le temps de manifestation d'un facteur 10^3 à 10^4 par rapport à la polarisation électronique.

I.3.1.3. Polarisation interfaciale

Ce type de polarisation apparaît dans les matériaux hétérogènes (Figure I.5).

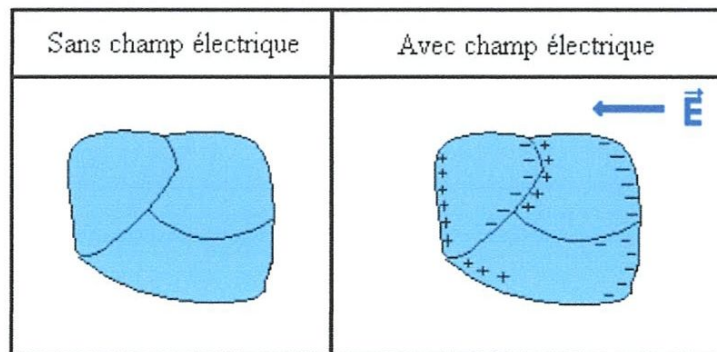


Figure I.5: Polarisation inter faciale

Elle est due à la présence dans le matériau de porteurs de charges (électronique ou ionique) en excès. Ces charges peuvent être intrinsèques au matériau ou injectées au cours d'application du champ électrique. Cette polarisation provient de l'accumulation de ces charges aux interfaces entre deux phases qui ont des permittivités et des conductivités différentes. Ce type de polarisation est encore

appelé effet Maxwell Wagner Sillars. Il se manifeste en basse fréquence. Ce mécanisme induit un moment dipolaire macroscopique dont le temps d'établissement est long ($>10^3$ s).

I.3.2.4. Polarisation dipolaire ou d'orientation (Debye)

Une molécule formée d'atomes différents présente généralement un moment dipolaire permanent (la résultante des différents moments dipolaires est différente de zéro). Sous l'action du champ électrique, ces dipôles existent préalablement de manière désordonnée et ont tendance à s'orienter suivant le sens de ce champ (Figure I.6).

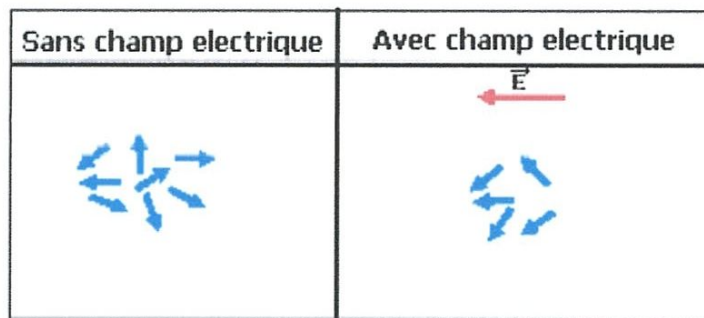


Figure I.6: Polarisation dipolaire

Le temps d'établissement est beaucoup plus important que lors du phénomène de polarisation précédemment cité impliqués et de leur environnement moléculaire. De ce fait, les polarisations électroniques et ioniques seront considérées comme des phénomènes instantanés, contrairement à la polarisation dipolaire. Le retard à l'établissement se manifeste à cause de l'inertie du mouvement des dipôles. ($>10^5$ s), en raison de la grande diversité des dipôles.

I.3.2. La conduction

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. Cette conduction est due aux mouvements des ions et des électrons. Leur origine peut être classée en deux catégories (Dissado et Fothergill 1992):

- **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 (Laurent 1999).

• **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 [17].

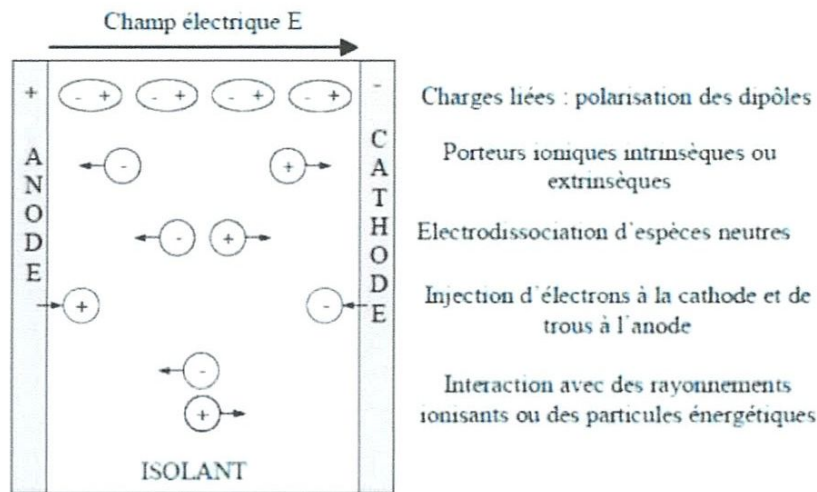


Figure I.7. Mécanisme de générations des charges dans un isolant entre électrodes sous l'effet d'un champ électrique

I.4. Mécanismes d'apparition de charge

I.4.1. Phénomène d'électrisation

Un corps chargé électriquement est la manifestation d'une accumulation ou d'une perte de charges électriques. En effet, lorsqu'un corps est en équilibre, il est électriquement neutre. Ce corps sera électrisé lorsque quelques-uns de ses atomes auront soit gagné, soit perdu un ou plusieurs électrons rompant ainsi l'équilibre et la neutralité. On dit alors que ce corps possède une charge électrique :

- Par frottement (triboélectricité)
- Par contact (transfert direct de charges)
- Par influence (à l'aide d'un champ électrique)
- Par ionisation (émissions d'ions sous haute tension).

Les phénomènes les plus répandus étant l'effet triboélectrique et l'influence. Dans le domaine du textile, la plus importante source de charges électrostatiques reste le phénomène de charge triboélectrique [1].

I.4.1.1. L'effet triboélectrique

Il s'agit d'un transfert de charges électriques entre différents matériaux : lorsque deux matériaux 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 [18]. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux mais sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact, le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse [1].

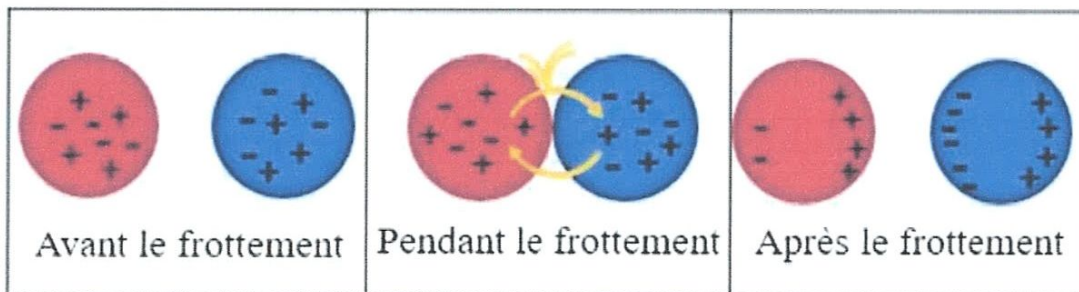


Figure I.8: Transferts de charges électriques dus au frottement de deux corps; l'un s'électrise positivement et l'autre négativement.

La polarité des charges dépend de nombreux facteurs, on peut cependant établir des listes ou séries dites triboélectriques (figure I.8), auxquelles on prête la valeur d'indice: plus les deux matériaux dont il s'agit sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. En réalité, on ne peut pas se fier complètement à l'ordre des matériaux dans ces listes car il diffère souvent d'un auteur à l'autre ; en effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus. Il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable. Cette particularité de l'électricité statique; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant et est un élément de plus qui peut permettre de comprendre les mécanismes électrostatiques.

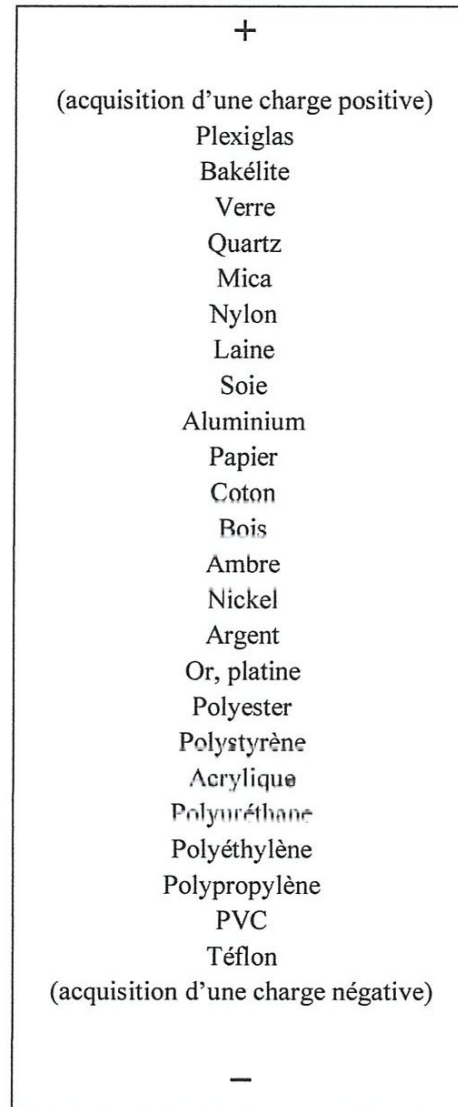


Figure I.9: Classement de certains matériaux selon leur caractère triboélectrique

I.4.1.2. L'influence ou 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 [19,20]. Comme le montre la figure I.10, il y apparaît autant de charges (+) que de charges (-).

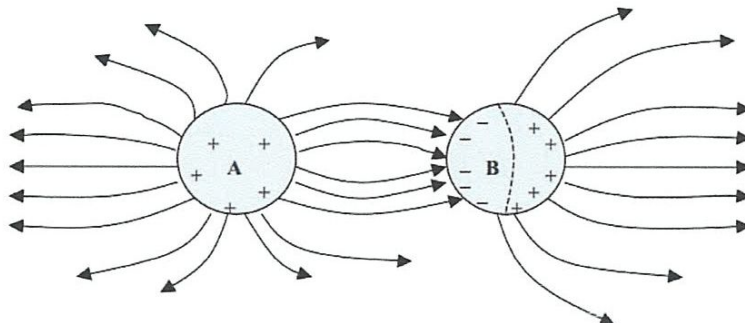


Figure I.10: Influence entre deux corps (le corps B étant isolé)

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.

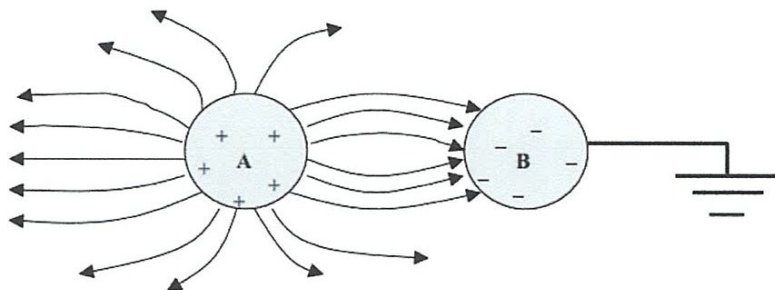


Figure I.11: Influence entre deux corps (le corps B étant relié à la terre)

Si le corps influencé B est relié à la terre, il ne porte que des charges de signe contraire à celle du corps influençant et leur valeur absolue est toujours plus petite que celle de A. Les textiles auront tendance à générer des charges électriques sur des corps conducteurs (comme le corps humain, les métaux ou des fibres conductrices ...) par le biais de ce mécanisme. En fait, l'influence peut s'avérer être un moyen pratique pour la mesure de la quantité de charge d'un corps.

I.4.2. La décharge électrique

La décharge électrique est un phénomène physique se produisant dans les gaz lorsqu'on leur applique un champ électrique suffisamment intense [21]. Ce gaz devient alors plus ou moins conducteur. Les décharges dans les gaz ont dues à l'apparition d'électrons et d'ions libres. La production d'un état plasma dans un gaz se fait à travers l'ionisation des molécules du gaz par les électrons libres accélérés grâce au champ électrique. En l'absence d'un tel champ électrique, l'état de plasma disparaît car les particules chargées s'éliminent par recombinaison, diffusion sur les parois et par capture des électrons libres par les atomes ou molécules électronégatifs [22]. Les décharges électriques peuvent être différents critères: la pression, la caractéristique courant- tension, la configuration des électrodes, etc [23].

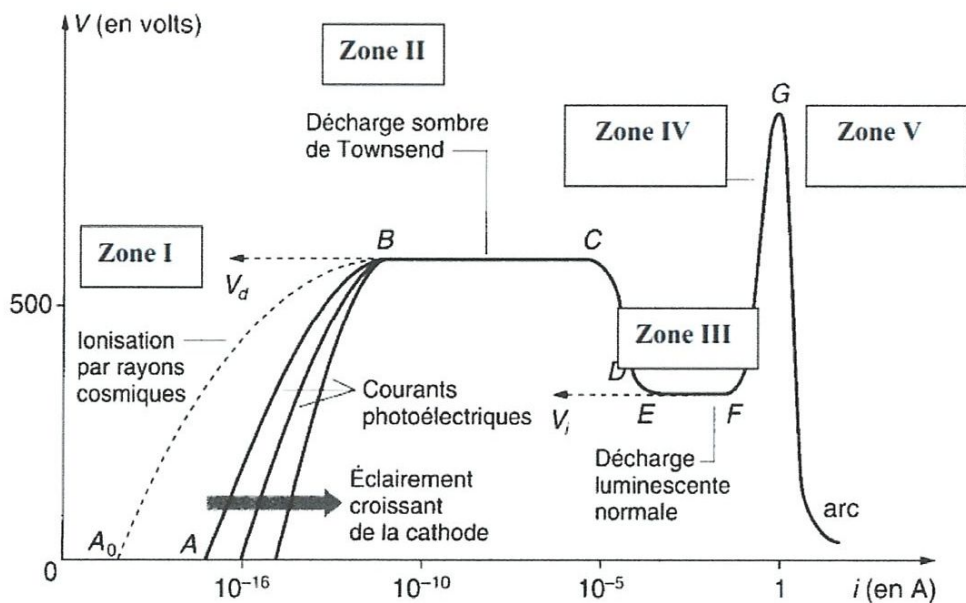


Figure I.12 : Caractéristique courant- tension alimentée par une tension continue

Les caractéristiques courant- tension de la figure (I.12), présentent les différents régimes de décharge que l'on peut observer dans l'air, à pression atmosphérique, entre une pointe et un plan [24].

- Le passage de la zone I à la zone II est délimité par la tension seuil V_0 . Au-delà celle-ci, le courant augmente fortement alors que la tension n'augmente

que très faiblement. Les électrons acquièrent suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules du gaz par collision et créent des avalanches électroniques dites avalanches de Townsend. Finalement, les électrons n'auront pas suffisamment d'énergie pour générer d'autres électrons secondaires et la décharge finit par s'éteindre une fois que toutes les charges sont collectées.

- La zone III, qui nous intéresse particulièrement, se caractérise par une boule de plasma localisée à la pointe et correspondant à ce que l'on nomme le régime *glow* (régime de décharge couronne). A ce stade, la composante du courant est essentiellement continue et le courant s'accroît faiblement avec la tension.
- La zone IV, correspond au régime du *streamer* ou dard. A la composante continue du courant, se superpose une composante pulsionnelle.
- Si la tension poursuit son augmentation et dépasse la tension critique V_r , la décharge passe en phase d'arc et nous avons alors à faire à un plasma chaud. Cette transition est due à une augmentation de la température dans le canal de décharge induisant une expansion hydrodynamique et donc une légère chute de la densité N du gaz. Le champ réduit E/N augmente et pouvant atteindre une valeur pour laquelle l'ionisation est supérieure à l'attachement électronique, on observe alors la formation d'étincelles ou d'arcs.

I.4.2.1. La décharge couronne

La décharge couronne représente l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure, les électrodes étant soumises à une différence de potentiel élevée. On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, la décharge étant positive ou négative suivant que cette électrode joue le rôle d'anode ou de cathode. Le phénomène fondamental est toujours la dissociation des atomes ou molécules en électrons et ions positifs. Les charges de signe opposé à celui du conducteur sont instantanément attirées vers lui et neutralisées alors que les charges de même signe sont repoussées. Si l'électrode active est anode, les ions positifs sont repoussés et traversent l'espace entre les deux électrodes. Pour une électrode active cathode, comme les électrons s'attachent très rapidement aux atomes ou molécules neutres, des ions négatifs sont formés et tout se passe comme si des ions de même polarité que l'émetteur étaient émis sous l'effet l'ionisation [25].

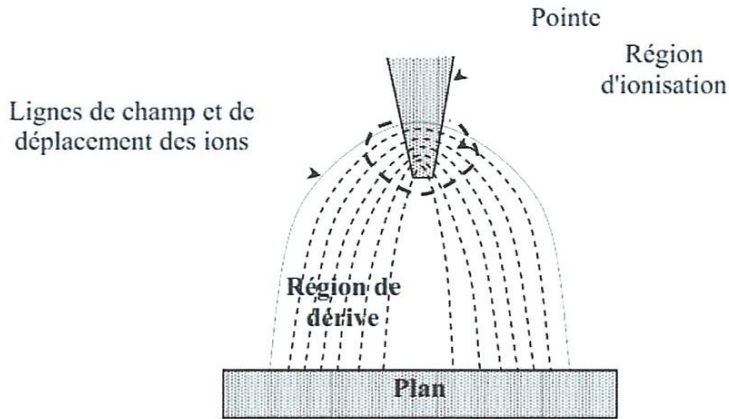


Figure I.13: Configuration pointe-plan pour le dépôt de charges

I.4.2.1.1. Différents systèmes d'électrodes

Les jeux d'électrodes que l'on retrouve couramment dans les décharges couronnes sont de type :

- Fil – cylindre
- Pointe – plan
- Fil – plan

Le système d'électrodes « fil – cylindre » est très utilisé pour la dépollution en volume.

Le système mono pointe – plan à l'avantage de pouvoir isoler une décharge d'une part.

Le système « multi pointes – plan » à l'avantage de pouvoir contrôler la répartition des décharges le long de l'écoulement.

Plusieurs géométries de répartition d'électrodes sont possibles ; en forme de hérisson, en alignement de dents de scie, en brosse sur une surface, etc. De plus, des paramètres de réglage supplémentaires apparaissent, par exemple la densité des pointes, leur positionnement le long de l'écoulement ou leur rayon de courbure [24].

I.4.2.1.2. Décharge couronne négative

Un électron voisin de la pointe crée une avalanche. Les ions positifs sont attirés dans le sens du champ et se précipitent sur la pointe (Figure.I.14). Des électrons sont extraits de la cathode par choc, chaque électron ainsi libéré produit une nouvelle avalanche qui s'en dégage. Ces avalanches ont une extension limitée. D'une part, le champ décroît rapidement dès qu'on s'éloigne de la pointe vers le plan collecteur. D'autre part, les avalanches qui se développent laissent derrière elles les ions positifs moins mobiles qui font écran entre les électrons et la pointe. Cette deuxième cause d'affaiblissement du champ vient renforcer la première.

Un nuage d'ions positifs est formé par les avalanches d'électrons. Quand le nuage positif est développé de manière suffisante, les avalanches arrêtent de se produire parce que le champ est très affaibli au-delà. Les ions positifs sont attirés par la pointe, donc ils sont neutralisés par la pointe si bien que la zone positive dont nous avons vu la formation disparaît. L'effet d'écran disparaît quand tous les ions positifs ont été captés par la pointe ; on a, à nouveau, le champ initial et le phénomène recommence. Il a donc une allure cyclique, la durée du cycle étant égale au temps mis par la couche positive pour être balayée par la pointe [25].

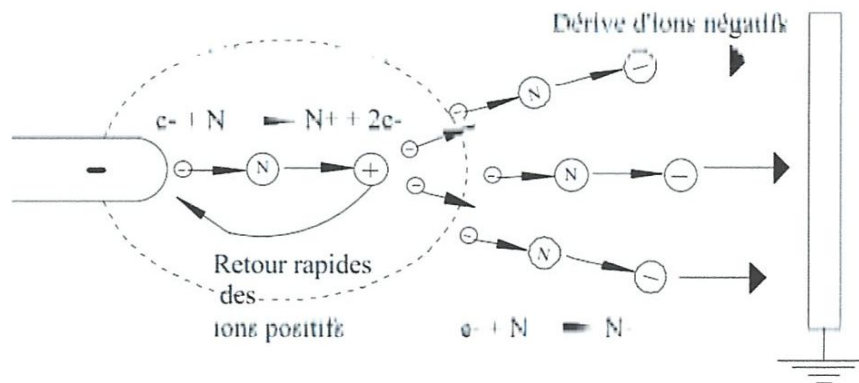


Figure I.14: Descriptif de la décharge couronne négative

I.4.2.1.3. Décharge couronne positives

Le phénomène est plus complexe dans ce cas parce que la zone du champ électrique intense n'est pas juxtaposée à la source des électrons. Les électrons qui sont au voisinage de la pointe produisent des avalanches, mais quand les électrons arrivent sur la pointe, ils ne produisent rien qui puisse entretenir le phénomène. La cathode ne joue pas le rôle de pourvoyeuse des électrons car cette cathode est située très loin de la zone où le champ électrique est intense. Si le champ est assez fort, les électrons germes produits sous l'action du rayonnement ultraviolet émis par une avalanche créent des nouvelles avalanches. Le champ est renforcé par l'avalanche, mais la formation d'une chaîne entre électrodes est peu probable, le champ devenant trop faible au voisinage de la cathode [25].

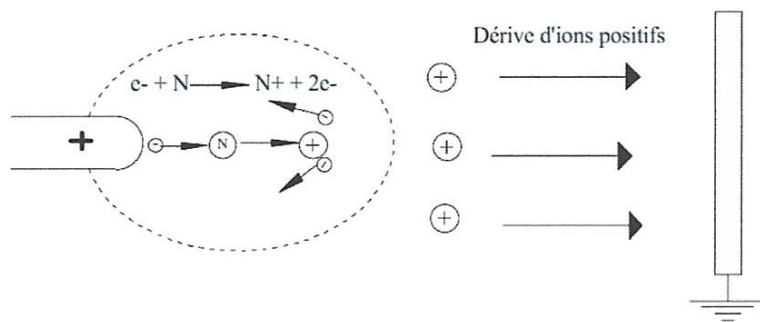


Figure I.15: Descriptif de la décharge couronne positive

I.4.2.1.4. Décharge en régime alternatif

A la place d'un potentiel continu appliqué à la pointe, on peut également y appliquer un signal sinusoïdal à valeur moyenne nulle. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, 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 (Parissi, 1999).

$$d_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi f} \quad \longleftrightarrow \quad f_{max} = \frac{\mu E_0}{\pi} \dots \dots \dots (I.5)$$

Avec: μ la mobilité des ions et E_0 l'amplitude du champ électrique. Si l'excitation est supérieure à cette fréquence F_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faible qu'en continu [26].

I.4.2.1.5. Applications de la décharge couronne

Les décharges corona ont de nombreuses applications commerciales et industrielles telle que [27]:

- Production d'ozone.
- Filtrage des particules contenues dans l'air (système d'air conditionné) .
- Destruction de particules organiques contenues dans l'atmosphère : pesticide, solvant, ...etc.

- Traitement de surface de certain polymère.
- Photocopieur.
- Laser à azote.
- Séparation électrostatique de matières conductrices et non-conductrices.

I.4.2.2. La Décharge a Barrière Diélectrique (DBD)

L'inconvénient de la décharge couronne est la transition à l'arc électrique. Pour éviter ce type de problème, plusieurs solutions ont été avancées pour limiter le courant de décharge. L'une de ces solutions est de disposer une barrière diélectrique entre les électrodes, car celle-ci homogénéise la répartition des charges à la surface des électrodes. Ainsi, la transition de la décharge lumineuse ou filamentaire vers une décharge de type arc est stoppée par la barrière diélectrique. Ceci empêche tout échauffement local important. Les décharges à barrière diélectriques (DBD) sont connues depuis le milieu de XIXème siècle. La première DBD à pression atmosphérique dans l'air a été obtenue par Von Engle et al. Les premières expériences sur ce type de décharge ont été proposées par Siemens 1857. Ces décharges sont des plasmas froids hors équilibre dans lesquels les électrons créés possèdent une énergie ou une température supérieure à celles des ions (énergie moyenne de quelques eV) et des particules neutres de gaz (300K) qui restent majoritaires. Les décharges à barrière diélectrique touchent de nombreux domaines comme l'électronique, le textile, l'emballage et l'automobile. Les principales caractéristiques de cette décharge sont: pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique), une tension de l'ordre du kilovolt, une fréquence d'excitation de l'ordre du kilohertz et au moins une électrode recouverte par un diélectrique. La distance inter-électrodes est de quelques millimètres [28].

I.4.2.2.1. Définition et caractéristique d'une DBD

La décharge à barrière diélectrique est une décharge silencieuse qui permet de générer un plasma hors-équilibre thermodynamique à des pressions proches de la pression atmosphérique. Les DBD sont utilisables pour de nombreuses applications industrielles telles que la production d'ozone, le traitement d'effluents gazeux ou la modification d'état de surface [29]. Les DBD sont en général excitées en appliquant une tension alternative de forme sinusoïdale, d'amplitude de quelques kilovolts avec une fréquence de répétition pouvant atteindre quelques kilohertz, entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. L'utilisation de la barrière diélectrique homogénéise la répartition des charges en surface des

électrodes et empêche toute transition à l'arc et tout échauffement locale important, ce qui permet le traitement de films de polymères sans risque d'altération [30].

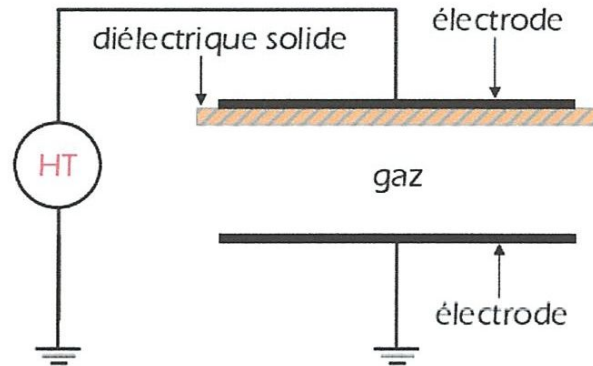


Figure I.16: Configuration classique d'une DBD

La décharge à barrière diélectrique est caractérisée par [31]:

- Sa pression de travail élevée (autour de la pression atmosphérique).
- La tension appliquée aux bornes des deux électrodes est de l'ordre de quelque kV.
- La fréquence d'excitation est de l'ordre du kHz.
- La décharge est contrôlée par une barrière diélectrique qui rend la décharge de courte durée et une répartition de charges telle que les micros décharges soient rares.
- La distance entre les électrodes est de l'ordre de quelque millimètre.

I.4.2.2.2. Principe de la décharge à barrière diélectrique

Comme nous l'avons vu précédemment, ce type de décharges est obtenu par insertion d'un matériau à propriétés diélectriques entre les deux électrodes. L'accumulation de charges à la surface de cette barrière diélectrique entraîne une chute de potentiel entre les deux électrodes et évite le passage à l'arc. L'utilisation d'une alimentation alternative est alors indispensable (de quelques Hz à quelques centaine de kHz) pour éviter que l'accumulation excessive des charges électriques à la surface du diélectrique ne neutralise la décharge. La décharge à barrière diélectrique est constituée d'une multitude de filaments de faible durée quand la pression est forte [31]:

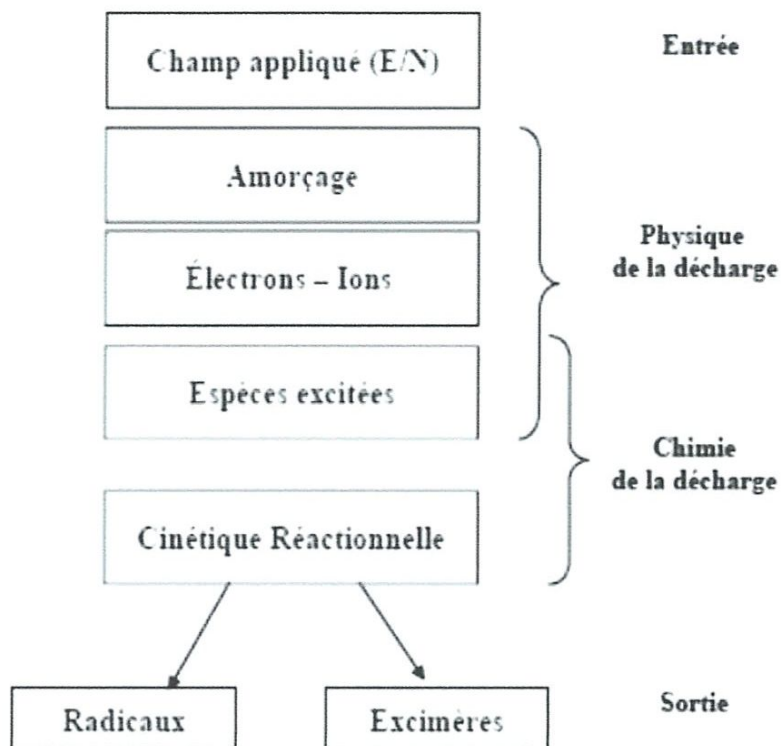


Figure I.17: Schéma de principe d'une décharge à barrière diélectrique.

La figure 1.17 montre le schéma de principe d'une DBD: Il y'a trois phases:

- Le claquage ou la formation de la décharge:

Quand on applique un champ électrique dans l'espace inter électrodes (de l'ordre de quelques millimètres), une avalanche électronique peut être initiée dans le gaz résiduel [31].

- Le transport des charges dans l'espace inter électrode ou l'impulsion de courant:

Il y'a établissement d'un canal de conduction qui conduit à l'apparition d'une charge d'espace. L'accumulation des charges au voisinage ou sur le diélectrique entraîne une diminution rapide de la différence de potentiel de l'espace gazeux. Cependant, les mécanismes de destruction des électrons (recombinaison et attachement) deviennent plus importants que les mécanismes de production (ionisation), ce qui entraîne l'extinction de la décharge et le courant devient impulsionnel [31].

- la cinétique des réactions des espèces excitées:

Quand le courant impulsionnel passe, les espèces sont excitées par les électrons énergétiques, ce qui implique la production de radicaux et l'excimères. Cette production peut s'étendre dans la phase de post-décharge, bien au-delà de l'extinction du courant. L'efficacité de production des densités des espèces excitées dépend fortement de l'énergie des électrons, alors que le temps nécessaire pour produire des radicaux ou des excimères dépend seulement des processus chimiques mis en jeu [31].

I.4.2.2.3. Configurations typiques

Il existe différentes configurations de DBD de volume couramment utilisées, outre la configuration classique présentée en figure I.16. En effet, le terme DBD regroupe toutes les configurations de cellule de décharge pour lesquelles un courant transite entre deux électrodes métalliques séparées par un gaz et par au moins une couche d'un matériau isolant. Suivant l'application visée, deux couches isolantes peuvent y être disposées. Les configurations des électrodes coplanaires et cylindriques typiques sont illustrées sur la figure I.18. Les configurations coplanaires (figure I.18 (a) et (c)) sont plutôt utilisées pour les applications de traitement de surfaces, tandis que les cylindriques (figure I.18(b) et (d)) sont plus adaptées aux traitements de gaz. L'arrangement plan-plan de la figure I.18(a) présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, conditions parfois utiles de l'usage de plasma corrosif par exemple. La configuration de la figure I.18(c) permet l'obtention simultanée d'une décharge de part et d'autre du diélectrique, propriété intéressante lorsque la barrière diélectrique constitue le matériau à traiter. Dans ce cas, le matériau est traité sur les deux faces simultanément. [32] Les diélectriques couramment utilisés sont le verre, le quartz, la céramique et les polymères.

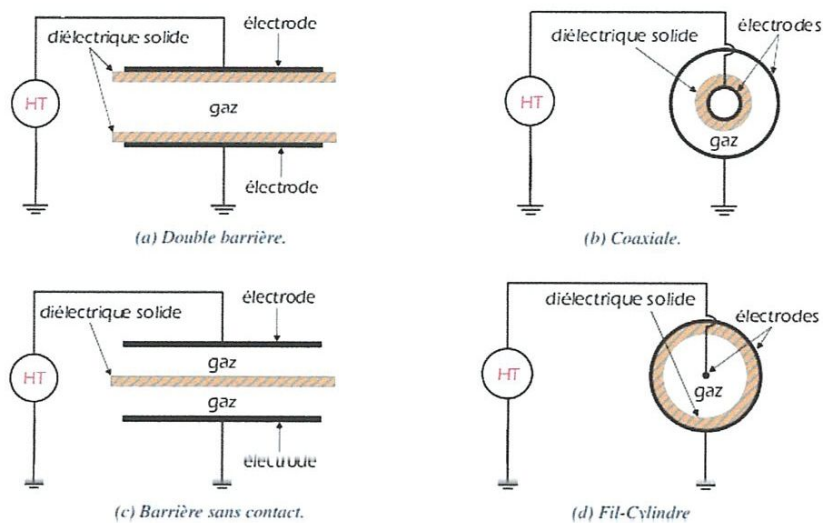


Figure I.18: Différentes configurations de Décharges contrôlées par Barrières Diélectriques (DBD)

I.4.2.2.4. Les différents régimes de décharges à barrière diélectrique

Selon la distance inter électrode on peut distinguer deux régimes de décharge à barrière diélectrique :

-Le premier régime est la décharge à barrière diélectrique volumique; ce genre de décharge est établit entre deux électrodes séparées l'une de l'autre par un diélectrique [33].

-Le deuxième régime est la décharge à barrière diélectrique surfacique nommée « OAUGDP » (One Atmosphère Uniform Glow Discharge Plasma). Ce type de décharge est utilisé comme actionneur pour contrôler un écoulement. Ce genre de décharge est établit entre deux électrodes séparées de part et d'autre par un diélectrique. On l'appelle surfacique car il n'y a plus comme dans le régime précédent, d'espace gazeux entre les deux électrodes, c'est-à-dire que le diélectrique occupe tout l'espace inter électrode [26].

a) Décharge à barrière diélectrique volumique

Selon le type de claquage de gaz et le produit pression du gaz \times distance inter électrode, on peut distinguer deux types de décharge :

- Décharge filamentaire.
- Décharge homogène (luminescente).

La décharge filamentaire consiste en une multitude de micro-filaments distribués aléatoirement sur la surface des électrodes. Le courant de décharge est caractérisé par de nombreux pics apparaissant

à chaque alternance de la tension. Cependant sous certaines conditions, la décharge peut devenir homogène, c'est le régime appelé APGD (Atmospheric pressure Glow Discharge) qui permet des traitements plus homogènes que ceux obtenus par DBD [31].

- **Décharge filamentaire:**

La décharge filamentaire est le premier mode de décharge à barrière diélectrique découvert et le plus facile à obtenir [33]. Ce type de décharge est composé d'une multitude de filaments initiés par un claquage de type streamers, Il est caractérisé par la distribution d'une multitude de micro décharges dans l'espace inter électrode de façon aléatoire .Lorsque la tension appliquée aux électrodes est suffisamment importante, des phénomènes d'ionisation par effet d'avalanche apparaissent. Les électrons « germes » naturellement présents dans le gaz vont être accélérés par le champ électrique et vont, par collision, créer de nouveaux électrons, c'est la phase d'avalanche. Les charges apparues modifient localement le champ électrique. Ces charges, en se propageant selon les lignes de champ, laissent une traînée ionisée (streamer) qui correspond au canal d'une micro décharge dont le rayon est d'environ 100 μm . La durée de vie d'une micro-décharge est de l'ordre de la dizaine de nanosecondes. Lorsqu'un canal ionisé est établi entre l'électrode et le diélectrique, celui-ci se charge, ce qui diminue le champ électrique et provoque l'extinction de la micro-décharge. Les principales réactions chimiques caractéristiques de la DBD interviennent dans la phase streamer : ce sont des réactions produites par des collisions électroniques. Après l'extinction du *streamer* et la recombinaison des charges, les différentes espèces neutres créées (molécules et radicaux) réagissent dans un milieu dont la température est voisine de la température ambiante. Dans la phase streamer, dont la durée est très courte (10 ns), les électrons peuvent cependant acquérir des énergies très élevées [31].

- **Décharge homogène:**

Il est toutefois possible d'obtenir des décharges lumineuses et homogènes (sans filaments) dans l'air à pression atmosphérique en appliquant des champs électriques de quelques dizaines de kV/cm à des fréquences de l'ordre du kHz et avec des distances inter- électrodes de 0,5 à 3cm [26]. Ce type de décharge est dû principalement à l'émission secondaire d'électrons suite au bombardement ionique de la cathode (**claquage Townsend**). Cette décharge est caractérisée par une répartition spatiale de la lumière homogène radialement mais localisée près d'une électrode lorsque la décharge est établie Elle ne correspond donc pas à une décharge filamentaire. Le terme de « décharge luminescente » (glow discharge) est utilisé en raison des similitudes observées entre

le régime de DBD d'aspect homogène et la véritable décharge lumineuse obtenue à faible produit pression-distance [33].

b) Régime de décharge à barrière diélectrique surfacique

Dans ce cas, le bombardement ionique sur la surface est très important et alimente la décharge en électrons secondaires, ce qui modifie grandement les caractéristiques de chaque filament de plasma. Ces géométries se rencontrent en particulier dans les cellules d'écran plasma. Ce type de DBD permet également de générer des vents ioniques lorsque les électrodes sont dissymétriques, ce qui permet de contrôler des écoulements fluides dans des réacteurs [34].

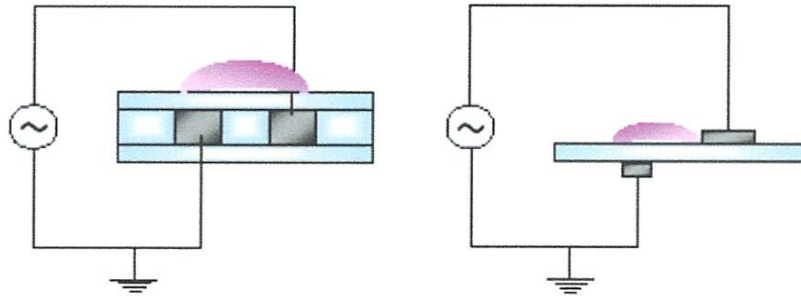


Figure I.19: Schéma de la décharge surfacique

I.4.2.2.5. Applications industrielles des décharges à barrière diélectrique

La production d'ozone est l'une des applications principales des décharges à barrière diélectrique, Elle a été appliquée pour le traitement de l'eau pour la rendre potable ainsi que dans l'industrie du papier. On peut également associer l'oxygène ou l'hydroxyde d'hydrogène avec l'ozone ce qui permet de traiter la pâte à papier sans ajout de chlore, Les décharges à barrière diélectrique sont également utilisées dans:

- le traitement des surfaces.
- l'infrarouge dans les lasers.
- comme cellules élémentaires des écrans plasmas [31].

I.5. La problématique: Electrostatique des cheveux

Pourquoi vos cheveux sont-ils électriques ? Comme beaucoup d'objets, les cheveux peuvent être chargés électriquement. Les cheveux électriques sont attirés comme des aimants, le fait d'avoir des cheveux électriques est lié à un phénomène d'électricité statique . Quand on frotte deux matériaux ensemble, les électrons sont arrachés aux molécules qui constituent l'objet: il devient alors chargé en ions positifs, et ce principe est le même que celui de l'aimant, les charges électriques opposées s'attirent, ainsi les charges égales se repoussent. Les cheveux sont attirés par votre peigne, votre brosse, un pull, un bonnet ou une écharpes, parce que leur charge en électricité statique est opposée à celle de ces objets. Et, bien sûr, plus vos cheveux sont fins, plus ils sont légers et sont aspirés facilement par les objets environnants.

En hiver, l'air est beaucoup plus sec et sous l'effet des différences de températures intérieures et extérieures la kératine des cheveux s'assèche et il arrive souvent que les cheveux deviennent électriques, et ce, quelle que soit la nature des cheveux.



Figure I.20: Phénomène de l'électrostatique des cheveux

Parmi les causes de l'électrostatisme des cheveux on donne quelque uns:

- 1°) Les frottements: ils génèrent l'électrostatisme, donc le brossage, les frottements des cheveux sur vos vêtements, les frottements des cheveux sur l'oreiller, la nuit...
- 2°) la sécheresse de l'air ambiant et aussi la présence d'appareils électroniques chez vous ou au travail, produits que vous mettez sur vos cheveux.

L'objectif de notre travail est d'étudier l'origine et les mécanismes responsables de l'apparition des charges électrostatiques sur les cheveux. En deuxième, nous étudions et nous proposons des solutions qui permettent l'élimination ou à la limite la réduction de ces charges à des niveaux non gênants.



Chapitre 02

Techniques de neutralisation



Chapitre II

Techniques de neutralisation

II.1. Introduction

L'électricité statique est une charge électrique stationnaire générée par un déséquilibre de la construction moléculaire des isolants relativement non conducteurs tels que les plastiques, le papier, le verre, les céramiques et d'autres matériaux non conducteurs.

Toute matière est composée d'atomes qui sont les plus petite partie d'un matériau. Comme nous l'avons déjà dit, la plus petite particule d'un élément est l'atome. Celle-ci est composée d'un noyau chargé positivement, avec des électrons chargés négativement, qui circulent autour. Normalement, la charge du noyau est égale à celle des électrons et les charges négatives et positives se neutralisent [36].

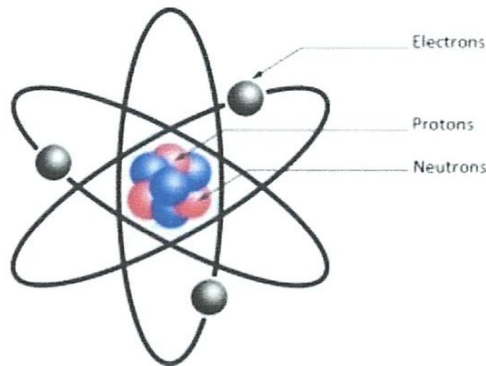


Figure II.1: Structure d'un atome

Suite à des influences externes, les électrons peuvent être rapprochés ou éloignés, ce qui perturbe l'équilibre électrique et ainsi le matériau est chargé électrostatiquement. Lorsqu'il y a un excédent en électrons, on parle d'une charge négative, lorsqu'il en manque, on parle de charge positive. Dans les deux cas, on peut parler d'une situation instable (Voir la figure ci-dessous).

Certains matériaux tels que le verre, les cheveux et le nylon ont tendance à abandonner les électrons et à devenir chargés positivement. D'autres matériaux tels que le polypropylène,

le vinyle (PVC), le silicium, le téflon et la silicone ont tendance à collecter des électrons et à devenir chargés négativement [37].

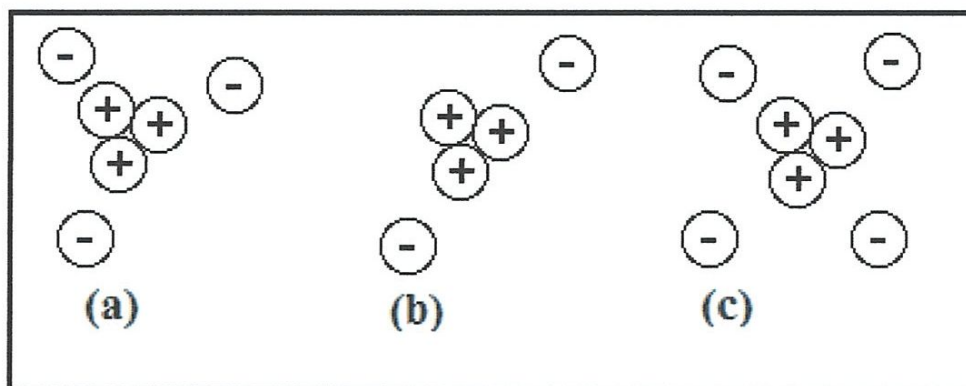


Figure II.2: Structure d'un atome : (a) atome nette équilibré charge zéro, (b) déficit d'électrons charge positive nette, (c) excès d'électrons charge négative nette

Des nombreux matériaux ou produits que nous rencontrons dans notre vie quotidienne peuvent plus ou moins être chargés en électricité statique. Les matériaux pouvant être chargé tribo-électriquement sont pratiquement tous les plastiques (polyéthylène, PVC, téflon,...), les fibres synthétiques utilisées dans les vêtements telles que nylon et dralon, mais aussi des fibres naturelles comme les cheveux (humains) et la laine. Tous ces matériaux sont chargés par frottement. Cela peut être un frottement entre deux matériaux identiques, mais aussi entre deux matériaux différents. L'apparition d'électricité statique et les dangers et difficultés pouvant en résulter dépendent non seulement des propriétés et des méthodes de transformation de la matière, mais aussi d'un certain nombre de facteurs extérieurs tels température et humidité [38].

II.2. Techniques de neutralisation

L'électricité statique peut être une source de plusieurs types de dangers causée par des charges non désirées ou résiduelles souvent présentes à la surface des matériaux diélectriques et aussi connue de risque due à sa capacité à enflammer les mélanges inflammables. Cela peut également entraîner une perte de produit, une réduction de la qualité et un certain nombre d'autres problèmes, tels que: détérioration des dispositifs électroniques, due aux décharges électrostatiques; mauvaises finitions de surface, en raison de l'attraction de la poussière; dégradation de la productivité.

Pour empêcher l'accumulation d'une telle charge des techniques de neutralisation appropriées peuvent être utilisées et qui sont d'une importance primordiale pour la conception d'un nouveau procédé, en particulier lorsque l'équipement doit fonctionner dans un environnement à haut risque [42].

La neutralisation de charge est le processus par lequel les charges statiques accumulées d'un potentiel sont rendues neutres. En éliminant la charge, le potentiel de dissipation incontrôlée de la charge et l'allumage qui en résulte sont éliminés. Parmi les méthodes de la neutralisation de la charge comprend, la mise à la terre et la liaison, l'ionisation l'humidification, et les peignes statiques. Ce qui suit est un bref résumé de différents procédés et méthodes peuvent contrôler et éliminer les charges électrostatiques sur la surface des matériaux isolants [39].

II.2.1. Mise à la terre et liaison

La mise à la terre et la liaison sont parmi les méthodes les plus courantes de dissipation de charge. La mise à la terre élimine ou minimise les différences de potentielles entre les objets conducteurs et le sol elle est une méthode de connexion de deux ou plusieurs objets conducteurs au sol et est une forme particulière de liaison dans laquelle une ou plusieurs liaisons, certains objets conducteurs sont également reliés à la terre de sorte que chacun est au même potentiel que la terre. Par conséquent, tous les objets au sol sont au même potentiel et les décharges statiques ne peuvent pas se produire entre eux. La liaison est la technique qui consiste à relier deux ou plusieurs objets conducteurs ensemble au moyen de fils ou de câbles de sorte qu'ils sont au même potentiel que l'autre mais pas nécessairement au même potentiel que la terre [40].

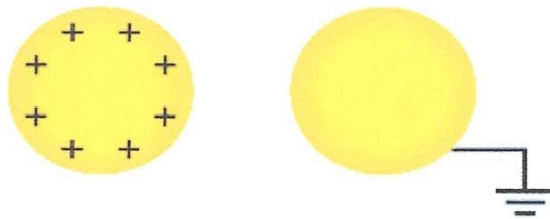


Figure II.3: Neutralisation par mise à la terre

II.2.1.1. But de liaison et de mise à la terre

Ces mesures empêchent les potentiels dangereux de se développer sur les conducteurs au plus grand courant de charge anticipé. Une série de composants conducteurs peut être liée ensemble et le système lié puis mis à la terre. En variante, chaque composant conducteur pourrait être individuellement mis à la terre. La première option nécessitera probablement une longueur totale du câble plus courte et apparence plus soignée. Cependant, Dans certains cas, il est préférable de mettre à la terre chaque composant conducteur séparément, car la perte d'une connexion de liaison unique pourrait autrement entraîner une isolation d'un système de conducteurs ayant une grande capacité. Cela pourrait grandement augmenter la probabilité d'inflammation où les conducteurs individuels ont une faible capacité et sont considérés comme ne présentant qu'un danger marginal. Les conséquences des connexions de liaison perdues via des mécanismes tels que les vibrations, la corrosion et les activités de maintenance doivent être prises en compte dans la conception du système de mise à la terre [40].

II.2.1.1. Résistance au sol

La résistance à la terre doit être suffisamment faible pour empêcher l'allumage par étincelle au maximum du courant de charge anticipé dans le système. La résistance dépend non seulement du mélange inflammable mais aussi du circuit électrique [40].

II.2.2. Contrôle de la relaxation de charge

Le taux de relaxation de charge peut dans certains cas être augmenté en augmentant la conductivité du milieu chargé ou de l'environnement.

II.2.2.1. Augmentation de la conductivité

La façon la plus simple pour éliminer une charge à la surface d'un isolant est d'augmenter la conductivité de l'isolant quand c'est possible, la conductivité surfacique de l'isolant est augmentée par l'ajout d'une couche conductrice. Le matériau peut être couvert par un autre matériau pulvérisé afin de créer une voie de faible résistivité vers la masse [41]. Cette méthode peut être appliquée à la conductivité volumique de liquides et de solides et à la conductivité de surface des solides. La méthode n'est généralement pas appliquée aux poudres pour des raisons pratiques et de qualité, bien que l'humidité puisse avoir un effet significatif par exemple pour les solides tels que les matériaux en feuille et les articles manufacturés, la

conductivité peut être augmentée en utilisant des additifs en vrac tels que le noir de carbone, typiquement à plusieurs charges pondérales, ou un traitement de surface avec des agents antistatiques topiques. Cette méthode est cependant inefficace et inexploitable lorsque le matériau isolant susceptible d'être chargé, doit conserver ses caractéristiques ou lorsque le volume d'air ou la surface à contrôler sont assez grands, tel est le cas des usines à semi-conducteurs.

II.2.2.2. Effet d'augmenté l'humidité

L'humidification est le processus par lequel l'humidité relative dans une zone de travail est augmentée pour empêcher l'accumulation de charges statiques sur les matériaux non conducteurs. L'humidification est la plus efficace pour contrôler l'accumulation d'électricité statique lorsque des matériaux isolants, tels que le papier, le bois et le textile, sont utilisés dans les procédés. Ces matériaux sont généralement des isolants, ils peuvent développer des charges statiques à travers le traitement et la manipulation de routine. En augmentant l'humidité relative, les surfaces des matériaux deviennent humides. Cette humidité augmente la conductivité de surface, permettant à la charge statique de se dissiper librement. Pour être efficace, le niveau d'humidité doit être élevé à au moins 60% ou plus [39].

L'augmentation de l'humidité relative de l'air de 45 à 60% peut considérablement réduire la charge lorsque les taux de séparation de surface sont relativement faibles et les surfaces ont le temps de s'équilibrer avec l'humidité cette augmentation peut augmenter la quantité de film d'eau sur les solides non conducteurs [40].

L'humidification n'est pas efficace pour contrôler l'électricité statique sur les matériaux avec teneur élevée en hydrocarbures, en raison de l'incapacité des hydrocarbures à absorber l'eau [39].

II.2.2.3. Les neutralisants de la charge

Bien que la nature et la composition des ions de l'air puissent varier avec le temps, l'espace et la méthode de production, tout processus d'ionisation dans l'air commence par l'élimination d'un électron d'une molécule neutre. L'énergie nécessaire peut être fournie à la molécule à partir d'une particule en collision ou d'un quantum d'énergie de rayonnement électromagnétique. Seules deux méthodes d'ionisation sont en usage technique pratique: l'ionisation radioactive et l'ionisation ionisée.

Ces dispositifs augmentent la conductivité de l'air de sorte que la charge s'écoule vers le sol. Les charges électriques peuvent être neutralisées par des moyens électriques et nucléaires (Beach 1957). Les neutralisants électriques peuvent être actifs ou passifs [40].

II.2.2.3.1. Neutralisants statique actifs

Les neutralisants statiques actifs ou bien les ioniseurs actifs consistent en un ensemble d'aiguilles à haute tension qui utilisent typiquement des décharges de couronne AC pour produire des ions des deux polarités, souvent en combinaison avec une soufflante pour aider à déplacer l'air ionisé vers la surface chargée. En raison du plus grand courant développé, ils ont plus longtemps gamme que les neutralisants passifs, mais sont encore limitées par le libre parcours moyen des ions [43]. Dans cette catégorie on distingue deux types de neutralisateurs statiques : ceux qui utilisent le champ électrique pour entrainer le nuage ionique de l'électrode ionisante vers la surface cible, et ceux qui utilisent un flux d'air pour entrainer les charges.

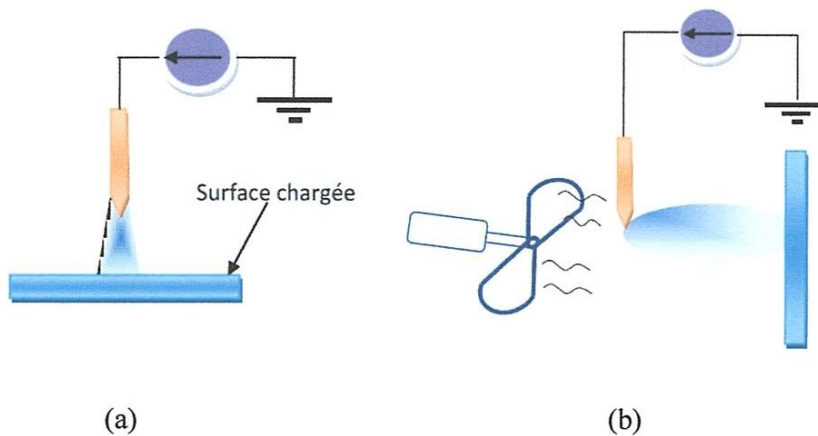


Figure II.4: Types de neutralisants actifs (a) charges entraînées par le champ, (b) charges entraînées par un flux d'air

II.2.2.3.2. Neutralisants statiques passifs

Le plus simple de tous les dispositifs ionisants est l'ioniseur passif, qui consiste en un ou plusieurs fils minces mis à la terre, ou plus souvent une rangée de pointes conductrices mises à la terre placées à quelques centimètres du matériau chargé. Le champ provenant de la charge sera déformé par les points et peut dépasser dans une petite région en amont des points le champ de décomposition, entraînant une décharge couronne. Les ions de polarité opposée se

déplaceront vers le matériau chargé et neutraliseront en partie sa charge. Il est intéressant de noter que l'électrode à laquelle l'ionisation a lieu est au potentiel de la masse. Mais l'intensité du champ devant l'électrode peut être encore élevée. Une fois de plus, nous voyons que l'ionisation n'est pas causée par une haute tension, mais par une force de champ élevée [2].

Les ioniseurs passifs fonctionnent aussi bien avec des charges positives que négatives, mais ils souffrent du fait que la décharge couronne s'arrête à un certain niveau de charge, laissant une charge de repos non neutralisée. Les ioniseurs passifs sont donc principalement utilisés lorsque l'objectif est d'éliminer des charges gênantes importantes et où une charge de repos mineure est acceptable.

Parfois, les ioniseurs passifs sont fabriqués comme des brosses de fibres de carbone qui balaient le matériau chargé. Un contact direct entre la brosse et la charge le matériau n'améliore pas l'efficacité de la neutralisation. Les charges ne sont pas "essuyées" du matériau, mais neutralisées par des ions d'air chargés de manière opposée, et par conséquent, la brosse mise à la terre doit être maintenue à une (petite) distance de la surface chargée [2].

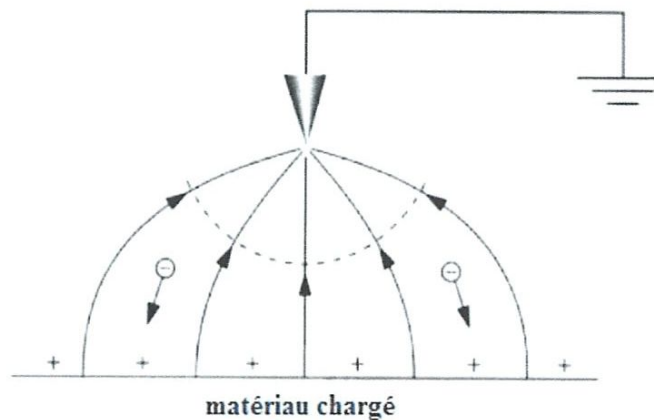


Figure II.5: Ioniseur passif

II.2.2.3.3. Neutralisants statiques nucléaires

Un éliminateur statique nucléaire utilise l'émission de particules alpha provenant de la désintégration d'une source nucléaire pour générer de l'air ionisé. Comme les particules alpha sont émises par la source, elles frappent les molécules d'air qui s'ionisent ensuite. Les deux polarités des ions sont produites dans cette ionisation [43].

✚ Ionisation radioactive

Les particules alpha sont émises par un atome radioactif en décomposition avec des énergies de l'ordre de 4-8 MeV. En route dans l'air, une particule alpha va faire tomber les électrons des molécules d'air neutres au prix d'environ 34 eV pour chaque collision réussie. Après avoir parcouru une distance de 2 à 7 cm, la particule alpha a perdu son énergie (et sa vitesse) et produit environ 200 000 paires d'ions le long de sa trajectoire [2].

✚ Ionisation de champ

Si l'air est exposé à un champ électrique, les ions (créés par le rayonnement naturel) se déplaceront dans le champ et entrèrent en collision avec des molécules (neutres) après avoir parcouru la courbe du libre parcours caractéristique des ions. On pourrait s'attendre à ce que de telles collisions provoquent l'ionisation de la même manière que les collisions entre particules alpha et molécules. Mais même avec les forces de champ les plus élevées possibles, l'énergie des ions à la fin de leur libre parcours moyen n'est pas assez élevée pour libérer un électron. Les électrons, d'autre part, libérés par l'ionisation radioactive naturelle, se déplaceront également sous l'action du champ [2].

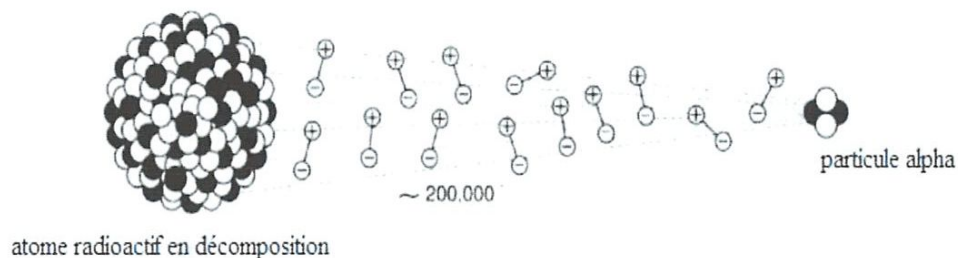


Figure II.6: Ionisation par rayonnement alpha

II.3. Neutralisation par décharge couronne

La décharge couronne est largement utilisée car elle permet de produire facilement et économiquement des ions bipolaires. La décharge par effet de couronne AC crée une zone ionisée à proximité d'une électrode haute tension à fil, à lame ou à aiguille. Techniquement il existe deux types de neutralisateurs couronne, plus généralement appelés "éliminateurs

statiques", ceux qui utilisent le champ électrique pour déplacer les ions de la source à l'objet chargé et ceux qui utilisent des gaz circulant (air) pour déplacer un nuage ionique bipolaire au voisinage de l'objet chargé, où le champ sélectionnera les ions appropriés pour réaliser la neutralisation.

Les ioniseurs statiques utilisant la décharge couronne pour créer les ions neutralisants, qu'ils soient actifs ou passifs, avec ou sans flux d'air, sont les plus utilisés, principalement, à cause de leur simplicité, faible coût mais aussi la non émission de radiations. La neutralisation par décharge couronne consiste à créer un nuage ionique bipolaire qui, sous l'effet du champ ou par un flux d'air, se propage vers la surface chargée où les charges se neutralisent sélectivement. Suite aux forces de coulomb, les charges de même signe se repoussent et les charges de signe contraire sont attirées et se neutralisent par recombinaison [41].

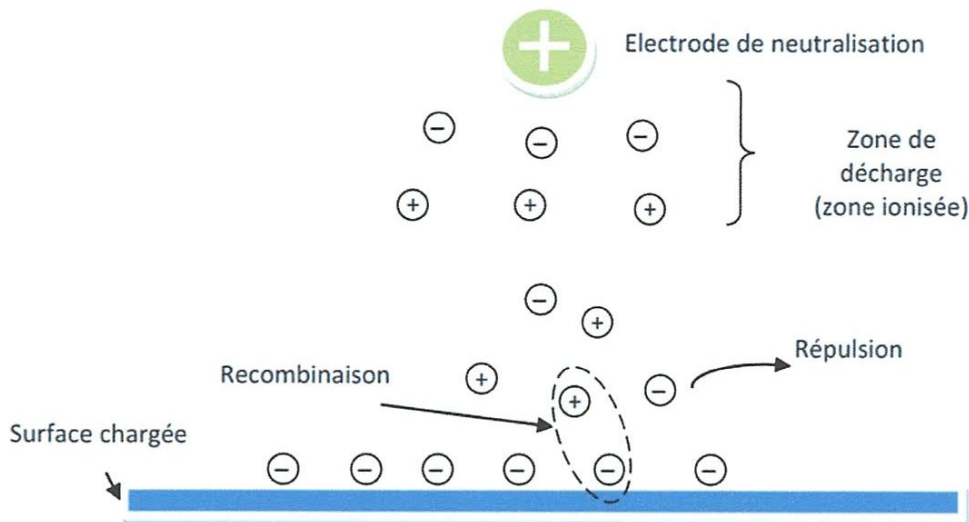


Figure II.7: Principe de la neutralisation par décharge couronne

Ce simple principe constitue la base du processus de neutralisation mais ne traduit pas réellement la complexité du phénomène de neutralisation. Cette complexité vient en premier lieu de la décharge elle-même, puis de l'interaction des charges aussi bien le long de la zone de dérive que sur la surface de l'isolant chargé. De ce fait, de multiples paramètres entrent en jeu et influent sur le processus de neutralisation. Il est bien établi que la décharge couronne, et la distribution de la densité de charges dans l'intervalle d'air, sont tributaires de la tension appliquée, de la fréquence, de la distance, de l'humidité et de la pression. D'autre part,

l'exposition d'une surface chargée à une décharge couronne peut effectivement la neutraliser mais elle peut aussi être rechargée ou faiblement neutralisée du fait, par exemple, de la durée d'exposition ou suite à l'amplitude inadéquate de la tension appliquée. La corrélation entre ces paramètres, pour une meilleure neutralisation, et la connaissance de leurs effets constituent globalement les objectifs des études menées dans ce domaine [41].



Chapitre 03

Neutralisation des cheveux



Chapitre III

Neutralisation des cheveux

III.1. Introduction

La neutralisation des charges est une opération clé dans de nombreux processus électrostatiques. Une vaste gamme de neutraliseurs de charge a déjà été développée pour diverses applications: éliminer les risques d'électrocution et d'inflammation, éviter les décharges électrostatiques susceptibles d'affecter le fonctionnement des équipements électroniques, de réduire les forces d'adhérence électrostatique susceptibles de coller les matériaux granulaires dans les convoyeurs pneumatiques...etc. Parmi les techniques de neutralisation des charges sur la surface des isolants, la décharge couronne est très souvent utilisée. Cependant, avec la possibilité de se développer en une décharge complète (arc), il était nécessaire de trouver une solution qui peut palier à ce problème. La décharge à barrière diélectrique (DBD) offre un avantage important celui d'empêcher la transition à l'arc. Elle constitue ainsi une alternative très intéressante à la décharge couronne afin de neutraliser en toute sécurité la charge indésirable [35].

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de l'étude de la neutralisation des charges sur des cheveux, naturels et artificiels, moyennant une décharge à barrière –DBD. L'étude comprend la caractérisation des cheveux par mesure du déclin de potentiel de surface, après quoi, une identification des sources responsables de la génération des charges. Ensuite, la neutralisation des cheveux par une décharge à barrière avec ou sans flux d'air a été donc étudiée.

III.2. Matériaux étudiés et méthodes expérimentales

III.2.1. Description

Pour cette étude nous avons utilisé trois types des cheveux (Fig.III.1): des cheveux naturels de couleur noire, un postiche long de forme bouclé et de couleur noir, des cheveux d'extension de couleur blanche. Afin d'identifier les mécanismes responsables de la génération des charges sur les cheveux, on a mesuré le potentiel de surface dans deux situations : cheveux soumis à un séchoir seul et cheveux avec brossage seul.

La figure III.1 représente les matériaux utilisés pour cette étude : (a) cheveux naturels, (b) un postiche noir, (c) Extension, (d) film PVC.



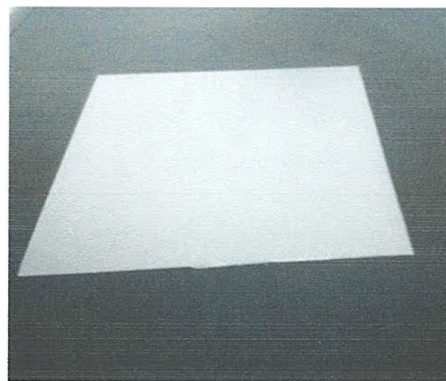
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.1: Matériaux utilisés dans cette étude : (a) cheveux naturels, (b) un postiche noir, (c) Extension, (d) film PVC.

Au cours de cette étude, les échantillons étaient placés sur plaque reliée à la terre, susceptible de faire un déplacement aller-retour (Fig.III.2). Après que cette étude de chargement est achevée, les échantillons ont été neutralisés à travers un passage sous un système d'électrode DBD (présenté ci-dessous) pour ensuite en mesurer le potentiel résiduel après neutralisation.

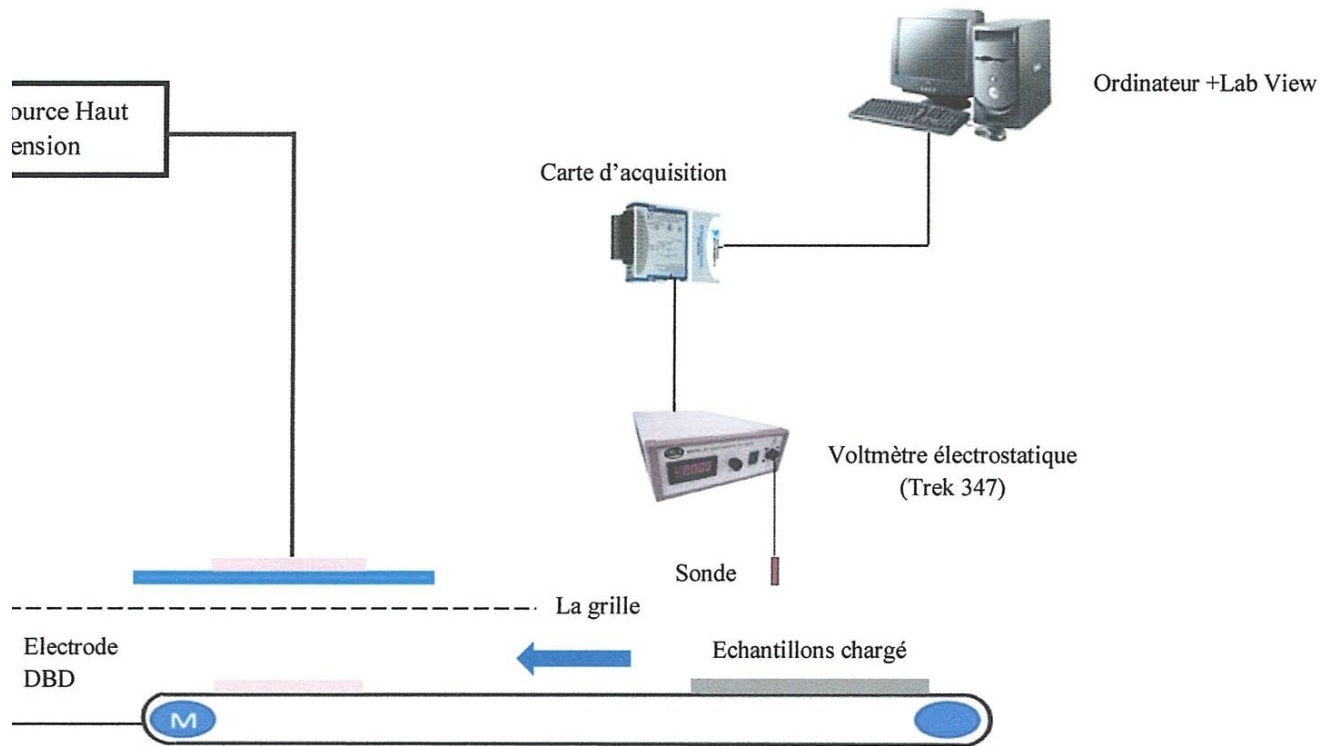


Figure III.2: Représentation schématique de la configuration du chargement et neutralisation des matériaux.

III.2.2. Système de chargement

Pour le chargement des matériaux on a utilisé deux mécanismes :

- Par un flux d'air à l'aide d'un séchoir, dans cette étape nous avons utilisés trois marques de séchoir le premier est de marque Philips (AC 220-240V 50/60Hz 2300 W) ce type du sèche-cheveux génère un flux d'air pouvant atteindre 105km/h. Le deuxième est de marque Sonashi (AC 220-240V 50/60Hz 2000W) et le dernier est un sèche-cheveux de voyage du marque Selecline RW-710 (AC 50/60Hz 1200 W).
- Par frottement à l'aide d'une brosse. Pour charger les cheveux blancs nous avons utilisé une brosse provisionnelle (Turquie brosse à cheveux Vepa MASTER 20).

A la fin du chargement, le potentiel de surface a été mesuré par une sonde reliée à un voltmètre électrostatique.

La figure III.3 représente le matériel de coiffure utilisé pour le chargement des cheveux pendant ce travail: (a) séchoir du marque Philips, (b) séchoir du marque Selecline, (c) séchoir du marque Sonashi, (d) la brosse des cheveux.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.3: Matériel de coiffure utilisé dans cette étude.

III.2.3. Système de neutralisation

Le système de neutralisation est composé d'une configuration plan – plan de deux électrodes métalliques où l'électrode supérieure est intimement collée à un isolant en verre (Fig.III.4). Dans ce cas les deux électrodes sont soumises à une tension alternative 50Hz et la masse respectivement pour l'électrode supérieure et inférieure. L'isolant en verre de forme carré et d'épaisseur 4mm, placée à 22 mm de la plaque à la terre, joue dans ce cas le rôle de la barrière diélectrique. Une grille métallique reliée à la terre est placée à 3mm juste au-dessous de la barrière diélectrique et à une distance de 19mm de la plaque inférieure reliée à la terre. La décharge aura lieu alors entre le verre et la plaque mise à la terre, sans qu'il ait une

transition d'arc. Cela offre plus de sécurité à l'équipement en évitant le risque de décharge dangereuse. L'électrode a été alimenté par transformateur haute tension (tension nominal est $2 \times 220 / 100 \text{KV} / 200 \text{V}$, puissance nominale est 5 KVA) utilisé en mode AC. Ce transformateur est commandé par une unité de commande (OT 276) avec l'utilisation du la DMI 551 (Digital Measuring Instrument) qui est outil de la réception et affichage des mesures, réglable suivant le mode de test AC.

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

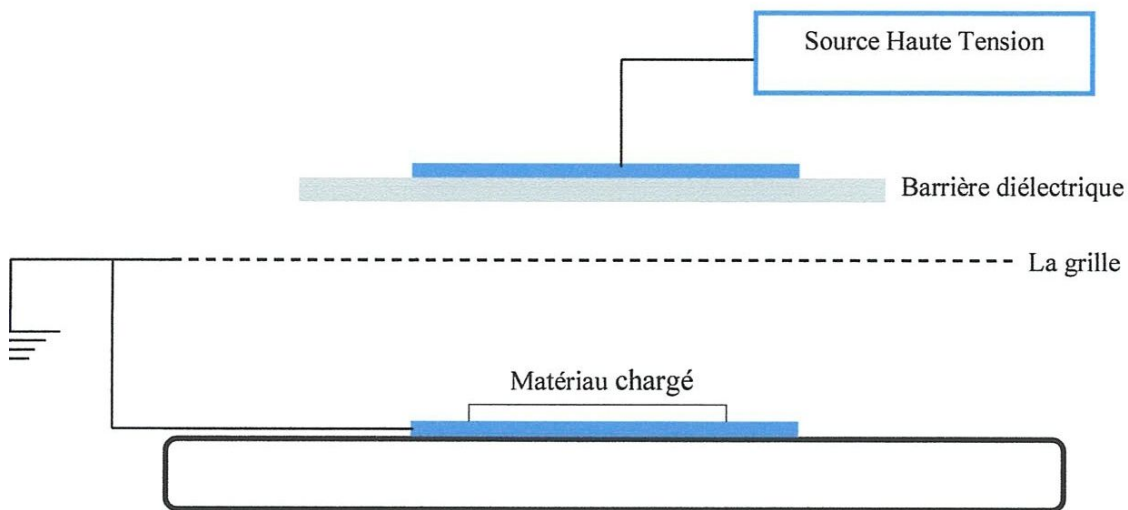


Figure III.4: Schéma du montage du système de neutralisation.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. Caractérisation des matériaux

Après chargement des matériaux par flux d'air à l'aide d'un séchoir pendant 3 min, l'échantillon est transféré sous une sonde électrostatique afin de mesurer le déclin potentiel de surface en un seul point (au milieu de la couche). Le principe de la technique de mesure de Déclin de Potentiel de Surface (DPS) consiste à déposer une charge électrique à la surface de

l'isolant, en le soumettant à une décharge couronne, à un faisceau d'électrons ou simplement à un frottement, puis par le biais d'une sonde, utilisant l'annulation du champ, on mesure l'évolution du potentiel dans le temps en un point, ou tout au long de la surface

Le déclin de potentiel est mesuré pendant 30 min, une durée que nous considérons suffisante pour caractériser le pouvoir de stockage des charges par les cheveux.

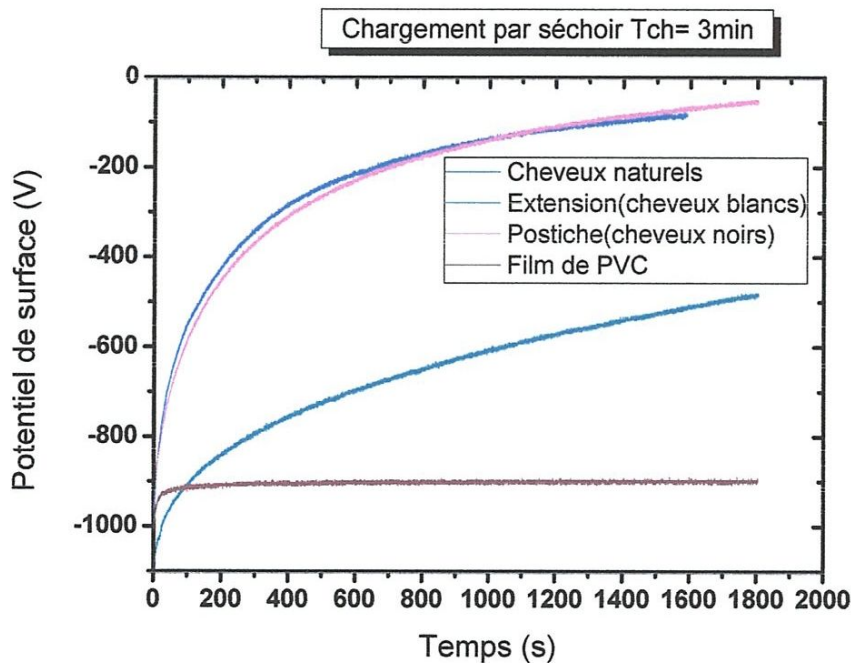


Figure III.5: Courbes de déclin potentiel à la surface de: cheveux naturels, extension, postiche, film de PVC

La figure III.5 montre les courbes de déclin de potentiel à la surface des différents matériaux utilisés dans ce travail: film de PVC, cheveux naturels, postiche et cheveux d'extension. D'après les courbes, on remarque les trois types de cheveux sont capable de stocker une charge électrique à des durée non négligeables. Ils se comportent alors en isolant particulièrement l'extension (cheveux blancs). Le postiche a plutôt un comportement qui se rapproche de celui des cheveux naturels. Ce résultat important nous permettra d'effectuer l'étude sur ce type postiche sans avoir besoin de procurer des cheveux naturels.

III.3.2. Identification des mécanismes de génération des charges sur les cheveux

a. Usage d'un séchoir seul

Le tableau III.1 représente les résultats expérimentaux de chargement des cheveux par flux d'air avec l'utilisation d'un séchoir seul. Ces essais ont été répétés trois fois pour une confirmation des résultats. Pendant cette expérience, Les cheveux ont été séchés pendant 5 secondes à chaque fois. Dans cette manipulation on a utilisé les cheveux blancs (extension) et le séchoir de la marque Philips.

Tableau III.1: Cheveux chargé par séchoir seul

Temps de séchage (s)	Essai 01 (P1) [V]	Essai 02 (P2) [V]	Essai 03 (P3) [V]	Moyenne
5	-1000	-1300	-1560	-1286,66667
10	-2000	-2400	-1400	-1933,33333
15	-1500	-2300	-1700	-1833,33333
20	-1500	-1600	-1300	-1466,66667
25	-1300	-1600	-1500	-1466,66667
30	-1400	-1600	-1400	-1466,66667
35	-1500	-1700	-1500	-1566,66667
40	-2000	-1900	-1500	-1800
45	-1800	-1600	-1600	-1666,66667

Pour comparer les résultats du tableau précédent (Tableau III.1), nous avons chargé les films de PVC par le même séchoir (chargement avec flux d'air). Chaque film a un diamètre 7cm ×7cm est soumis au même temps de chargement. Le tableau suivant tableau III.2 donne les résultats de chargement du film PVC pendant 3 essais. La figure III.5 présente la variation du potentiel de surface sur cheveux artificiels et film PVC.

Tableau III.2: PVC chargé par séchoir seul

Temps de séchage (s)	Essai 01 (P1) [V] avant (-77)	Essai 02 (P2) [V] (avant (-160)	Essai 03 (P3) [V] (avant (-154)	Moyenne
5	-340	-600	-564	-501,333333
10	-850	-600	-830	-760
15	-967	-880	-983	-943,333333
20	-967	-1040	-1040	-1015,66667
25	-949	-1100	-1106	-1051,66667
30	-1087	-1300	-1278	-1221,66667
35	-1200	-1200	-1240	-1213,33333
40	-1200	-1300	-1300	-1266,66667
45	-1260	-1300	-1300	-1286,66667

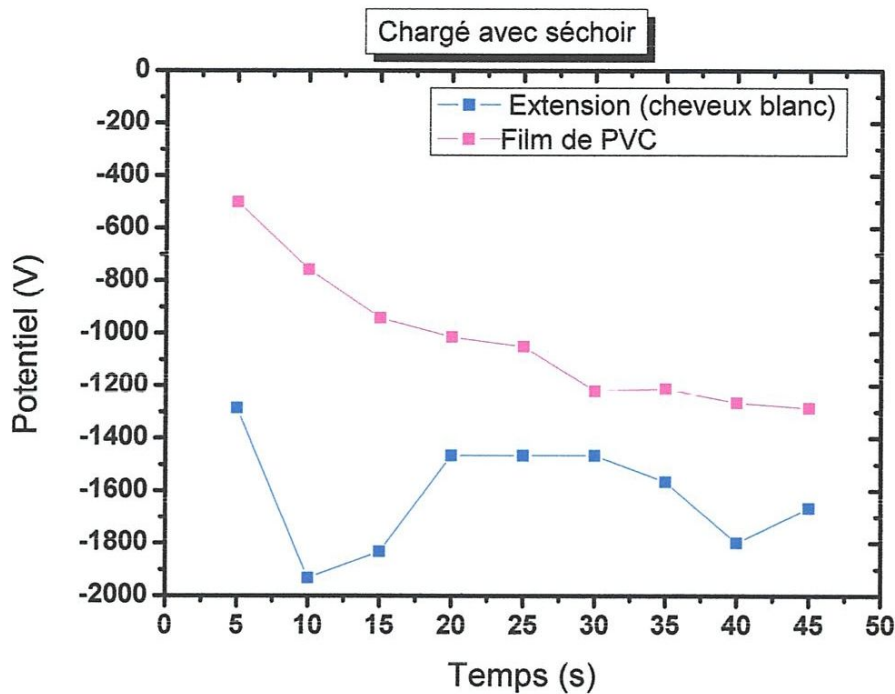


Figure III.6: Variation du potentiel de surface en fonction du temps pour: cheveux et film de PVC chargé avec un séchoir

D'après les résultats obtenus on remarque que le séchoir à lui seul est capable de charger négativement les matériaux. Ainsi, plus le temps de séchage augmente, plus les charges s'accumulent sur les matériaux, expliquant donc les courbes de la Fig.III.6. De ce fait, un des mécanismes responsable d'apparition des charges est le séchoir lui-même.

b. Brossage seul

Le tableau III.3 et la figure III.7 sont les résultats obtenus du chargement des cheveux blanc par frottement suite au brossage. Le tableau montre les résultats de trois essais avec leur moyenne.

Tableau III.3: Cheveux chargé par brosse seul

Nombre de balayage [fois]	Essai 01 (P1) [V]	Essai 02 (P2) [V]	Essai 03 (P3) [V]	Moyenne
1	1400	1500	900	1266,66667
2	1600	1700	1500	1600
3	1800	1700	1100	1533,33333

4	2000	1400	1300	1566,66667
5	1700	1400	1300	1466,66667
6	2100	1500	1300	1633,33333
7	2000	1100	1400	1500
8	2200	1700	1000	1633,33333
9	2000	1700	1300	1666,66667
10	2300	1800	1300	1800

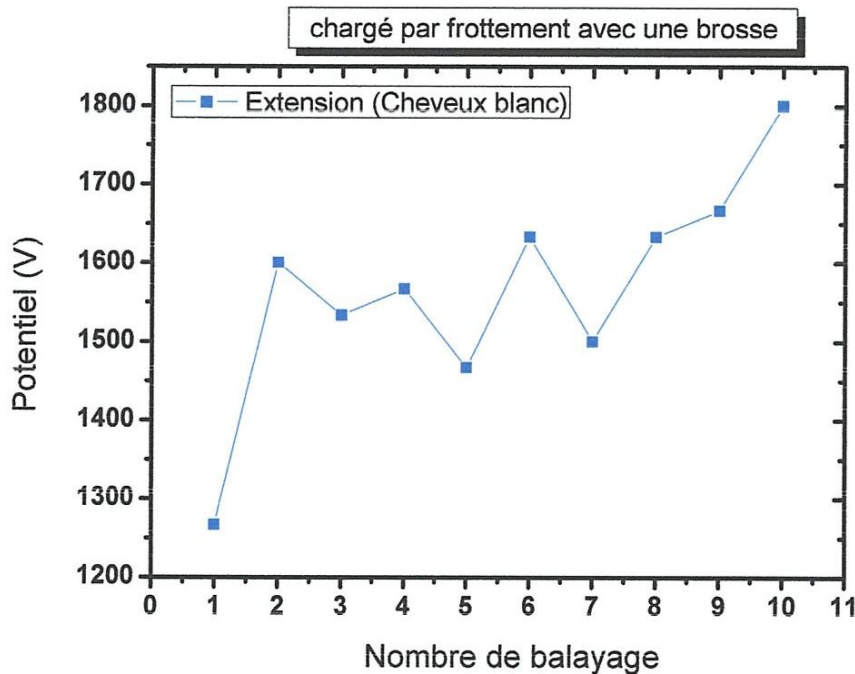


Figure III.7: Variation du potentiel de surface en fonction du nombre de balayage: Extension (cheveux blancs) chargée d'une brosse

La figure III.7 représente la variation du potentiel à la surface des cheveux en fonction de nombre de balayage. Les cheveux ici sont chargés par brossage (chargement par frottement) donnant lieu à une charge positive. Selon la figure, le potentiel augmente avec l'augmentation du nombre de passage de la brosse. Cependant, l'augmentation du niveau de charge avec le nombre de passage de la brosse n'est pas régulière en raison, peut-être, de la variation de la force exercée lors du brossage.

c. Brossage et séchage à la fois

Etant donné que la charge générée par le séchoir est négative et que la charge générée par la brosse est positive, on peut se demander sur la charge résultante des deux processus à la

fois. Pour répondre à cette question on a réalisé le séchage et le brossage simultanément et on a mesuré la charge résultante.

Les tableaux suivants représentent les résultats expérimentaux de chargement des cheveux blancs par les deux mécanismes au même temps (frottement à l'aide d'une brosse et flux d'air à l'aide d'un séchoir).

Dans cette étude on a comparé entre trois marques du séchoir Philips, Sonashi, Selecline. Le tableau III.4 représente les résultats pour la marque Philips, le tableau III.5 représente les résultats pour la marque Sonashi et le tableau III.6 représente les résultats pour la marque Selecline.

Tableau III.4: Cheveux chargé par séchoir (Philips) et brosse

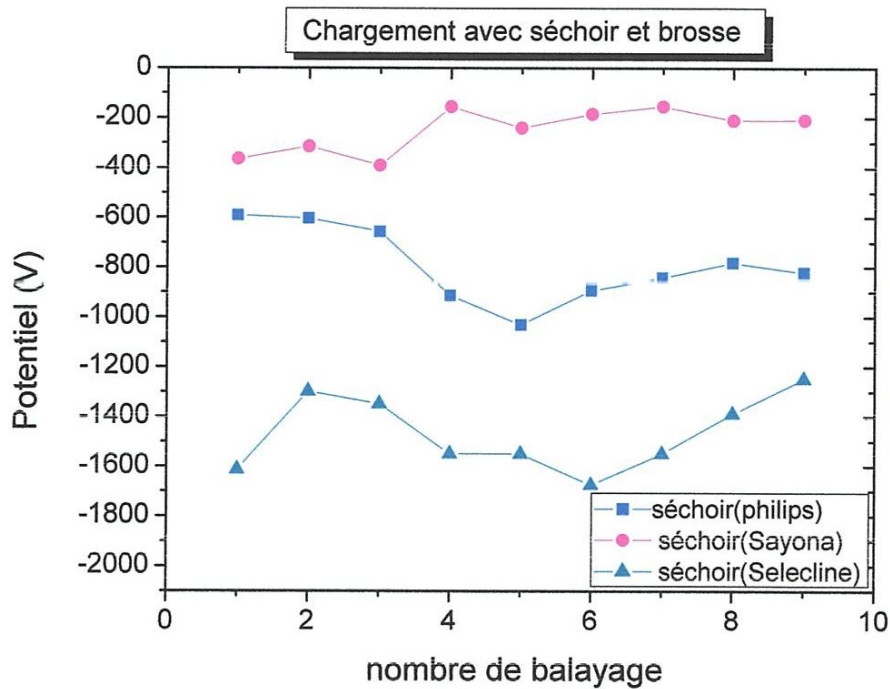
Nombre de balayage	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Essai 04	moyenne
1	-1600	-250	-377	-1150	-592,333333
2	-1500	-500	-415	-900	-605
3	-800	-512	-680	-782	-658
4	-800	-896	-650	-1200	-915,333333
5	-1080	-946	-720	-1430	-1032
6	-930	-850	-714	-1120	-894,666667
7	-758	-1000	-526	-1000	-842
8	-1700	-1100	-350	-900	-783,333333
9	-1650	-999	-766	-700	-821,666667

Tableau III.5: Cheveux chargé par séchoir (Sonashi) et brosse

Nombre de balayage	Essai 01	Essai 02	Essai 03	Moyenne
1	-304	-703	-90	-365,666667
2	-221	-500	-224	-315
3	-416	-314	-447	-392,333333
4	70	-528	-10	-156
5	-200	-483	-40	-241
6	-200	-233	-124	-185,666667
7	-300	-306	140	-155,333333
8	-419	-421	205	-211,666667
9	-440	-590	400	-210

Tableau III.6: Cheveux chargé par séchoir (Selecline) et brosse

Nombre de balayage	Essai 01	Essai 02	moyenne
1	-2000	-1227	-1613,5
2	-1700	-900	-1300
3	-1600	-1100	-1350
4	-1500	-1600	-1550
5	-1300	-1800	-1550
6	-1250	-2100	-1675
7	-1300	-1800	-1550
8	-1280	-1500	-1390
9	-900	-1600	-1250

**Figure III.8:** Variation de potentiel de surface en fonction du nombre de balayage

La figure III.8 présente les résultats de la combinaison entre les deux mécanismes de chargement (flux d'air et brosse), tout en comparant les trois marques de sèche-cheveux. Les charges déposées sur les cheveux sont négatives pour les trois marques. Cependant, on constate que la quantité de charges créées dépend de la marque du sèche-cheveux. Par exemple, on voit que la marque Selecline donne la quantité la plus importante, puis la marque Philips et enfin la marque Sonashi.

III.4. Neutralisation des charges

III.4.1. Influence de la tension

Après chargement, l'échantillon est transféré sous une sonde électrostatique afin de mesurer le déclin de potentiel de surface dans un seul point (au milieu de la couche). Juste après, l'échantillon est déplacé sous une électrode de neutralisation (électrode de la DBD).

Dans cette expérience nous avons utilisé des cheveux blanc chargé par frottement avec le balayage à l'aide d'une brosse. Dans cette étude, visant la neutralisation en position fixe, l'objectif était de connaître l'influence de la tension en fonction du taux de neutralisation. Le taux de neutralisation est le rapport du potentiel juste avant et après la neutralisation, donné par la formule suivante :

$$N_r(\%) = \left(1 - \frac{V_{après}}{V_{avant}}\right) \times 100 \dots\dots\dots (III.1)$$

Le tableau III.7 donne les résultats expérimentaux du chargement des cheveux par frottement où le potentiel avant la neutralisation est 3000 V.

Tableau III.7: Taux de neutralisation pour différentes tensions

Tension de neutralisation	V après (essai 1)	V après (essai 2)	V après (essai 3)	V après (essai 4)	Taux de neutralisation
8	1200	1700	1900	1600	46,6666667
9	260	280	200	246,666667	91,7777778
10	30	30	-16	14,6666667	99,5111111
11	100	-140	-75	-38,3333333	101,277778
12	-110	-115	-130	-118,333333	103,944444
13	-135	-146	-51	-110,666667	103,688889

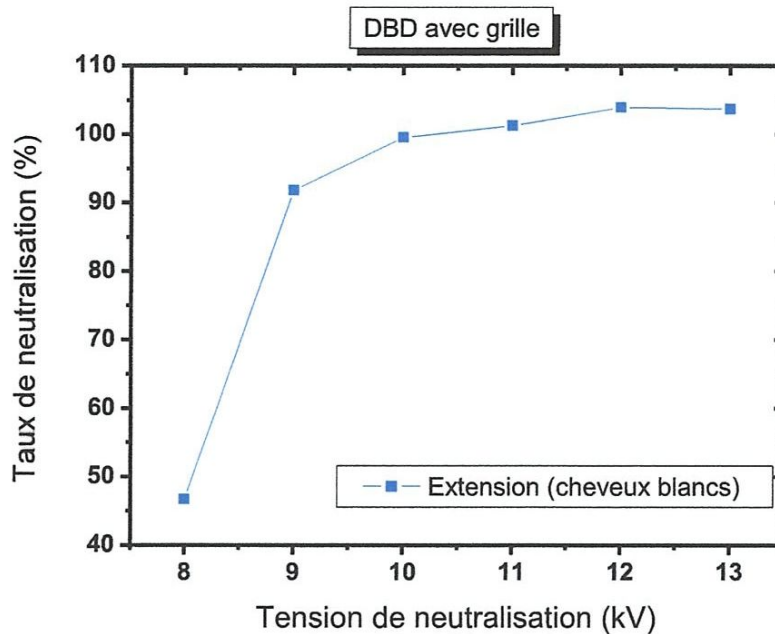


Figure III.9: Taux de neutralisation en fonction de la tension

La figure III.9 montre l'évolution du taux de neutralisation en fonction de la tension appliquée. Le processus de neutralisation est de plus en plus amélioré en augmentant l'amplitude de la tension appliquée à l'électrode DBD.

III.4.2. Influence du temps de neutralisation

Dans cette expérience nous avons utilisé des cheveux blanc chargé avec le balayage à l'aide d'une brosse. Ces échantillons neutralisés à une distance de 10 cm de l'électrode de neutralisation avec une grille et avec flux d'air par l'utilisation d'un séchoir de la marque Philips installé à une distance de 10.5 cm de l'électrode de neutralisation. La tension avant neutralisation est 3kV pour toutes les expériences.

Tableau III.8: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 10s

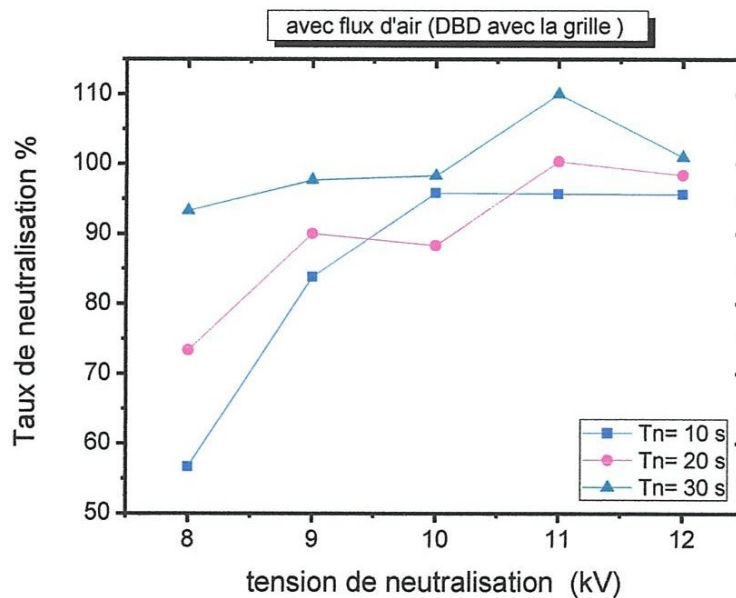
Tension de neutralisation	V après (essai 1)	Taux de neutralisation
8	1300	56,6666667
9	486	83,8
10	125	95,8333333
11	128	95,7333333
12	130	95,6666667

Tableau III.9: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 20s

Tension de neutralisation	V après (essai 1)	Taux de neutralisation
8	800	73,3333333
9	300	90
10	350	88,3333333
11	-10	100,3333333
12	48	98,4

Tableau III.10: Taux de neutralisation pour différentes tensions pour un temps de neutralisation 30s

Tension de neutralisation	V après (essai 1)	Taux de neutralisation
8	200	93,3333333
9	70	97,6666667
10	50	98,3333333
11	-300	110
12	-30	101

**Figure III.10:** Taux de neutralisation en fonction de la tension

La figure III.10 représente le taux de neutralisation en fonction de la tension et le temps de neutralisation. On constate que plus le temps augmente le processus est amélioré et

ce notamment pour les faibles tensions. Pour le cas des tensions relativement élevées, l'influence des temps est non significative puisque les résultats deviennent très proches.

Donc on peut dire que il y'a une importance du temps de neutralisation pour l'amélioration du taux de neutralisation en faibles tensions.

III.5. Charges générées par un sèche-cheveux

Afin de quantifier la charge générée par un séchoir seul, on a procédé à la mesure du potentiel de surface d'une plaque soumise à un flux d'air issu du séchoir de marque Philips. La figure III.11 montre le montage de principe de cette expérience. Le déroulement de l'expérience est comme suit : le séchoir souffle sur la plaque métallique reliée à la terre sur une des extrémités tandis qu'à l'autre extrémité une sonde électrostatique enregistre les variations du potentiel et transmet les mesures à un ordinateur.

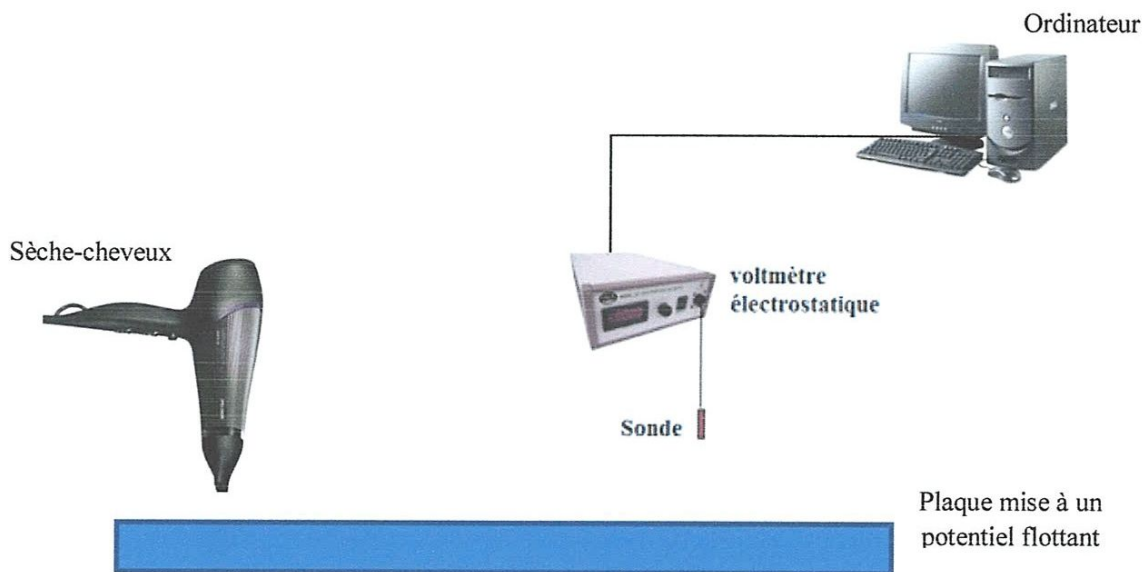


Figure III.11: Schéma du montage du système d'acquisition

La figure III.12 représente les résultats de l'acquisition des charges créées par le séchoir essais du test continu.

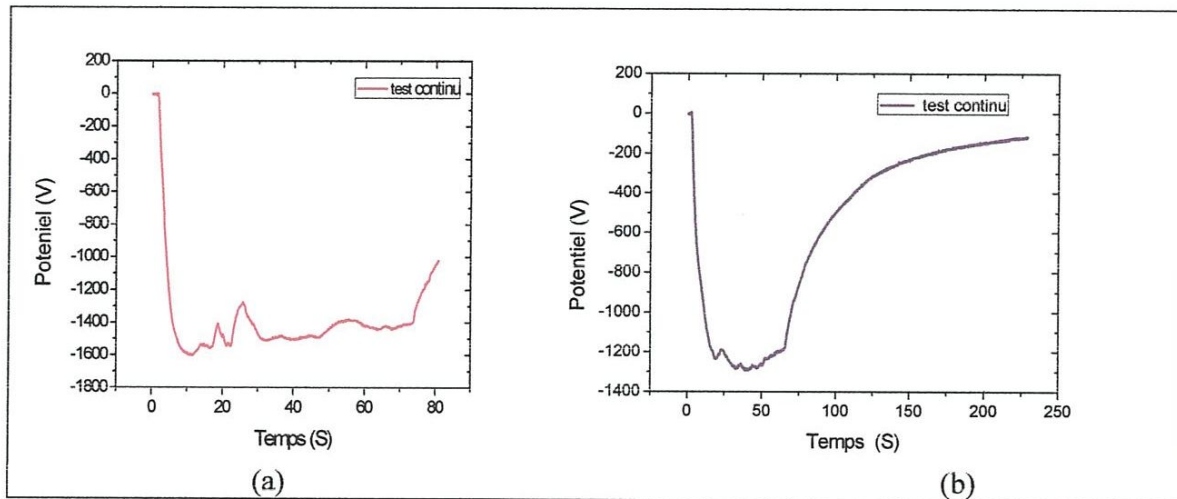


Figure III.12: Potentiel de la plaque générée par séchoir

La figure III.13 représente le potentiel de la plaque générée par le séchoir pour un fonctionnement intermittent (teste discontinu) : (a) chargement par flux d'air pendant 1 min, une pose de 30 s, (b) chargement avec flux d'air pendant 30 s et une pose de 30 s, (c) chargement pendant 30 s par flux d'air et une pose de 1 min.

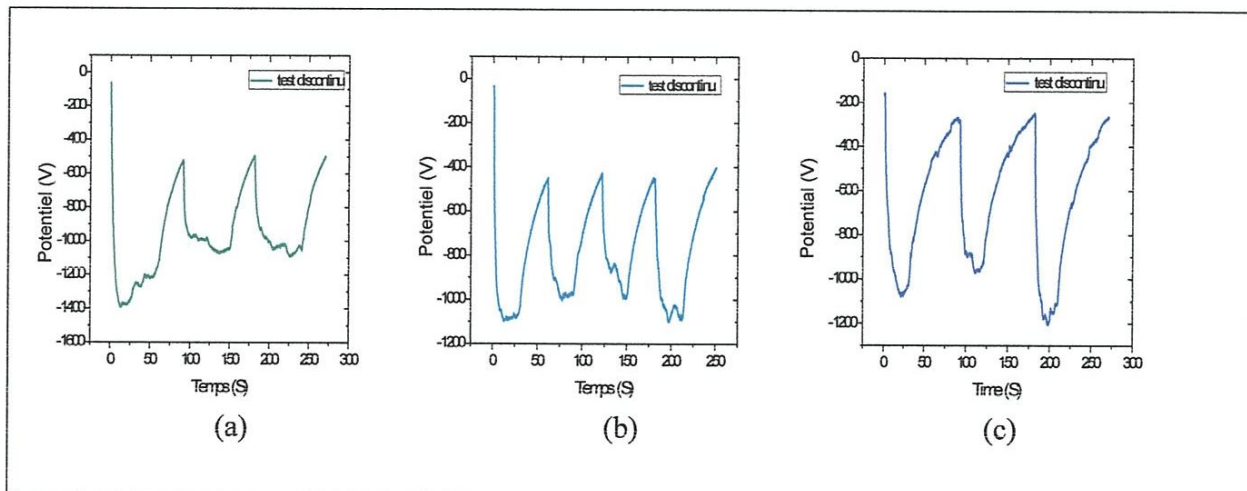


Figure III.13: Acquisition par séchoir du test discontinu



Conclusion générale



Conclusion générale

Le travail entrepris dans le cadre de ce mémoire a un double objectif:

- i. L'origine des différents mécanismes d'apparition des charges électrostatiques sur les cheveux. Le chargement des cheveux lors de la coiffure est un phénomène gênant, que les constructeurs des différents instruments de coiffure tentent d'éliminer. Les résultats de mesures nous ont montré que les charges avaient pour origine le frottement la brosse avec les cheveux au cours du brossage. C'est donc un phénomène triboélectrique qui donne lieu à une partie de la charge. L'autre partie vient en réalité du sèche-cheveux lui-même, notamment celui destiné à éliminer des charges quant utilisé seul. Cependant, l'usage simultané de la brosse et du sèche-cheveux réduit plus au moins le niveau de charge.
- ii. Nous avons étudié et proposé des solutions pour l'élimination de ces charges indésirables et non souhaitables en toute sécurité. A travers l'application d'une décharge à barrière diélectrique, nous avons pu éliminer la quasi-totalité des charges accumulées sur les cheveux. Il convient donc de développer un système de sèche cheveux intégrant une électrode DBD afin d'éliminer les charges au cours de la coiffure.

Les résultats expérimentaux de neutralisation nous ont révélé que:

L'électrode DBD avec grille métallique peut éliminer plus de 95% de la charge initiale, en fonction de la tension l'électrode active.

L'augmentation de l'amplitude de la tension appliquée à l'électrode de DBD améliore la neutralisation.

Le taux de neutralisation est amélioré par l'augmentation du temps d'application de la DBD.



Bibliographie



Bibliographie

- [1] HAMMI Tarik, “Etude de méthodes de mesure et réalisation d’un banc de test pour l’évaluation des propriétés électrostatique des textile”, Thèse de Doctorat, Université des Science et Technologies de Lille, avril 2005
- [2] NIELS Jonassen, “Electrostatics”, Editions: Springer Science & Business Media, 2013
- [3] Teysse G., and Laurent C., “Charge transport modeling in insulating polymers: From molecular to macroscopic scale”, IEEE Transactions Electrical Insulation, Vol. 12, pp. 857-875, 2005
- [4] Sessler, G.M., Figueiredo M.T., and Ferreira G.F.L., “Models of charge transport in electron-beam irradiated insulators”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 11(2), pp. 192-202, 2004
- [5] BELLEL Azzedine, “Traitement de surface de polymères par décharge couronne et plasma”, Thèse de Doctorat, Université Mentouri, Constantine, 2004.
- [6] C. Zhong, Y. Jiang, F. Guo, P. Liu, W. Wu, and J. Liao, “Effect of Humidity on Transport Mechanism in Ag/7,7,8,8-Tetracyanoquinodimethane Bilayer Films”, Japanese Journal of Applied Physics Vol. 45, N°. 4A, pp. 2722–2725, 2006
- [7] Von Berlepsch. H., “Interpretation of surface potential kinetics in HDPE by a trapping model”. Journal of Physics D: Applied Physics. Vol. 18, pp.1155-1170, 1985.
- [8] "Polymère" Microsoft ® Encarta ® 2007. [CD]. Microsoft Corporation
- [9] Moingeon Firmin, “Synthèse de polymères dendronisés par polymérisation anionique vivante et fonctionnalisation de leur surface”, Thèse de Doctorat, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 2006.
- [10] Tomalia D.A., and Fréchet J. M .J. “Dendrimers and other Dendritic Polymers”, Wiley, New York, 2001
- [11] Jouenne Stephan , “Structuration et renforcement du polystyrène par des copolymères styrène/butadiène a gradient de composition”, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2005
- [12] “ Différentes types de matière plastique ”
[http:// cap-sciences.net/upload/differents_plastiques](http://cap-sciences.net/upload/differents_plastiques)
- [13] [http:// www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci116/notes_cours/5.2polymeres.pp6](http://www.civil.usherbrooke.ca/cours/gci116/notes_cours/5.2polymeres.pp6).
- [14] Fontanille M., Vairon P., “ Polymérisation ”, Techniques de l'ingénieur, Traité plastiques et composites,(A3 040)

- [15] HEROUS Lazher, “Etude des mécanismes d’écoulement de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesure électrostatique de déclin ”, Thèse de Doctorat d’état, Université Badji mokhtar - Annaba, 2006
- [16] DUTRIEZ Cédric, “corrélations entre les propriétés diélectrique et dynamique des polymères ;influence de la température ”, Thèse de Doctorat, l’Ecole Centrale de Lyon Et de l’Ecole Doctorale des Matériaux de Lyon, 2004
- [17] 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
- [18] HOLME I. , MCINTYRE J.E. , and SHEN Z.J, “Electrostatic charging of textiles The Textile Institute”, Textile process, Vol 1, pp. 28, 1998
- [19] DURAND E, “ Electrostatique – I ” , les distributions Masson, 1964
- [20] DURAND E, “ Electrostatique – II ”, Problèmes généraux, conducteurs Masson, 1966
- [21] GUNTORO Nanang Arif, “Modélisation de la dynamique des neutres et de la cinétique chimique dans les réacteurs plasmas de dépollution des gaz d’échappement ”, Thèse UPS ,2001
- [22] Ducasse O., Eichwald O., Merbahi N., Dubois D., and Yousfi M., “Numerical simulation and comparison with experiment for a positive point to plane corona discharges in dry air”, J. Appl. Phys, Vol 5, pp 1046-1049, 2007
- [23] MONTIJN C., “Adaptive grid simulations of negative streamers in nitrogen in under- and overvolted gaps”, IEEE Trans. Plasma Sci, Vol. 33, pp. 260-261. 2005
- [24] BENABDELMALEK Sofiane, MESSAOUDI Rafika, “Simulation numérique de la cinétique chimique d’une mixture $N_2/O_2/NO$ par décharge couronne ”, Mémoire de Master, Université Abou-Baker Belkaid – Tlemcen, 2011.
- [25] KHADDOUR Bassem, “Modélisation du champ électrique modifié par la charge d’espace injectée”, Thèse de Doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2006.
- [26] LABREGUE Alexandr, “Etude de décharges électriques dans l’air pour le développement d’actionneurs plasma –Application au contrôle de décollements d’écoulements ”, Thèse de Doctorat , Université de Poitiers, 2005
- [27] NGUYEN Duc Hoang, “Etude des propriétés électriques des élastomères silicones utilisés pour l’isolation électrique ”, Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, 2005

- [28] SAAD Djedjiga, “Effet de la décharge couronne sur les surfaces isolantes et les surfaces métalliques”, Mémoire de Magister , Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2011.
- [29] Dumitrascu N., and Borcia C., “ Adhesion properties of polyamide-6 fibres treated by dielectric barrier discharge”, Surface and Coatings Technology Vol. 201 pp. 1117–1123, 2006
- [30] Choquet P., “Les traitements plasmas pour les aciers laminés à froid: état de la technique, objectifs pour le future ”, Échange and Coordination Recherche-Industrie, 2003
- [31] BOULEGHLIMAT Oussama, “ Traitement de surfaces de films de polyimide par une décharge à barrière diélectrique”, Thèse de Magidter, université Mentouri de Constantine , 2009.
- [32] NAUDE Nicolas, “ Etude électrique de la physique d’une décharge de Townsend à la pression atmosphérique et de son interaction avec un générateur: Modèle et Expérience”, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, 2005
- [33] CHRISTIAN Sarra Bournet, “ Design et réalisation d’un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surface dans le domaine des biomatériaux”, Mémoire pour l’obtention du grade de maître en sciences, Université de Laval, 2007
- [34] GUAITELLE Olivier, “ Nature de la synergie plasma-photo catalyseur pour la destruction d’un composé organique volatil type: l’acétylène”, Thèse de Doctorat, Ecole polytechnique 2006.
- [35] Moussaoui A., Kachi M., Zouaghi A. and Zouzou N., “Neutralization of charged dielectric materials using a dielectric barrier discharge”, Journal of Electrostatics. Vol. 87, pp.102-109, 2017
- [36] “ Comprendre l’électricité statique”,
<http://www.bde-electrostatique.fr/index.php?IdPage=1413810022>
- [37] “ Static electrocity and static control ”, <https://electrostatics.com/staticelectricity.html>
- [38] “ L’électricité statique un ennemi invisible ”,
<http://www.esdproducts.eu/fr/nouvelles/p/detail/1039eacuteelectriciteacute-statique-un-ennemi-invisible>
- [39] “ Statique electricity ”,<https://www.hanover.com/linec/docs/171-1743.pdf>
- [40] LAURENCE G. Britton , “ Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations”, Editions: Wiley 1999

- [41] KACHI Miloud, “ Caractérisation et contrôle de l’état de charge des matériaux polymères granulaires”, Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2011
- [42] Kachi, M. and L. Dascalescu, “Corona-discharge-based neutralization of charged granular insulating materials in contact with an electrode of opposite polarity”, Journal of Electrostatics, Vol. 76, pp. 246-253, 2015
- [43] DAVID F. Aldis , FANS S. Lai , “ Review of Literature Related to Engineering Aspects of Grain Dust Explosions”, Edition: Science and Education Administration-Agricultural Research United States Department of Agriculture, 1979