

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Kasdi Merbah Ouargla



Faculté des sciences appliquées

Département de génie mécanique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master académique

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: électromécanique

Spécialité: Maintenance Industrielle

Thème

***La prévention contre les charges électrostatiques
résiduelles***

Présenté par: MADANI Yosri

RACHEDI Ryadh

Jury:

BATOCHE Mouna	PRESIDENT	UKM OUARGLA
KHETTABI Rym	EXAMINATEUR	UKM OUARGLA
Dr ROUAGDIA Karim	ENCADREUR	UKM OUARGLA

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions ALLAH tout puissant de nous avoir donné le courage, la force morale et physique, pour achever ce travail.

Qu'il nous soit permis, ici, de dire notre gratitude à ceux qui nous ont donné beaucoup de soins et d'attention à l'élaboration de ce modeste travail et qui nous ont guidés sur le chemin de la réussite, en espérant que ce mémoire soit le reflet de la bonne formation que nous avons reçue.

On tient à exprimer notre profonde gratitude à notre encadreur Dr ROUAGDIA Karim qui nous a conseillé et orienté tout au long de la réalisation de ce Projet.

Les discussions nombreuses et stimulantes que nous avons eues ont indéniablement contribué à éclairer le travail.

On tient également à formuler nos remerciements en signe de gratitude et de reconnaissance aux membres de Jury qui ont pris la peine de lire ce modeste travail, de le corriger et de nous honorer de leur présence et enfin d'évaluer cette recherche.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Merci à tous



Résumé

Les matériaux isolants sont couramment utilisés dans de nombreux domaines, Ils sont appréciés pour leurs grande polyvalence et de leur fiabilité. Cependant, l'accumulation de charges électrostatiques indésirables sur la surface de ces matériaux est l'un des problèmes majeurs qui peuvent causer des dommages importants à l'échelle humaine, industrielle et environnementale. Donc l'élimination de ces charges est une opération essentielle.

Le but de cette étude vise à évaluer l'efficacité de la technique de décharge couronne alternative AC pour éliminer les charges électriques résiduelles présentes sur la surface des polymères isolants sous l'influence de différents facteurs électriques et physiques.

Enfin, nous avons tiré : L'électricité statique présente de nombreux avantages dans le domaine industriel, et elle présente aussi des inconvénients, notamment les charges résiduelles. La neutralisation par décharge de couronne est une technique très efficace et la plus utilisée dans le processus de neutralisation. Les résultats obtenus ont montrés que la haute tension, la distance entre les électrodes et l'humidité ont un effet très important sur le processus de neutralisation ; tandis que la fréquence et la vitesse de neutralisation n'ont pratiquement aucun effet sur le processus de neutralisation.

Mots clés:

Les polymères isolants, électricité statique, décharge couronne, neutralisation.

Abstract

Insulating materials are commonly used in many fields; they are appreciated for their great versatility and reliability. However, the accumulation of unwanted electrostatic charges on the surface of these materials is one of the major problems that can cause significant damage on a human, industrial and environmental scale. So the elimination of these charges is an essential operation.

The aim of this study is to evaluate the effectiveness of the AC alternating corona discharge technique to eliminate residual electrical charges present on the surface of insulating polymers under the influence of different electrical and physical factors.

Finally, we have drawn: Static electricity has many advantages in the industrial field, and it also has disadvantages, including residual charges. Corona discharge neutralization is a very effective and most widely used technique in the neutralization process. The results obtained showed that the high voltage, the distance between the electrodes and the humidity have a very significant effect on the neutralization process; while the neutralization frequency and speed have no effect on the neutralization process.

Key words:

Insulating polymers, static electricity, corona discharge, neutralization

الملخص

تُستخدم المواد العازلة بشكل شائع في العديد من المجالات ، فهي محل تقدير لتعدد استخداماتها وموثوقيتها. ومع ذلك ، فإن تراكم الشحنات الكهروستاتيكية غير المرغوب فيها على سطح هذه المواد هو أحد المشاكل الرئيسية التي يمكن أن تسبب أضرارًا كبيرة على المستوى البشري والصناعي والبيئي. لذا فإن التخلص من هذه الشحنات عملية أساسية. الهدف من هذه الدراسة هو تقييم فعالية تقنية تفريغ كورون المتناوب لإزالة الشحنات الكهربائية المتبقية الموجودة على سطح البوليمار العازل تحت تأثير العوامل الكهربائية والفيزيائية المختلفة. في الأخير استخلصنا النقاط التالية : للكهرباء الساكنة العديد من المزايا في المجال الصناعي ، كما أن لها عيوبًا ، بما في ذلك الرسوم المتبقية. يعد تحييد تفريغ كورون تقنية فعالة للغاية والأكثر استخدامًا في عملية التحييد. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن الجهد العالي والمسافة بين الأقطاب الكهربائية والرطوبة لها تأثير كبير على عملية التحييد. بينما لا يؤثر التردد وسرعة التحييد على العملية.

الكلمات الدالة:

البوليمار العازل ، الكهرباء الساكنة ، تفريغ كورون ، التحييد

Table Des Matières

Remerciements	I
Résumé	II
Table Des Matières	V
Liste des Figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les polymères	
<i>I.1. Introduction</i>	3
<i>I.2. Définition de Polymère</i>	3
<i>I.3. Structure moléculaire des polymères solides</i>	4
<i>I.3.1. Structure amorphe (état vitreux).</i>	5
<i>I.3.2. Structure cristalline</i>	6
<i>I.3.3. Les thermoplastiques</i>	6
<i>I.3.4. Les thermodurcissables</i>	7
<i>I.4. Classification des polymères</i>	7
<i>I.4.1. Selon leur origine</i>	7
<i>I.4.2. Selon Leur Masse Moléculaire</i>	8
<i>I.4.3. Selon leur origine selon la composition chimique de leur chaine squelettique</i>	8
<i>I.4.4. Selon la régularité de l'enchaînement de motifs</i>	9
<i>I.4.5. Selon le nombre de type d'unités répétitives</i>	10
<i>I.4.6. Selon l'architecture de leur chaine</i>	10
<i>I.4.7. Selon leurs propriétés thermomécaniques</i>	10
<i>I.4.8. Selon leur cristallinité</i>	11
<i>I.4.9. Selon leur état physique</i>	12
<i>I.4.10. Selon leur tacticité</i>	12
<i>I.4.11. Selon l'aromaticité de leur chaine squelettique</i>	12
<i>I.4.12. Selon leur conductivité thermique et/ou électrique</i>	12
<i>I.4.13. Selon leur charge ionique</i>	13
<i>I.4.14. Selon leur stabilité thermique</i>	13
<i>I.5. Applications des polymères</i>	13
<i>I.6. Caractéristiques des polymères</i>	13
<i>I.6.1. Structure du polymère:</i>	13
<i>I.6.2. Type de polymères:</i>	14
<i>I.7. Les bio-polymère</i>	14
<i>I.8. Les matériaux composites à matrice polymère</i>	16
<i>I.8.1. Définition d'un matériau composite</i>	16
<i>I.9. Les origines des déchets plastiques</i>	16
<i>I.10. Les catégories de plastiques</i>	17
<i>I.10.1. Les thermoplastiques</i>	17
<i>I.10.2. Les thermodurcissables</i>	17
<i>I.11. Propriétés électriques des polymères isolants solides:</i>	18
<i>I.11.1. Résistivité superficielle :</i>	18
<i>I.11.2. Rigidité diélectrique :</i>	18
<i>I.11.3. Permittivité et facteur de dissipation diélectrique:</i>	19
<i>I.12. Caractérisation physico-chimique</i>	20
<i>I.12.1. Propriétés mécaniques</i>	20
<i>I.12.2. Propriétés thermiques</i>	21
<i>I.12.3. Dilatation thermique</i>	22
<i>I.12.4. Claquage thermique</i>	22
<i>I.13. Electrification des polymères isolants</i>	23

Table Des Matières

I.13.1. Charges par effet triboélectrique :	23
I.13.2. Charges par rouleau électrostatique	24
I.13.3. Charge par influence	25
I.13.4. Décharge couronne	25
I.13.5. Configuration pointe / Plan	26
I.13.6. La Décharge couronne négative	27
I.14. Théorie des bandes d'énergie	28
I.14.1. Cas des matériaux isolants parfaits	28
I.14.2. Défauts et impuretés	29
I.14.3. Désordre et états localisés	30
I.15. Conclusion	31
Chapitre II : Différentes méthodes de neutralisation des charges électriques de surface	
II.1. Introduction	33
II.2. Concept de l'électricité statique	33
II.2.1 La charge électrique	33
II.2.2 L'électricité statique	34
II.3. Les avantages et les inconvénients de l'électricité statique	35
II.3.1 Les avantage	35
II.3.2 Les inconvénients	35
II.4. Les différents types de la neutralisation des charges électriques	36
II.4.1 Neutralisation par décharge couronne	36
II.4.2 Neutralisation atmosphérique	37
II.4.3 Neutralisation d'augmenter la conductivité	37
II.4.4 Neutralisation par augmentation d'humidité	37
II.4.5 Neutralisation statique passif	38
II.4.6 Neutralisation statiques actifs	38
II.4.7 Neutralisants statiques nucléaires	39
II.4.8 Neutralisation par le soufflage d'air ionisé	40
II.4.10 Augmentation de la conductivité des corps isolants	40
II.5. Conclusion	40
Chapitre III : Etude expérimentale du processus de la neutralisation	
III.1. Introduction	42
III.1. Contexte et problématique	42
III.2. Objectifs de la recherche	42
III.3. La neutralisation des charges électriques par décharge couronne	42
III.4. procédure expérimentale	42
III.5. Résultats et discussion	44
III.5.1. Effet de la haute tension	44
III.5.2. Effet de la vitesse de neutralisation	45
III.5.3. Effet De La Fréquence:	45
III.5.4. Effet de la distance inter électrode :	46
III.5.5. Effet d'humidité :	48
III.6. Conclusion	49
Conclusion Général	50
Références bibliographiques	51

Liste des Figures

Figure I.1 : Polymérisation	04
Figure I.2 : La structure macromoléculaire des polymères.	06
Figure I.3 : La différence de la liaison chimique entre les thermoplastique et thermodurcissable	07
Figure I.4 : Quelques applications des polymères	13
Figure I.5 : Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin	14
Figure I.6 : Les trois types de polymères.	14
Figure I.7 : diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait.	18
Figure I.8 : Dimensions des électrodes	19
Figure I.9 : Dispositif de charge par effet triboélectrique.	23
Figure I.10 : Diélectrique charge avec un rouleau électrostatique.	24
Figure I.11 : Les différentes géométries dans le cas de décharge couronne.	24
Figure I.12 : Charge par influence	25
Figure I.13 : Décharge couronne.	26
Figure I.14 : Descriptif de la décharge couronne négative.	28
Figure I.15 : Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le cas d'un isolant cristallin parfait. E_F est le niveau de Fermi.	29
Figure I.16 : (a) : Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels. (b) : représentation des bandes de Hubbard dans un schéma de bandes.	30
Figure I.17 : Représentation schématique de la densité d'états possibles pour un isolant contenant des défauts et présentant un certain degré de désordre. Les états localisés sont représentés en noir.	31
Figure II.1 : Représentation de l'atome.	34
Figure II.2 : Expérience de base de l'électrostatique.	35
Figure II.3 : Neutralisation d'une surface par ionisation d'air bipolaire.	36
Figure II.4 : Types de Neutralisation statiques actifs: (a) charges entraînées par le champ, (b) charges entraînées par un flux d'air.	38
Figure II.5 : Représentation schématique du processus de production des ions bipolaires.	39
Figure III.1 : Dispositif expérimental pour l'étude de la neutralisation des polymères par décharge couronne.	43
Figure III.2 . Profil du potentiel de surface Avant et après neutralisation en fonction de la tension neutralisante 16kV; 18kV; 20kV.	44
Figure III.3 . Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la vitesse de déplacement sous les mêmes conditions : $V_n=18kV$, $f_n= 100Hz$, $d= 30mm$,	45
Figure III.4 . Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la fréquence. ($V_n = 18 kV$, $d = 30 mm$ et $v = 2,5 cm/s$)	46
Figure III.5 . Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la distance inter électrode 25mm; 30mm; 35mm	47
Figure III.6 . Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la d'humidité : (a) $RH=50\%$; $RH=40\%$	48

Liste des tableaux

Tableau I.1: Le tableau suivant compare ces deux familles de polymères.	11
Tableau I.2: Polysaccharides et sont d'origine végétale.	15

Introduction générale

L'électricité statique est un phénomène électrique qui se produit lorsque des charges électriques sont accumulées sur la surface d'un matériau isolant. Ces charges peuvent être positives ou négatives et sont générées lorsque deux matériaux différents sont frottés ensemble ou séparés les uns des autres. Lorsque cela se produit, les électrons sont transférés d'un matériau à l'autre, créant ainsi une différence de charge électrique. Cette accumulation de charges électriques peut causer des étincelles, des chocs électriques, pannes et dysfonctionnements d'équipements électroniques, des incendies, Donc il est important de prendre des précautions pour éviter les accidents ou les dommages matériels qui peuvent en résulter.

L'objectif de cette étude consiste à utiliser la neutralisation par la décharge couronne pour la prévention contre les charges électrostatique résiduelles sur la surface des polymères isolants sous l'effet de différents facteurs électriques et physiques.

Ce manuscrit est subdivisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est focalisé sur la généralité des polymères, à savoir définition, leurs différentes classes, structures et domaines d'applications ...

Le deuxième chapitre est réservé au concept de l'électricité statique, les avantages et les inconvénients de l'électricité statique ainsi les différents types de la neutralisation des charges électriques.

Le troisième chapitre consacré aux résultats obtenu d'une étude expérimentale du processus de la neutralisation des charges électriques sous l'influence de différents facteurs.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES POLYMERES

I.1. Introduction

En 1922, le chimiste allemand Hermann Staudinger introduisit la notion de macromolécule, molécule comportant plusieurs milliers à plusieurs centaines de milliers d'atomes. Cette notion permet de poser les bases de l'étude des polymères, composants essentiels des matières plastiques et des élastomères.

En se substituant aux matériaux traditionnels tels que les métaux, le bois, le verre ou le textile, la production de plastiques est sans cesse croissante depuis pratiquement un siècle, parmi les plus connus on trouve: le polystyrène [19].

I.2. Définition de Polymère

Le mot polymère vient du grec « polus » plusieurs, et « meros » parties. Il désigne communément une famille, toujours plus nombreuse, de produits constitués de macromolécules caractérisées par la répétition du même groupe d'atomes appelé motif constitutif (ou monomère, du grec monos : un seul ou une seule, et meros : partie).

Ce dernier diffère d'un polymère à l'autre et détermine en grande partie les propriétés physiques et thermomécaniques du produit fini (après sa mise en œuvre). Si l'unité de base d'un polymère est constituée d'un seul type de monomère, le matériau est dit homopolymère.

Dans l'autre cas, le matériau est un copolymère. Le nom des polymères est généralement dérivé de celui du monomère en ajoutant le préfixe poly Exemple : polyéthylène, poly (acide glycolique), polytétrafluoroéthylène, polymideetc.

Une macromolécule est caractérisée par sa masse molaire M , qui est en rapport avec le degré de polymérisation x représentant le nombre d'unités de la répétition dans la macromolécule par la relation simple:

$$M = x \cdot M_0 \quad (\text{Équation 1})$$

Où M_0 est la masse molaire de l'unité de la répétition.

Il existe différents types de polymères caractérisés par des propriétés différentes : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques.

La structure chimique d'un polymère, ou plus précisément la nature des atomes le constituant, est donné par l'unité constitutive.

Selon les définitions, on parle de macromolécule lorsque la masse molaire d'une molécule est supérieure à 5000 g/mol ou 100 unités monomères. En dessous de 1000g/mol, on parle de molécules et entre 1000 et 5000 g/l d'oligomères. On peut citer quelques exemples d'unités constitutives de polymères et leurs abréviations normalisées en électrotechnique:

- Le polyéthylène (PE) qui est largement utilisé comme isolant dans les câbles à cause des faibles pertes diélectriques, une faible permittivité, une résistivité élevée et un coût modéré.
- Le polytétrafluoroéthylène (PTFE Téflon) est aussi un bon isolant et a une tenue en température élevée.
- Le polypropylène (PP) qui est une polyoléfine comme le polyéthylène qui est principalement utilisé dans les condensateurs.
- Les polyesters comme le polyéthylène téréphtalate (PET) ou le polyéthylène naphtalate (PEN) ont une très bonne tenue en température et sont utilisés dans les condensateurs [5].

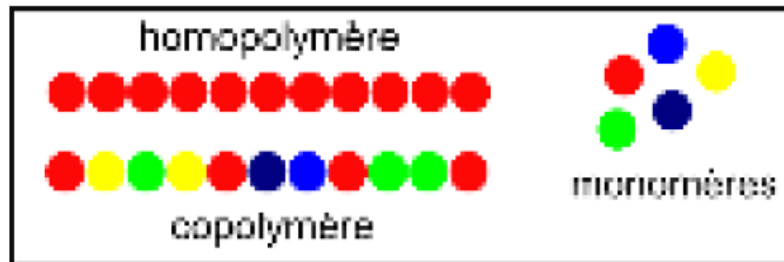


Figure I.1 : Polymérisation

I.3. Structure moléculaire des polymères solides

Après la polymérisation, les chaînes de polymère peuvent s'associer sous deux structures différentes. Une structure amorphe (vitreuse) et une structure semi-cristalline.

Seuls douze polymères sont strictement cristallins dont le téflon et la cellulose. Les polymères semi-cristallins sont des polymères dont la structure est basée sur un mélange de comportement vitreux et cristallin.

À la haute température, ce sont des liquides viscoélastiques qui, lorsqu'ils sont refroidis au-dessous d'une certaine température, deviennent des verres. Il s'agit simplement d'un blocage des mouvements des chaînes qui, à basse température, ne peuvent passer au-dessus des barrières de potentiel.

Cette transition vitreuse est un phénomène tout à fait général, observé aussi sur les polymères amorphes que sur la partie amorphe d'un polymère semi-cristallisé. Au dessous de la température de fusion, l'état stable d'un corps est un cristal. Quant le corps a pu être amené de l'état liquide à l'état solide amorphe, il n'est pas non plus dans un état stable : de fait, il peut cristalliser spontanément, donc revenir à la forme de plus grande stabilité. Mais si la matière est conservée à basse température, les mouvements atomiques sont de peu d'amplitudes et les chances de la formation et de la croissance du germe, indispensables à la cristallisation, sont très faibles, d'autant plus d'ailleurs que l'amorphe s'est formée plus facilement [6].

I.3.1. Structure amorphe (état vitreux).

Les structures amorphes sont caractérisées par l'absence d'ordre à plus long distance entre les macromolécules, par un ordre à court distance et il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules. Comme elles ne présentent aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celle-ci, les macromolécules peuvent former des points d'enchevêtrement qui sont inévitables à partir d'une certaine longueur de chaînes macromolécule.

La longueur des segments entre les enchevêtrements est en général suffisamment grande pour que les segments se comportent comme des chaînes individuelles. Les segments des chaînes sont capables de créer une certaine mobilité moléculaire si les espaces libres sont distribués dans tout le volume. La structure amorphe est sensible aux impuretés.

Dans la structure amorphe la molécule est attachée à un site ; elle vibre constamment mais reste encagée dans un petit volume de position fixe. Le temps d'encagement τ est très long, mais néanmoins il peut se produire un saut en un site voisin. Le temps caractéristique τ varie en fonction de la température pour une substance donnée et en fonction de la nature de la substance pour une température donnée. Au fur et à mesure que la température s'élève, les chaînes d'atome qui constituent la zone amorphe se désolidarisent, par rupture des liaisons les plus faibles et le matériau passe par un état pâteux avant de se liquéfier.

Pour la structure amorphe il faut connaître la température de la transition vitreuse.

Pour des températures supérieures à la température de la transition vitreuse, le système est dans un état d'équilibre stable, au-dessus de la température de fusion ou métastable en dessous (liquide surfondu). Dans cet état, si la viscosité du système est faible, sa mobilité est grande et le matériau s'écoule. Lors d'un refroidissement, la viscosité augmente jusqu'à la zone de transition, le système tend à ce figer et entre ainsi dans un état vitreux.

L'état vitreux, obtenu à des températures inférieures à la température de la transition vitreuse, est un état désordonné hors d'équilibre. Après un temps caractéristique du système considéré, un état d'équilibre métastable est atteint. Dans un état vitreux, à des températures très basses le temps de relaxation est infini.

Un vieillissement physique, qui représente une évolution du système vers l'équilibre le plus accessible, intervient lors du maintien du système à une température constante et inférieure à la transition vitreuse [6].

I.3.2. Structure cristalline

Les zones cristallines ou zones à structure ordonnées sont caractérisés par l'arrangement et l'orientation parallèle les unes aux autres des chaînes macromoléculaires et entre elles s'établit un réseau d'interaction transversale qui maintiendra la solidité de la structure. Cet alignement des chaînes moléculaires lui donne les propriétés de permittivité et de résistance mécanique.

Dans la zone cristalline la molécule est attachée à un site où elle vibre constamment, mais reste engagée dans un petit volume de position fixe. Il est impossible d'avoir un ordre sur toute la longueur de la chaîne, les zones cristallines ne sont pas donc étendues. La figure ci-dessous illustre la structure d'un polymère semi-cristallin.

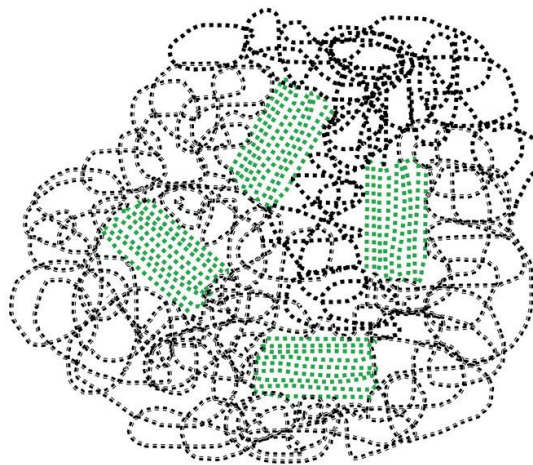


Figure I.2: La structure macromoléculaire des polymères.

I.3.3. Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des polymères qui se déforment et sont façonnables sous l'action de la chaleur. Cette propriété permet leur recyclage.

On trouve aujourd'hui de nombreux types de thermoplastiques offrant une vaste gamme de propriétés intéressantes. On peut les rendre aussi souples que le caoutchouc, aussi rigides que le métal et le béton, ou aussi transparents que le verre, pour un usage dans de nombreux produits de tuyauterie et autres composants.

Certains d'entre eux peuvent supporter des températures atteignant 315 °C. D'autres conservent leurs propriétés jusqu'à -73 °C. Ils ne s'oxydent pas, ont une haute résistance à la corrosion et sont d'excellents isolants thermiques et électriques.

De par leur légèreté, leur haute résistance mécanique et leur résistance aux effets de l'environnement, les thermoplastiques constituent un matériau idéal pour les installations de tuyauteries industrielles, commerciales et d'habitations.

I.3.4. Les thermodurcissables

Les polymères thermodurcissables prennent leur forme définitive au premier refroidissement, la réversibilité est impossible [1].

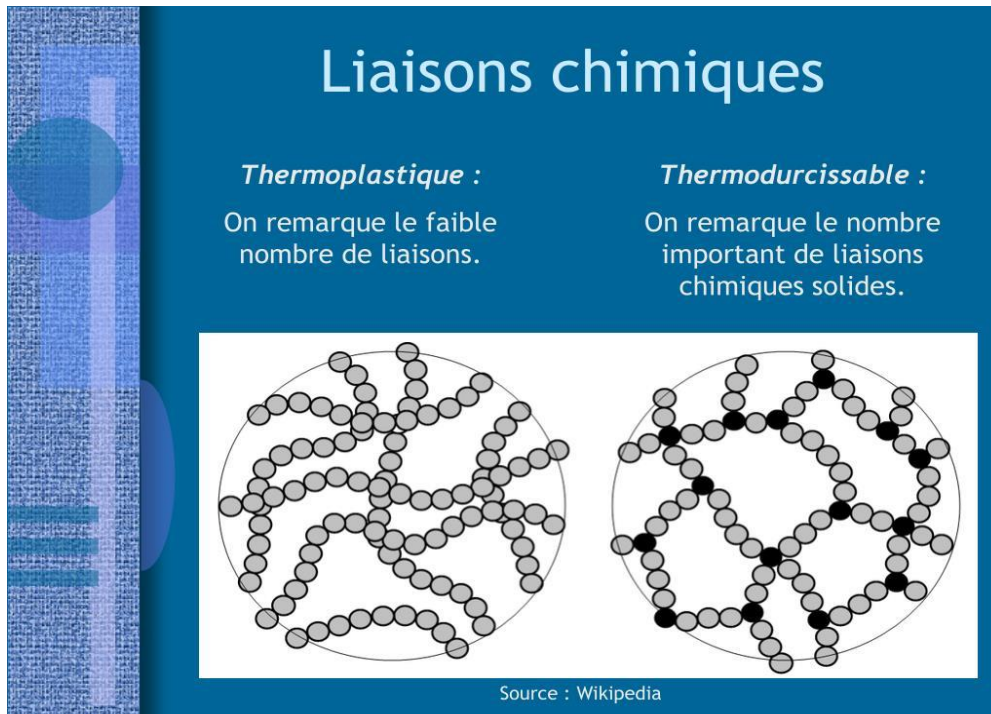


Figure I.3 : La différence de la liaison chimique entre les thermoplastique et thermodurcissable

I.4. Classification des polymères

I.4.1. Selon leur origine

➤ Polymères naturels

biopolymères (trois principales familles polysaccharides, polypeptides et polynucléotides), caoutchouc naturel...

➤ Polymères artificiels

ces polymères sont obtenus par modification chimique d'un polymère naturel d'origine :

➤ Végétale

la cellulose est extraite, entre autres, du bois et du coton puis transformée en esters de cellulose, éthers de cellulose...

➤ Animale

la caséine du lait mélangée au formaldéhyde donne la galalithe...

➤ **Polymères synthétiques**

Polymères préparés par polymérisation de molécules monomères : polystyrène, polyisoprène synthétique...

I.4.2. Selon Leur Masse Moléculaire

- **Oligomères** : masse moléculaire inférieure à 2 000 g/mol.
- **Polymères** : masse moléculaire supérieure à 2 000 g/mol.

I.4.3. Selon leur origine selon la composition chimique de leur chaîne squelettique

Les liaisons covalentes constituant le squelette macromoléculaire peuvent être des liaisons :

➤ **Organiques carbone-carbone**

Les polyalcadiènes :

- le **polybutadiène** $-\text{[CH=CHCH}_2\text{CH}_2\text{]}-$ et ses **copolymères** : polybutadiène hydroxytéléchélique (PBHT), poly(acrylonitrile-co-butadiène) (caoutchouc nitrile), poly(styrène-co-butadiène) (SBR), poly(styrène-bloc-butadiène) (SBS), poly(acrylonitrile-co-butadiène-co-styrène) (ABS),
- polyisoprène (IR), polychloroprène, poly(styrène-co-acrylonitrile), polyacétylène, poly(isobutène-co-isoprène) (caoutchouc butyle),

Les polyoléfines (ou polyalcènes)

Les polymères acryliques :

- polyacryliques : $-\text{[(ROCO)CHCH}_2\text{]}-$: poly(acide acrylique) (PAA), polyacrylamide (PAM), polyacrylates d'alkyles (polyacrylate de méthyle (PMA), polyacrylate d'éthyle (PEA), polyacrylate de butyle (PBA)),
- Polyméthacryliques : $-\text{[(ROCO)C(Me)CH}_2\text{]}-$: poly(acide méthacrylique) (PMA), polyméthacrylates d'alkyles (polyméthacrylate de méthyle (PMMA), polyméthacrylate d'éthyle (PEMA), polyméthacrylate de butyle (PBMA)),

Les polymères vinyliques :

- Polyvinyliques éthers : $-\text{[ROCHCH}_2\text{]}-$: polyvinyle méthyle éther (PMVE), polyvinyle éthyle éther, polyvinyle isobutyle éther,
- Polyvinyliques alcools : alcool polyvinylique (PVAL) $-\text{[HOCHCH}_2\text{]}-$,
- Polyvinyliques cétones : $-\text{[RCOCHCH}_2\text{]}-$: polyvinyle méthyle cétone,
- Polyvinyliques halogénés : $-\text{[CR}_2\text{CR}_2\text{]}-$ avec R pouvant être un H ou un X (Halogène) :

- Polyvinyles chlorés : polychlorure de vinyle (PVC); polychlorure de vinyle surchloré (PVC-C); polychlorure de vinylidène (PVDC),
- Polyvinyles fluorés : polytétrafluoroéthylène (PTFE), polyfluorure de vinyle (PVF); polyfluorure de vinylidène (PVDF), éthylène tétrafluoroéthylène (ETFE), perfluoroalkoxy (PFA),
- Polyvinyles nitrilés : polyacrylonitrile (PAN) $-\text{[NCCHCH}_2\text{]}-$,
- Polyvinyles esters : $-\text{[RCOOCHCH}_2\text{]}-$: polyacétate de vinyle (PVAc),
- Polyvinyles acétals : polyvinyle de butyral (PVB), polyvinyle de formol, Polyvinylpyridine,
- Poly vinyl pyrrolidone (PVP),

Les polymères styréniques : polystyrène (PS) $-\text{[C}_6\text{H}_6\text{CHCH}_2\text{]}-$,

Les polyarylenealkylene : $-\text{[Ar-(CH}_2\text{)}_n\text{]}-$,...

- Organiques carbone-hétéroatome : Les familles de polymères les plus connues sont classées ci-dessous selon le groupe fonctionnel constituant leur chaîne squelettique :
- Oxygène : polycétones, polyéthers, polyesters, polycarbonates,
- Azote : polyamines, polyimines,
- Oxygène-azote : polyamides, polyimides, polyuréthanes, polyurées,
- Oxygène-soufre : polysulfones,...

➤ INORGANIQUES :

- oxygène-silicium : polysiloxanes : polydiméthylsiloxane (PDMS), polydiphénylsiloxane (PDPS), polyméthylhydrosiloxane (PMHS),
- azote-soufre : polythiazyle $(\text{SN})_x$, appelé aussi nitrure de soufre polymère,
- azote-phosphore : polyphosphazènes,
- azote-bore : polyborazylènes,
- **étain-étain** : polystannanes. L'étain est le seul élément métallique connu qui forme des polymères organométalliques composés d'une chaîne d'atomes métalliques liés entre eux par des liaisons covalentes,...

I.4.4. Selon la régularité de l'enchaînement de motifs

- Tête à queue : $\text{CH}_2\text{-CH-R - CH}_2\text{-CH-R}$: cas le plus fréquent.
- Tête à tête : $\text{R-CH-CH}_2\text{ - CH}_2\text{-CH-R}$
- Queue à queue : $\text{CH}_2\text{-CH-R - R-CH-CH}_2$

I.4.5. Selon le nombre de type d'unités répétitives

- Les homopolymères : ce sont des polymères composés d'un seul type d'unité répétitive. La présence d'une seule unité résulte le plus souvent de la polymérisation d'un seul type de monomère : polyéthylène, polystyrène...
- Les copolymères : ce sont des polymères composés d'au moins deux types d'unités répétitives. Ces matériaux possèdent des propriétés physico-chimiques et mécaniques intermédiaires avec celles obtenues sur les homopolymères correspondants : ABS...

I.4.6. Selon l'architecture de leur chaîne

Selon le type d'enchaînement des unités répétitives, les polymères non réticulés avec des liaisons covalentes, peuvent être classés en :

- polymères non branchés :
- polymères linéaires,
- polymères cycliques ;
- polymères branchés ou ramifiés :
- polymères linéaires branchés. La chaîne linéaire présente des ramifications. Ces ramifications peuvent être :
 - aléatoires,
 - systématiques et régulières : polymères en peigne, polymères en brosse, polymères en échelle, etc. ,
 - polymères dendritiques : les ramifications émanent du centre du polymère. Ces ramifications peuvent être :
 - aléatoire : polymères hyperbranchés,
 - systématiques et régulières : dendrimères, polymères en étoile.

I.4.7. Selon leurs propriétés thermomécaniques

- Les polymères thermoplastiques : ce sont des polymères linéaires (ou monodimensionnels), issus de la polymérisation de monomères bivalents. Les unités monomères sont liées de façon covalente. Ils deviennent malléables quand ils sont chauffés, ce qui permet leur mise en forme.
- Les polymères thermodurcissables : ils durcissent de façon irréversible sous l'action de la chaleur et/ou par ajout d'un réactif, les liaisons covalentes se développent dans les trois dimensions, ce sont des polymères tridimensionnels.

- Élastomères : selon le type de réticulation, les élastomères sont classés en deux familles :
 - élastomères thermodurcissables : faible réticulation avec des liaisons covalentes ;
 - élastomères thermoplastiques (TPE) : faible réticulation avec des liaisons non covalentes comme les liaisons hydrogène.

I.4.8. Selon leur cristallinité

- Polymères amorphes : cas le plus fréquent.
- Polymères semi-cristallins.

Tableau I.1 Le tableau suivant compare ces deux familles de polymères.

PARAMÈTRES	POLYMÈRES AMORPHES	POLYMÈRES SEMI-CRISTALLINS
Structure du polymère	Inorganisés : chaînes très ramifiées, désordonnées ou en pelotes	Organisées : chaînes alignées, ordonnées et symétriques
Propriétés mécaniques	Tenue au fluage et au choc, difficile à étirer (peu de fibres ou de films)	Résistance à la fatigue dynamique, bonnes propriétés d'écoulement (possibilité de fabriquer des fibres et des films)
Propriétés optiques	Transparents quand ils ne sont pas modifiés, chargés ou colorés	Translucides ou opaques
Propriétés thermiques		Point de fusion franc
Propriétés chimiques		Bonne tenue chimique en particulier aux hydrocarbures et solvants
Domaine de température d'utilisation	< T _g	Entre T _g et température de fusion (T _f)
Domaine de température de déformation	> T _g	> T _f
Exemples	PMMA	PP, PEhd, PET

I.4.9. Selon leur état physique

Un polymère peut se présenter à température ambiante à l'état liquide (plus ou moins visqueux) ou solide.

I.4.10. Selon leur tacticité

- Polymères atactiques : les substituants sont positionnés aléatoirement.
- Polymères isotactiques : tous les substituants sont du même côté de la chaîne.
- Polymères syndiotactiques : les substituants sont répartis alternativement d'un côté et de l'autre de la chaîne.

I.4.11. Selon l'aromaticité de leur chaîne squelettique

- Polymères aliphatiques : fabriqués à partir de monomères aliphatiques
- Polymères semi-aromatiques : fabriqués à partir d'un mélange de monomères aliphatiques et aromatiques
- Polymères aromatiques (les polyaromatiques) : fabriqués à partir de monomères aromatiques
- L'augmentation de l'aromaticité des polymères augmente leur résistance :
 - mécanique : chocs, usure, fluage, frottements, etc. ;
 - thermique :
 - diminution du coefficient de dilatation, d'où la diminution du retrait au moulage,
 - augmentation de la résistance au feu.
 - augmentation de la température de transition vitreuse
 - augmentation de la température de dégradation
- chimique : solvants...

Les polymères semi-aromatiques ont des températures de fusion élevées et donc leur mise en œuvre se fait à des températures plus élevées que celles utilisées pour les polymères aliphatiques.

Les polymères aromatiques n'ont généralement pas de point de fusion ce qui rend leur mise en œuvre encore plus difficile.

I.4.12. Selon leur conductivité thermique et/ou électrique

- Polymères isolants : cas le plus fréquent.
- Polymères conducteurs.

I.4.13. Selon leur charge ionique

- Polymères non chargés : cas le plus fréquent.
- Polymères ioniques.

I.4.14. Selon leur stabilité thermique

- Polymères thermolabiles : cas le plus fréquent.
- Polymères thermostables [5].

I.5. Applications des polymères

Les polymères sont fortement utilisés dans :

- l'emballage des produits alimentaires, emballage de transport,
- les secteurs du bâtiment,
- les secteurs de l'automobile, l'aéronautique et les bateaux,
- l'industrie de l'électroménager, du textile, de l'électricité et de l'agriculture.



Figure I.4: Quelques applications des polymères

I.6. Caractéristiques des polymères

I.6.1. Structure du polymère:

Il existe plusieurs types de polymères:

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

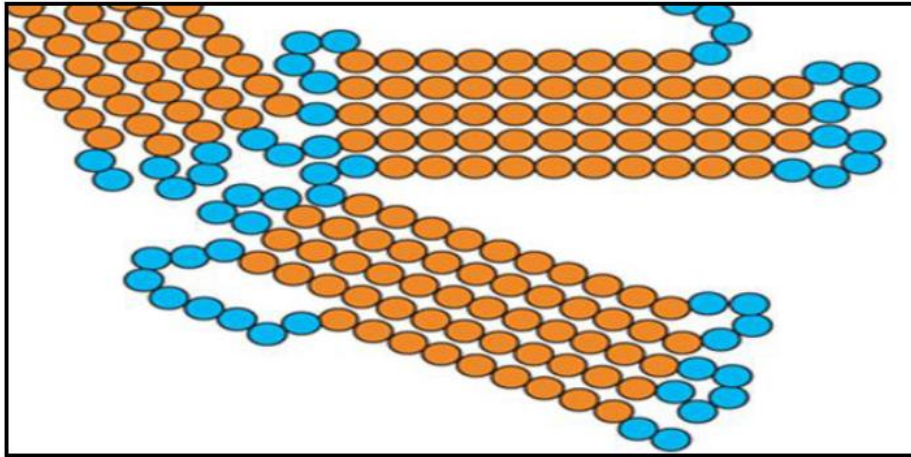


Figure I.5: Représentation schématique d'un polymère semi-cristallin (■ Partie cristalline, et ■ Partie amorphe)

I.6.2. Type de polymères:

On distingue deux types de chaînes :

- les polymères linéaires: les motifs s'enchaînent de manière unidimensionnelle comme le montre la figure I.3-a, c'est le cas des polymères thermoplastiques.
- les polymères ramifiés: s'il existe des ramifications sur la chaîne, elles peuvent être courtes (polymère branché) ou longues et reliées entre elles (polymère réticulé). Ils sont montrés sur la figure respectivement. [5]

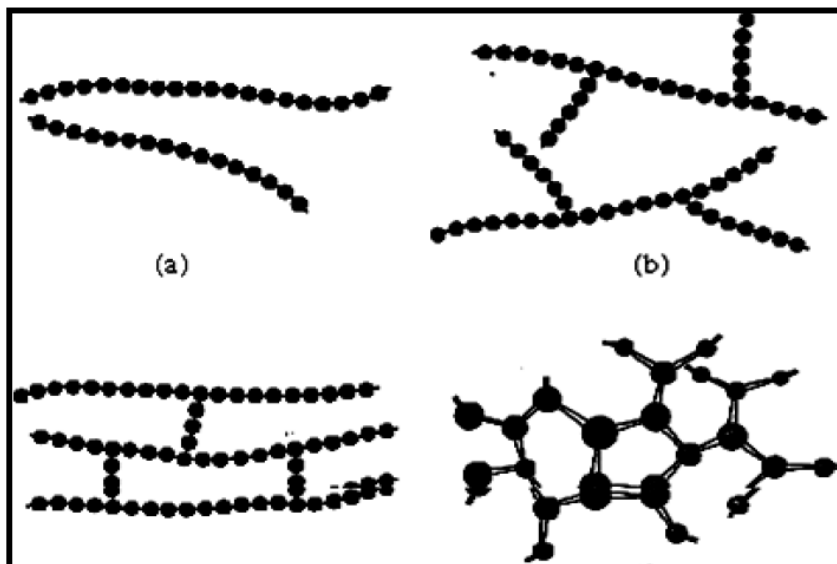


Figure I.6 : Les trois types de polymères.

I.7. Les bio-polymère

Les biopolymères sont des polymères issus de la biomasse, c'est-à-dire produits par des êtres vivants (végétaux, algues, animaux, fongiques, etc.).

Tableau I.2: La cellulose et l'amidon par exemple sont des polysaccharides et sont d'origine végétale.

Bio-monomères	Bio-oligomères	Biopolymères	Polymérisation	Liaison covalente	Éléments chimiques constitutifs	Masse moléculaire relative des biopolymères
Acides aminés	Oligopeptides	Polypeptides, protéines	Polycondensation	Liaison peptidique	C, H, O, N, S (cas rares des thioprotéines), Se (cas très rares des sélénoprotéines)	$10^4 - 10^6$
Monosaccharides	Oligosaccharides	Polysaccharides	Polycondensation	Liaison osidique	C, H, O	$10^4 - 10^{10}$
Isoprène	Terpènes	Polyterpènes : cis-1,4-polyisoprène (caoutchouc naturel) et trans-1,4-polyisoprène (gutta-percha)	Polyaddition			
Nucléotides	Oligonucléotides	Polynucléotides, acides nucléiques, ARN ou ADN		Liaison phosphodiester	C, H, O, N, P	$10^4 - 10^6$
Hydroxyalcanoate		Polyhydroxyalcanoate	Polycondensation	Liaison ester		
Phénylpropanoïdes (dérivés de phénylalanine)		Polyphénols (lignine)			C, H, O	

Plusieurs industries s'y intéressent comme solution de rechange aux polymères synthétisés chimiquement et issus de ressources fossiles. Les produits à base de bio-polymères présentent l'intérêt d'être issus de ressources renouvelables et sont potentiellement biodégradables.

Il existe de nombreux produits sur le marché destinés à l'industrie agroalimentaire, à l'horticulture, à la galénique, la cosmétique, à l'emballage, etc. Le secteur de l'électronique est un débouché très intéressant car le marché est important et à forte valeur ajoutée. L'entreprise Fujitsu a été la première à mettre sur le marché un produit électronique (un notebook) à partir d'acide polylactique (PLA), un polymère d'origine bactérienne.

Il n'est toutefois pas question pour l'instant de substituer les bio-polymères ou polymères pétrochimiques en raison de leurs caractéristiques et de leurs propriétés [3].

I.8. Les matériaux composites à matrice polymère

I.8.1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un assemblage d'au moins deux composants non miscibles (mais ayant une forte capacité de pénétration) dont les propriétés se complètent. Le nouveau matériau ainsi constitué, hétérogène, possède des propriétés que les composants seuls ne possèdent pas. Ce phénomène permet d'améliorer la qualité du matériau final pour une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, conductivité, etc...) ; ceci explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels.

Un matériau composite se compose comme suit: une matrice + un renfort.

- ✓ Matrice : constituée d'une ossature qui est généralement une matière plastique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) assurant la cohésion de la structure.
- ✓ Renfort: c'est une matière ajoutée à la matrice donnant la propriété attendue du composite : tenue mécanique, propriété électrique etc [5]

I.9. Les origines des déchets plastiques

Les déchets plastiques ont différentes origines :

- Les déchets de l'industrie du plastique (rebus et ratés de production et de transformation).
- Les plastiques contenus dans les ordures ménagères (bouteilles, flacons, gobelets, films...).
- Les déchets de démolition du bâtiment.
- Les emballages industriels et commerciaux.
- Les résidus de broyage automobiles.
- Les plastiques issus des déchets d'équipements électriques et électroniques [7].

I.10. Les catégories de plastiques

Il existe deux grandes catégories de plastiques :

I.10.1. Les thermoplastiques

Ils fondent sous l'effet de la chaleur et reprennent leur rigidité en refroidissant. Techniquement ils peuvent être recyclés ou régénérés à la fabrication d'objets divers [7].

- Le PVC (polychlorure de vinyle), composant le plus connu du grand public, principalement consacré au conditionnement des eaux, boissons rafraîchissantes, vin et vinaigre tuyaux de canalisations, gaines électriques,.
- Le PEHD (polyéthylène haute densité) utilisé pour fabriquer les bouteilles et flacons contenant lait, lessives pour lave-linge ou lave-vaisselle, adoucissants, assouplissants, détergents, bidons (huiles de moteur), caisses, casiers...
- Le PET (polyéthylène téréphtalate) servant à la fabrication des bouteilles d'eau, boissons gazeuses ou plates, vin, cidre, huile...
- PEBD : sacs et emballages plastiques, palettes, films étirables, bouteilles (shampooing),
- PP : sachets et films transparents (emballages biscuits), automobiles (pare-chocs...),
- PS : pots de yaourts, gobelets, emballages.

I.10.2. Les thermodurcissables

La transformation d'un matériau thermodurcissable fait intervenir une polymérisation, laquelle est irréversible et conduit à un produit fini solide, généralement rigide. Ce dernier est infusible donc non transformable, ce qui empêche son recyclage. Les polyuréthanes réticulés, la bakélite, les polyester insaturés, formica sont des matières initialement liquides qui durcissent sous l'effet de la chaleur et de la pression.

Leur transformation est irréversible, ils sont inaptes à la régénération. Les matériaux thermodurcissables sont généralement plus résistants que les matériaux thermoplastiques, on leur reconnaît une très bonne résistance diélectrique, mécanique, ainsi qu'aux produits chimiques (matériaux non réactifs), et à la chaleur. La plupart des résines utilisées dans l'industrie des composites sont thermodurcissables. Il existe également des plastiques composites à base de thermoplastiques ou de thermodurcissables mélangés à d'autres pour en améliorer les propriétés mécaniques (fibres de verre) [7].

I.11. Propriétés électriques des polymères isolants solides:

I.11.1. Résistivité superficielle :

La résistivité superficielle ρ_s [Ω] est le rapport entre l'intensité du champ électrique continu et la densité linéaire du courant qui parcourt la couche superficielle d'un matériau isolant. La résistivité superficielle est numériquement égale à la résistance de surface entre deux électrodes qui forment les côtés opposés d'un carré de certaines dimensions (*Figure I.7*).

La résistivité superficielle est calculée par la relation:

$$\rho_s = R_s \cdot \frac{P}{g} \quad (\text{Équation 2}).$$

Où : $P = \pi(D_0 + g)$ est le périmètre moyen entre l'électrode et la contre-électrode.

R_s [Ω] : La résistance de surface est le rapport entre la tension continue appliquée entre deux électrodes appliquées sur la surface d'un échantillon et le courant entre les deux électrodes.

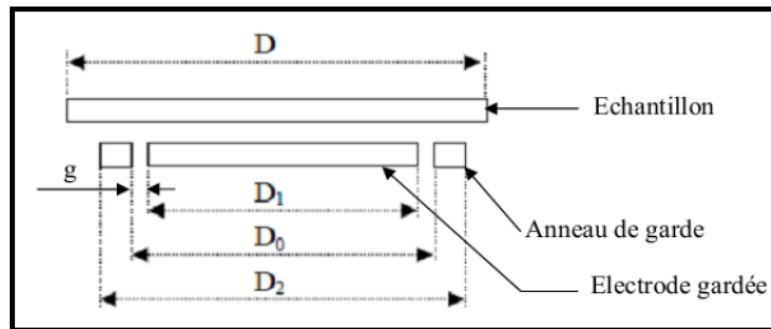


Figure I.7: Dimensions des électrodes

Pour que les polymères puissent être utilisés comme isolants ils doivent avoir une résistivité élevée, supérieure à $10^9 \Omega \cdot \text{cm}$

I.11.2. Rigidité diélectrique

La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximum du champ électrique que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). On utilise aussi l'expression champ disruptif. Pour un condensateur, quand cette valeur est dépassée, l'élément est détruit. La valeur maximale de la tension électrique appliquée aux bornes, est appelée tension de claquage du condensateur.

Si le champ électrique dépasse la rigidité diélectrique du matériau, on parle de claquage, et le matériau peut voir ses propriétés physiques modifiées, parfois de façon réversible, et parfois de façon irréversible.

La rigidité intrinsèque du polymère peut atteindre plusieurs centaines de kV/mm, mais leur rigidité pratique est souvent limitée, elle varie pour les polymères les plus utilisés de 10 à 24kV/mm.

Divers paramètres ont une influence sur la rigidité diélectrique tels que la forme de la tension appliquée, la température et l'épaisseur du solide isolant, ainsi que les caractéristiques électriques et thermique du milieu ambiant:

- Des décharges superficielles qui peuvent se produire dans l'air.
- La permittivité et la résistivité du milieu ambiant modifiant la répartition du champ électrique.

Dans un système d'électrodes plan-plan, le champ électrique E est calculé par la formule suivante:

$$E = U / d \quad (\text{Équation 3})$$

Avec:

U : la tension appliquée à l'isolant (Kv)

d : épaisseur de l'isolant (mm).

I.11.3. Permittivité et facteur de dissipation diélectrique

Un diélectrique est caractérisé par sa permittivité relative ou constante diélectrique. Dans le cas d'un diélectrique parfait, ϵ_r est le quotient de la capacité C_x entre deux électrodes, supposées noyées dans ce diélectrique, par la capacité C_v de la même configuration d'électrodes dans le vide:

$$\epsilon_r = C_x / C_v \quad (\text{Équation 4}).$$

La permittivité absolue ϵ est le produit de la permittivité relative ϵ_r par la permittivité du vide ϵ_0

$$\text{Avec : } \epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (\text{Équation 5}).$$

La permittivité absolue définit la possibilité qu'un courant traverse un diélectrique, sous l'action du champ électrique. Ceci résulte de diverses contributions de déplacements des charges : déplacement des électrons, déplacements des atomes et des ions, orientation des dipôles électriques et déplacement des charges d'espace. Les pertes diélectriques sont représentées par le facteur de dissipation $tg\delta$

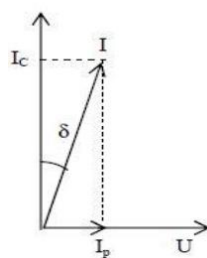


Figure I.8: diagramme de Fresnel pour un condensateur contenant un diélectrique imparfait.

Avec :

I_c : Courant de charge

I_p : Courant de perte d'énergie dans de diélectrique (dues à la polarisation).

$$tg\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0} \quad (\text{Équation 6})$$

Avec : δ angle de pertes, c'est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée au diélectrique et le courant qui en résulte.

I.12. Caractérisation physico-chimique

Les caractéristiques fondamentales des solides isolants sont déterminées par leurs structures intrinsèques, mais les phénomènes superficiels sont intimement liés aux conditions de l'interface. Les processus physico-chimiques responsables de la dégradation de ces isolants sous contraintes électriques ne sont pas encore bien connus. Peu de travaux ont permis d'expliquer les mécanismes fondamentaux et les phénomènes de dégradation de l'isolant soumis aux décharges surfaciques. Une étude à l'échelle moléculaire est nécessaire afin de caractériser les surfaces de ces matériaux, de les contrôler et d'améliorer leurs performances.

I.12.1. Propriétés mécaniques

La grande majorité des polymères sont utilisés pour supporter des charges, c'est-à-dire qu'ils ont une fonction mécanique. Pour assurer cette fonction souvent critique, il convient de dimensionner correctement les pièces de structures, afin d'assurer leur résistances mécaniques et leur durée de vie en service. Les propriétés mécaniques des polymères sont fortement influencées par la température et la vitesse de déformation. Pour un même matériau, une augmentation de la température conduit à un comportement évoluant de fragile à ductile, de même qu'une décroissance de la vitesse de déformation.

Le module d'élasticité E (module d'Young) :

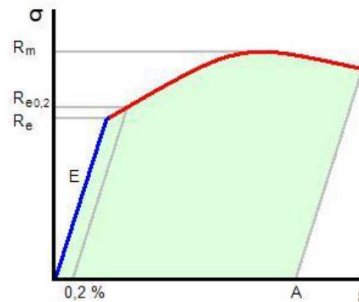
Le module de Young ou module d'élasticité (longitudinale) ou encore module de traction, est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et la déformation pour un matériau élastique isotrope.

Le physicien britannique Thomas Young (1773-1829) avait remarqué que le rapport entre la contrainte de traction appliquée à un matériau et la déformation qui en résulte (un allongement relatif) est constant, tant que cette déformation reste petite et que la limite d'élasticité du matériau n'est pas atteinte.

La loi d'élasticité est la loi de Hooke : $\Sigma\sigma = E\varepsilon$

Où :

- σ est la contrainte (en unité de pression).
- E est le module de Young (en unité de pression).
- ε est l'allongement relatif, ou déformation (adimensionnel).



Le module de Young représente la rigidité du matériau, il est mesuré à partir d'un test de traction selon la norme DIN EN ISO 527-2 sur une éprouvette de type A selon la norme DIN EN ISO 3167 avec une vitesse de traverse de 1 mm/min. Le module d'élasticité E est le rapport de la contrainte sur la déformation calculé sur la partie initiale linéaire de la courbe contrainte/déformation. Pour les matières plastiques, on a montré que le module d'élasticité varie avec les paramètres suivants:

- Température.
- Taux d'humidité-Orientation des macromolécules et des charges.
- durée et vitesse de sollicitation.
- Géométrie de l'éprouvette; Appareillage.

De façon générale on préférera un test de traction à un test de torsion pour obtenir des valeurs de rigidité, en effet pour un test en traction la répartition des contraintes est maintenue constante sur la longueur utile de l'éprouvette.

I.12.2. Propriétés thermiques

L'énergie thermique dans les corps solides est de deux types :

- ✓ L'énergie de vibration des atomes autour de leur position moyenne.
- ✓ L'énergie de cinétique des électrons libres.

Quand un corps absorbe de la chaleur, son énergie interne et sa température croissent. Les caractéristiques thermiques importantes sont :

- capacité calorifique.
- dilatation thermique.
- Conductivité thermique dépendant des changements d'énergie des atomes et des électrons libres.

I.12.3. Dilatation thermique

La dilatation thermique résulte de l'asymétrie des forces de liaisons interatomiques : il faut une force plus faible pour écarter légèrement les atomes les uns les autres que pour les rapprocher.

L'agitation moléculaire sous l'action de la chaleur favorise l'écartement des atomes et provoque une expansion volumique des matériaux.

La dilatation thermique s'exprime sous forme d'un coefficient :

$$L = L_0\{1 + \alpha (T - T_0)\} \quad (\text{Équation 6})$$

α : coefficient de dilatation linéaire.

L : longueur d'un échantillon dilaté à T .

L_0 : longueur de l'échantillon à la température ambiante.

I.12.4. Claquage thermique

Le courant de conduction, en général très faible, et les pertes diélectriques par relaxation en tension alternative produisent une énergie calorifique dans le solide.

Quand le temps d'application de la tension est grand, la quantité de chaleur générée dans le solide devient importante. Si cette énergie calorifique est supérieure aux fossilités d'évacuation par conduction ou par convection du diélectrique dans des conditions de refroidissement données, la température du diélectrique va augmenter, provoquant ainsi une instabilité thermique de ce dernier et une augmentation du courant de conduction. On dit alors que le diélectrique subit « un claquage thermique ».

Les pertes diélectriques sont plus importantes en tension alternatives qu'en tension continue vue que les pertes par relaxation dépendent de la fréquence. Par conséquent, la contrainte de claquage thermique est plus petite en tension alternative qu'en tension continue et elle décroît avec la tension avec la fréquence de la source de tension.

En général la conductivité du solide croît avec la température et les conditions d'instabilité thermique sont atteintes le taux d'écoulement dépasse celui du refroidissement [04].

I.13. Electrification des polymères isolants

I.13.1. Charges par effet triboélectrique :

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

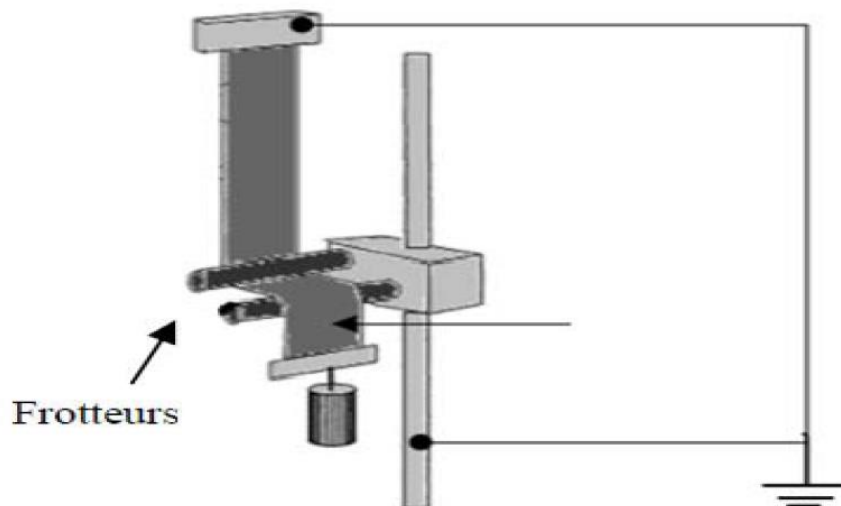


Figure I.9: Dispositif de charge par effet triboélectrique.

I.13.2. Charges par rouleau électrostatique

Le contact entre deux matériaux est, en fait, suffisant pour produire un phénomène d'électrisation.

Un diélectrique peut être aussi chargé avec un rouleau électrostatique en contact avec la surface libre de l'échantillon et dont le potentiel de charge est aussi contrôlé par la source haute tension [9].

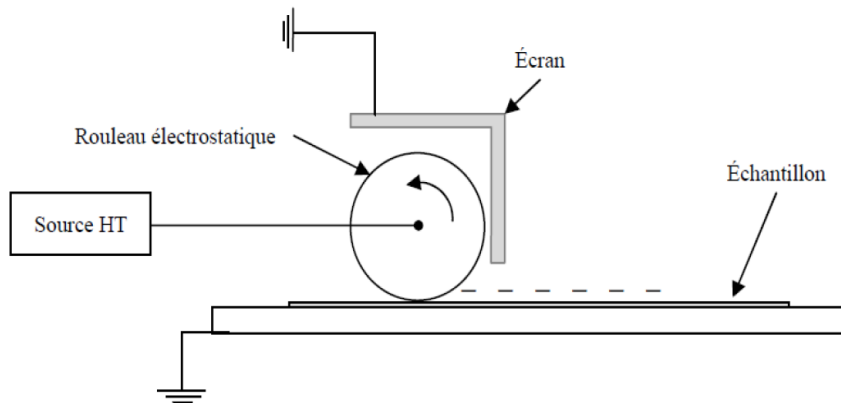


Figure I.10: Diélectrique charge avec un rouleau électrostatique.

Le transfert de charge au contact entre le rouleau et la surface du diélectrique est très probablement de type électronique. La charge séparée résulte des différences dans la structure électronique des deux corps en contact; elle est influencée tout d'abord par la nature des matériaux et par les traitements subis par leurs surfaces.

Parmi les moyens de dépôt de charges les plus utilisés pour le chargement électrostatique de surface des isolants solides, la décharge couronne est le moyen le plus simple et le plus fiable. Elle nous donne la possibilité de déposer des charges soit positives ou négatives selon la polarité du système de décharge.

Nous allons présenter dans le cas de décharge couronne le processus physique qui conduisent à la production d'espaces réactives et à leur dispersion.

Ces phénomènes qui ont largement été décrit pour des géométries pointe plan, pouvons être généralisés à la configuration fil-plan, fil-cylindre, pointe-plan, plan-plan...etc [01].

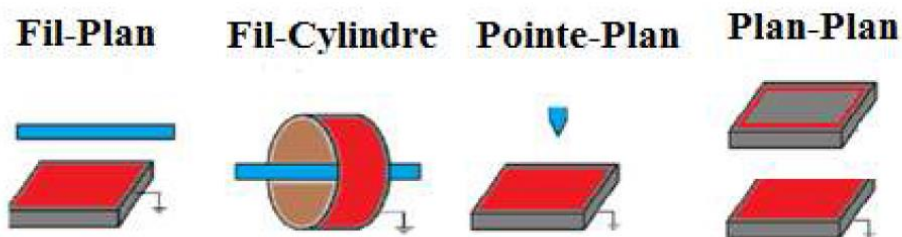


Figure I.11: Les différentes géométries dans le cas de décharge couronne.

I.13.3. Charge par influence

L'électrisation par influence (induction) consiste à approcher un matériau électrisé d'un autre, mais sans contact. Les charges à l'intérieur du matériau approché s'orientent et/ou se déplacent, même s'il est globalement neutre électriquement. Il y a attraction entre les charges électriques différentes (+ et -) et répulsion entre charges de même signe (+ et +, ou - et -), par interaction électrostatique (loi de Coulomb) [08].

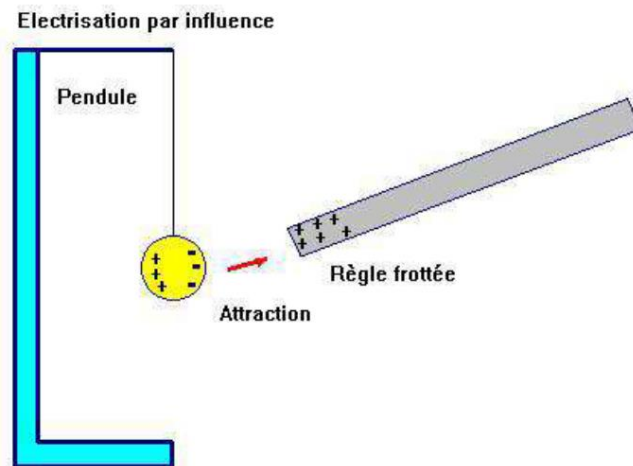


Figure I.12: Charge par influence.

I.13.4. Décharge couronne

Le terme de décharge couronne désigne l'ensemble des phénomènes qui se produisent dans un gaz au voisinage d'un conducteur de faible rayon de courbure soumis à un champ électrique intense (ou porté à une tension élevée).

Dans notre cas, la mise en charge de la surface de l'isolant est effectuée par le principe de la géométrie pointe/plan. La pointe constitue l'électrode à polarité négative reliée à une source HT et l'isolant dont la face arrière métallisée est mise à la masse, est positionné sous la pointe. Ceci permet d'une part de générer des champs électriques intenses au niveau de la pointe, d'autre part, le lieu de génération est limité au voisinage de la pointe, le risque de claquage est moindre. Par conséquent, des avalanches électroniques ont lieu près de la pointe.

Les électrons créés arrivent dans une région où le champ est plus faible. Ils n'ont plus assez d'énergie et sont captés par les atomes ou les molécules neutres du milieu. Ils constituent ainsi une charge d'espace composée d'ions négatifs.

Sous l'influence du champ, les ions sont balayés vers la surface de l'isolant à travers une grille répartitrice. Cette dernière, permet de répartir la charge uniformément sur la surface de l'isolant.

Plus on transfère de charge à la surface de l'isolant, plus la différence de potentiel entre la sonde électrostatique et la surface de l'isolant augmente.

Le transfert de charge sur la surface du matériau isolant est généralement réglable soit par la distance entre la pointe et la surface de l'isolant ou par la variation de la tension de la pointe (notre cas). Par ailleurs, nous pouvons fixer un potentiel sur la grille répartitrice qui imposera donc la valeur initiale du potentiel présent sur le matériau. Le champ électrique près de la pointe est directement proportionnel à cette distance. La sonde électrostatique du voltmètre digital est placée à une distance de 1 mm de la surface de l'isolant. Le voltmètre traduit et affiche la valeur de la différence de potentiel. Plus la charge s'écoule plus la d.d.p diminue [10].

I.13.5. Configuration pointe / Plan

L'intérêt de la configuration pointe / plan est double premièrement, elle permet de générer des champs électriques très intenses au niveau de la pointe (plusieurs Mv/cm), pour des tensions modérées (qq Kv). Deuxièmement, étant donné que la région de champ intense est localisée près de la pointe le lieu de génération des porteurs de charge est limité au voisinage de la pointe. Le risque de claquage est moindre.

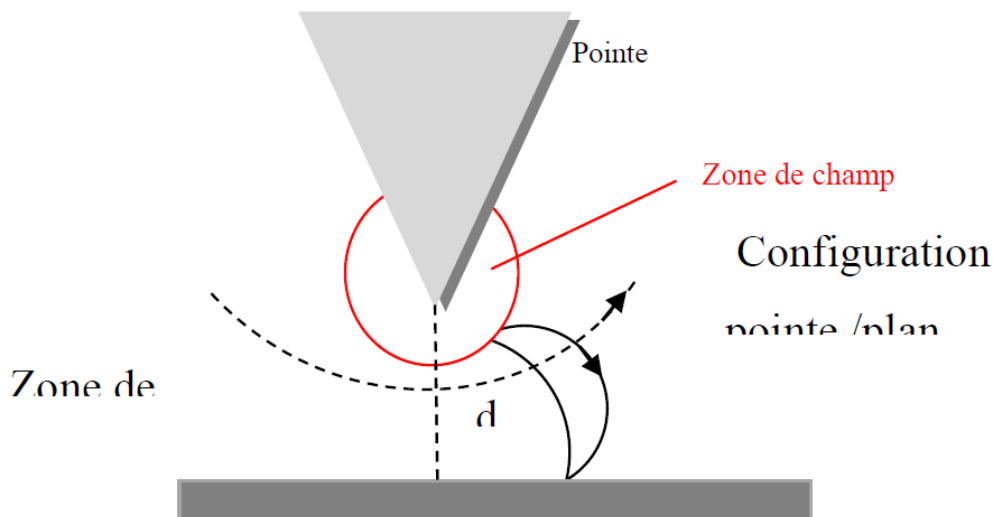


Figure I.13 : Décharge couronne.

L'intérêt porté à la décharge couronne a de multiples motivations :

- IL peut être lié à l'étude des phénomènes précurseurs au développement de l'arc.
- Possibilité de charge des particules dans un gaz (précipitation électrostatique).
- Multiplication électronique au seuil de la charge (compteur Geiger).

- La décharge couronne est aussi appliquée en interaction solide dans deux domaines d'application.
- Le traitement de surface des isolants
- Le dépôt contrôlé et reproductible de charges électriques par des isolants.

La décharge couronne est une source d'ions et de rayonnement qui permet, par rupture et réarrangement des premières monocouches, de modifier les caractéristiques physiques de la surface des isolants et de polymères en particulier en vue d'améliorer des propriétés telles que l'adhérence d'électrodes et la mouillabilité des isolants comme le PE (polyéthylène), PET (polyéthylène téréphtalate) et le PP (polypropylène)

Le deuxième cas est le moyen le plus fiable pour reproduire le chargement électrostatique des isolants et de comprendre comment ces charges se comportent. La décharge couronne source d'ions va donc servir dans notre étude de moyen de dépôt de charges sur la surface des polymères (PET). Avec ce moyen il est possible de déposer des charges aussi bien positives que négatives il suffit de changer la polarité de la haute tension appliquée sur la pointe [10].

I.13.6. La Décharge couronne négative

Dans le cas où la pointe est portée à un potentiel négatif, il y a toujours création d'électrons par photo-ionisation et apparition de la zone d'ionisation autour de la pointe. (Figure I.13).

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.

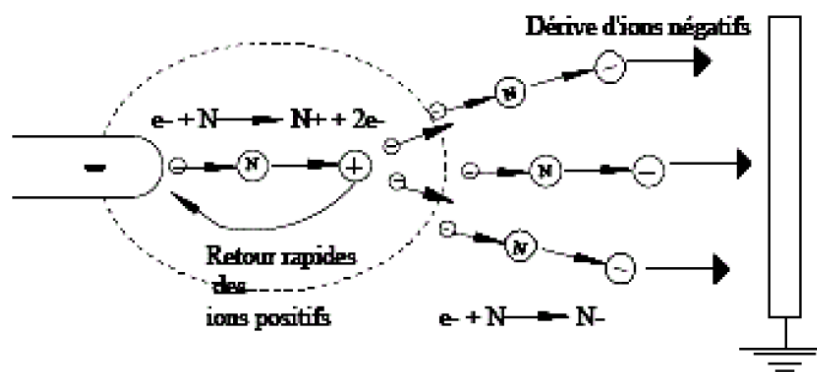


Figure I.14: Descriptif de la décharge couronne négative.

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 [10].

I.14. Théorie des bandes d'énergie

I.14.1. Cas des matériaux isolants parfaits

La structure de bande d'énergie d'un isolant résulte de la combinaison de la nature ondulatoire de l'électron et de la périodicité du réseau cristallin. Les électrons du cristal (intrinsèque ou injectés) ne peuvent occuper qu'un certain nombre d'états d'énergie permis qui se répartissent en bandes séparées par des intervalles d'énergies interdits, communément désignés par le mot anglais « gap ». Comme l'illustre la figure, le matériau isolant présente deux particularités la bande suivante (bande de conduction) est vide et séparée de la bande de valence par un gap, E_g de l'ordre de quelques eV ($E_g > 5$ eV) [09].

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

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

En pratique cependant la situation est beaucoup plus complexe, car d'une part la présence de défauts et d'impuretés dans l'isolant est un fait inévitable et d'autre part le plus grand nombre des isolants qui nous entourent sont souvent des milieux polycristallins ou amorphes (ils ne présentent pas de structure cristalline parfaite). Ces « imperfections » jouent un rôle important dans le

comportement des isolants soumis à une injection de charges en général et une irradiation électronique en particulier. Nous allons donc rappeler leur rôle dans le transport et la localisation de charges [09].

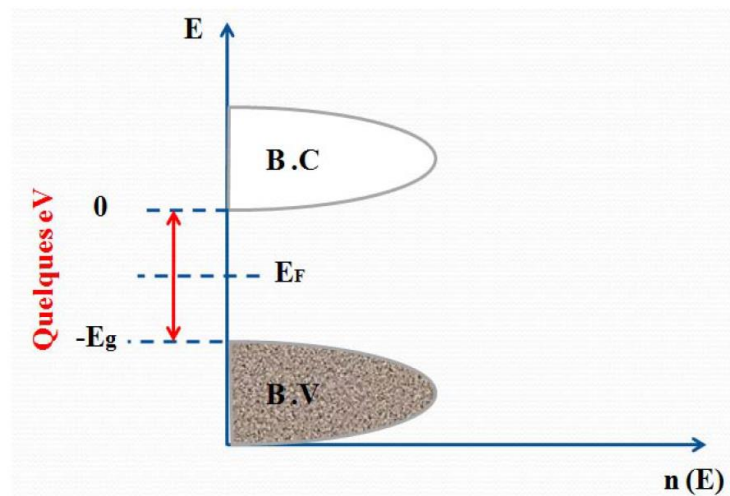


Figure I.15: Représentation schématique de la variation de la densité d'états possibles, dans le cas d'un isolant cristallin parfait. E_F est le niveau de Fermi.

I.14.2. Défauts et impuretés

Les défauts peuvent être aussi bien des défauts ponctuels (lacune, impureté en substitution, atome en position interstitielle, défauts de Schottky et Frenkel, etc.) que des défauts linéaires et bidimensionnels (dislocations et joints de grains) ou bien encore des défauts d'empilement inhérents à la structure du matériau. La présence de ces défauts se traduit par la modification de la structure de bande de l'isolant. Les impuretés, les lacunes, etc, sont capables (si les perturbations qu'elles génèrent sont assez importantes) de créer des niveaux localisés dans la bande interdite. Selon la configuration du défaut, le niveau créé est susceptible de localiser (pendant un temps plus ou moins long) un ou plusieurs électrons pour les restituer, sous l'action d'une excitation, à la bande de conduction (niveau donneur) ou bien de localiser un ou plusieurs trous pour les céder par la suite à la bande de valence (niveau accepteur).

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

La description de la bande d'impuretés ne considère souvent qu'un seul électron, or les états de cette bande peuvent généralement contenir plusieurs électrons. Tout électron introduit dans le solide subit une interaction avec l'électron qui occupe le même site, il apparaît donc une énergie de répulsion U appelée énergie de Hubbard (Figure I.15) [09].

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

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

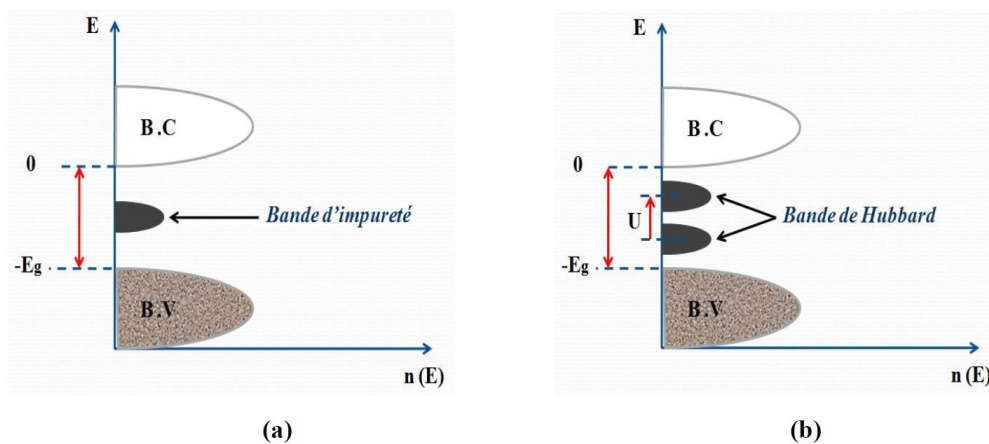


Figure I.16 : (a) : Représentation schématique de la densité d'états possible dans un isolant cristallin contenant un certain nombre de défauts ponctuels. (b) : représentation des bandes de Hubbard dans un schéma de bandes.

I.14.3. Désordre et états localisés

Dans la théorie des bandes du cristal, l'existence d'un gap est reliée aux réflexions de Bragg des ondes électroniques. Cette réflexion suppose un ordre dans l'empilement des atomes du matériau. Cependant, plusieurs raisons peuvent conduire à l'altération de cet ordre, la première est la présence d'un grand nombre de défauts qui provoque des déformations locales du réseau et la deuxième est qu'un grand nombre d'isolants ne possèdent pas naturellement une structure cristalline (les isolants amorphes).

Les travaux théoriques d'Anderson et Mott ont montré que, bien que la notion d'ordre disparaît, la vision de l'isolant en termes d'une bande de « conduction » et d'une bande de « valence » séparés d'un gap reste valable. Cependant, le bas de la bande de conduction qui représentait dans le cas du cristal parfait des états étendus (forte délocalisation de la fonction d'onde de l'électron) représente désormais dans le cas des milieux désordonnés des états localisés (localisation de la fonction d'onde de l'électron) [09].

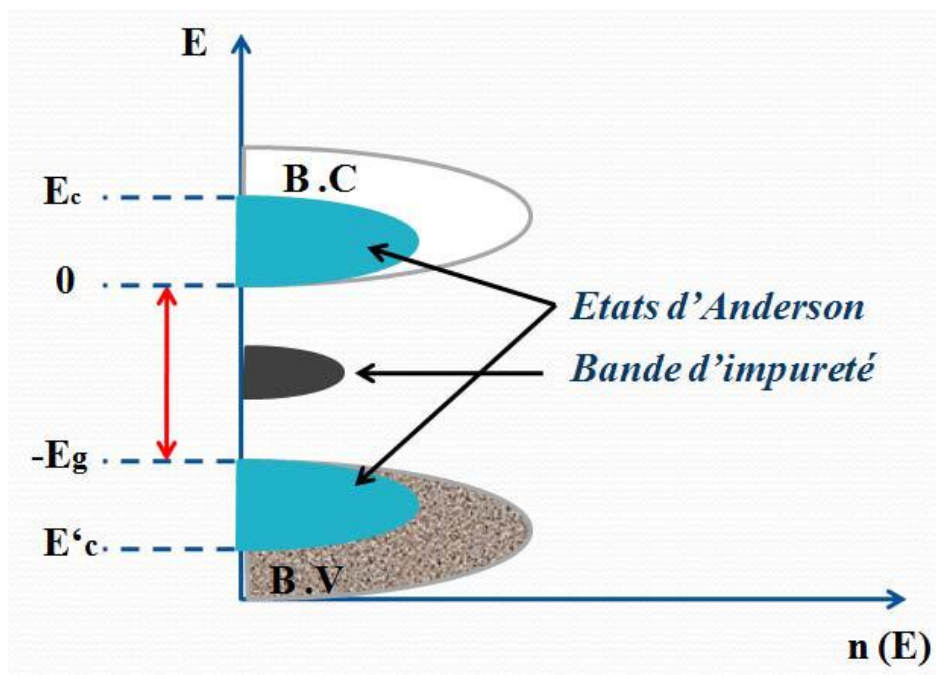


Figure I.17 : Représentation schématique de la densité d'états possibles pour un isolant contenant des défauts et présentant un certain degré de désordre. Les états localisés sont représentés en noir.

En d'autres termes, la situation s'inverse pour l'électron injecté dans le bas de la bande de conduction. En effet, si dans le cas du cristal parfait l'électron était presque libre et simplement « freiné » par les interactions avec les phonons, il ne peut maintenant (milieu désordonné) changer d'état sans l'apport de l'énergie communiquée par ces phonons. Un électron situé en bas de la bande de conduction est donc un électron piégé.

La limite EC, entre les états étendus et les états localisés dans la bande de conduction est appelée seuil de mobilité. Ce seuil dépend du degré de désordre de l'isolant [09].

I.15. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les principes de base des polymères, nous avons commencé par définir les polymères et leurs compositions jusqu'à la classification des polymères, et en mentionnant les domaines d'application, les propriétés électriques des polymères et nous avons également présenté différentes techniques de chargement.

CHAPITRE II

DIFFERENTES METHODES DE NEUTRALISATION DES CHARGES ELECTRIQUES DE SURFACE

II.1. Introduction

Avec le développement de la technologie et l'expansion des industries, le problème de l'électricité statique est apparu, malgré ses avantages positifs, mais leurs conséquences sur l'environnement de travail peuvent causer de nombreux problèmes tels que les incendies et les explosions. Il est nécessaire de trouver un moyen pour éliminer ces charges électriques résiduelles.

II.2. Concept de l'électricité statique

II.2.1 La charge électrique

L'ensemble des phénomènes électriques, dont l'électrostatisme, s'explique à l'aide de théories qui sont toutes basées sur la structure atomique de la matière. La notion de charge électrique occupe une place importante dans ces théories.

Les études expérimentales faites sur la matière à la fin du 19^e siècle, début du 20^e siècle, ont permis d'établir que la matière était constituée principalement de trois particules, plus ou moins grosses, et regroupées de façon ordonnée dans des entités appelées atomes.

Ces trois particules sont :

- les protons, chargés positivement,
- les neutrons, électriquement neutres,
- les électrons, chargés négativement.

Les atomes sont tous composés d'un noyau constitué de protons et de neutrons, et d'un nuage, autour de celui-ci, constitué d'électrons.

C'est grâce à ces différentes charges électriques que l'on explique l'ensemble des phénomènes de l'électricité.

Le noyau est donc de charge positive, et le nuage d'électrons est de charge négative. À l'état « naturel », un atome est globalement électriquement neutre car le nombre d'électrons est toujours égal à celui des protons du noyau (figure II.1).

Si les particules du noyau forment un ensemble très soudé et sont donc difficilement séparables, les électrons sont, pour ceux situés les plus loin du noyau (électrons dits périphériques), plus enclins à se séparer de l'atome auquel ils appartiennent quand ils sont l'objet d'une sollicitation venant de l'extérieur (une réaction chimique, un contact, un frottement).

Un atome peut donc perdre ou gagner un ou plusieurs électrons, ces électrons étant cédés ou captés par les atomes environnants. Dans ce cas, le nombre de protons dans le noyau n'est plus égal au nombre d'électrons autour du noyau. La charge électrique de l'atome est alors positive ou négative. Il devient alors un ion. Dans le cas d'un gain d'électron, c'est un anion, un ion chargé négativement, et dans le cas d'une perte d'électron, c'est un cation, un ion chargé positivement.

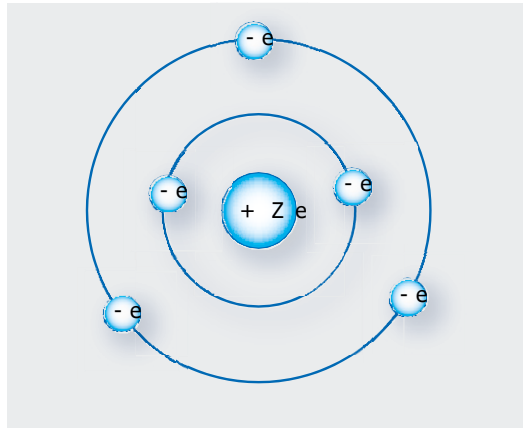


Figure II.1 : Représentation de l'atome.

II.2.2 L'électricité statique

L'électricité statique met en jeu un très grand nombre d'atomes. Les corps sont constitués d'un très grand nombre d'atomes. En effet l'atome est le plus petit élément indivisible qui compose la matière. Les atomes reliés entre eux forment les molécules, les molécules reliées entre elles forment les cellules, les cellules reliées entre elles forment les tissus... Parmi tous ces atomes, certains réagiront à des sollicitations externes pour donner lieu au phénomène de l'électricité statique.

Reprenons une des expériences de base de l'électrostatique qui va nous permettre, d'une part, de voir comment la théorie atomique de la structure de la matière, dont nous venons de rappeler les rudiments, explique le phénomène et d'autre part, d'introduire assez naturellement, toujours pour expliquer le phénomène, la notion de force électrique.

Une baguette de verre bien sec est frottée énergiquement avec un chiffon puis est accrochée à un étrier suspendu à un fil (figure II.2).

Lorsqu'un bâton de résine acrylique (du Plexiglas, par exemple), que l'on a également frotté avec un chiffon, est approché de l'extrémité de la baguette de verre, la baguette suspendue est attirée. Si nous remplaçons le bâton de résine acrylique par une autre baguette de verre qui a subi le même traitement, la baguette suspendue est repoussée.

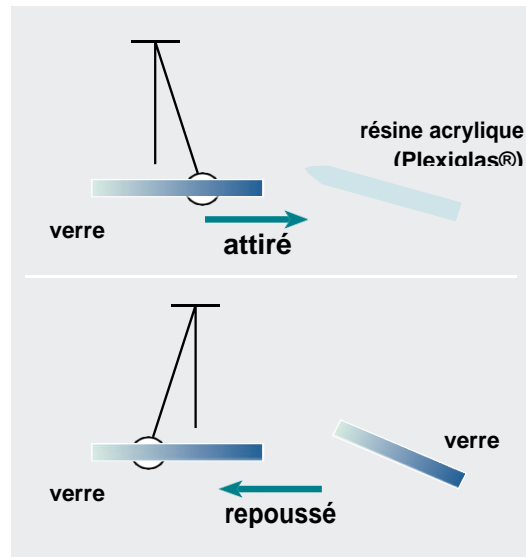


Figure II.2 : Expérience de base de l'électrostatique.

L'explication de cette double expérience tient tout d'abord à la façon dont la matière est constituée mais aussi à la manière dont les deux types « d'électricité » agissent l'un sur l'autre.

Dans la première partie de notre expérience, la baguette de verre et le bâton de résine acrylique possèdent chacun une même charge électrique mais de signe contraire alors qu'initialement ils étaient tous les deux électriquement neutres. Dans la deuxième partie de l'expérience, les deux baguettes se repoussent car, toutes deux en verre, elles portent des charges de même signe [12].

II.3. Les avantages et les inconvénients de l'électricité statique

II.3.1 Les avantages

Amélioration de la qualité, productivité accrue, sécurité des opérateurs, consommation d'énergie plus faible, consommation de matière inférieure, réduction des temps d'arrêt et impact environnemental : d'un point de vue économique, l'utilisation ciblée de l'électrostatique entraîne beaucoup d'effets bénéfiques. [14].

II.3.2 Les inconvénients

Si les charges formées à la surface d'un matériau ne peuvent pas s'écouler à la terre ou ne s'écoulent pas suffisamment vite, elles continuent à s'accumuler et peuvent atteindre un niveau tel qu'elles provoquent une décharge électrique (par étincelles par exemple). Si cela se produit dans une atmosphère explosive, elles peuvent être à l'origine d'une inflammation.

L'électricité statique peut provoquer des accidents aux conséquences désastreuses, en particulier les incendies et explosions. Ces accidents sont à l'origine de blessures, souvent graves (brûlures), de décès, ainsi que de dégâts matériels souvent importants (extension d'incendies à des installations avoisinantes...).[14]

II.4. Les différents types de la neutralisation des charges électriques

II.4.1 Neutralisation par décharge couronne

D'un point de vue technique, il y a deux types de neutralisation par décharge couronne, plus généralement appelés "éliminateurs statiques", ceux qui utilisent le champ électrique pour déplacer les ions de la source vers l'objet chargé et ceux utilisant des gaz circulant (air) pour déplacer un nuage ionique bipolaire au voisinage d'un objet chargé, où le champ sélectionnera les ions appropriés pour réaliser la neutralisation.

Les ioniseurs Corona utilisent des champs électriques forts en appliquant une haute tension à une électrode de faible rayon de courbure pour déplacer les électrons.

En raison de la désintégration des éléments radioactifs présents dans le sol et dans l'air, quelques électrons libres sont toujours présents dans l'atmosphère.

L'espace inter-électrodes est divisé en deux zones : la première, voisine de la pointe où l'ionisation est supérieure à l'attachement électronique (zone de la multiplication électronique), et la seconde où les phénomènes d'attachement sont prépondérants. Dans cette zone (zone de dérive ionique), les ions (de même polarité que le potentiel appliqué à la pointe) dérivent vers l'électrode plane sous l'effet du champ électrique. Les décharges s'amorcent ainsi à la pointe sous l'effet du champ électrique très intense qui y règne et leur évolution est caractérisée par la propagation de canaux ionisés appelés streamers. Les décharges couronne peuvent être de plusieurs types: continues (négatives ou positives) ou alternatives selon le type de la tension appliquée à la pointe. Une décharge couronne alternative peut être considérée comme une suite de décharges positives et négatives séparées par des intervalles de temps durant lesquels la tension appliquée est inférieure aux tensions de seuils d'apparition des décharges couronne dans l'une ou l'autre polarité.

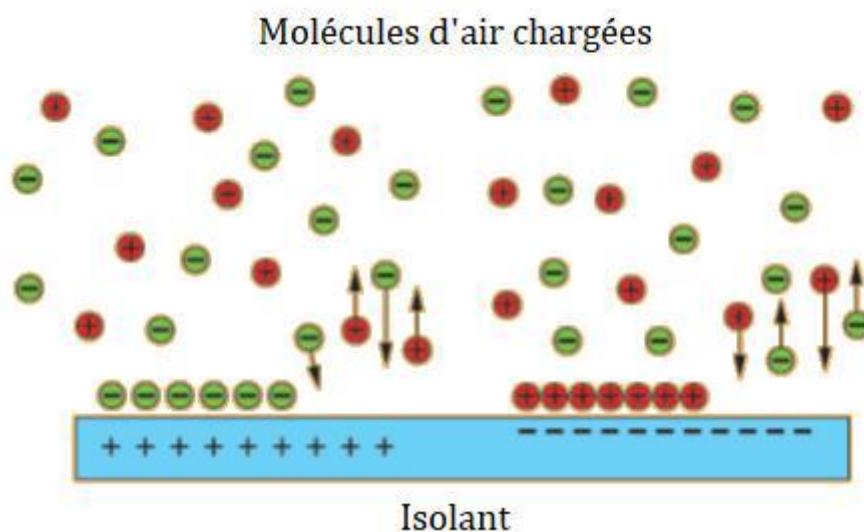


Figure II.3 : Neutralisation d'une surface par ionisation d'air bipolaire.

Lorsqu'une surface précédemment chargée est exposée à une telle décharge couronne, les charges de signe opposé s'attirent et se neutralisent par recombinaison, tandis que les charges du même signe sont repoussées. En général, L'ionisation par décharge couronne ne fournit pas l'équilibre intrinsèque des polarités ioniques que pour l'ionisation alpha. Cependant, des méthodes existent pour s'assurer que l'ioniseur délivre des quantités très proches d'ions positifs et négatifs. L'équilibre ionique est important car un déséquilibre dans l'ioniseur peut inverser le rôle de l'ioniseur.

II.4.2 Neutralisation atmosphérique

La neutralisation atmosphérique ou naturelle des charges statique se fait par la recombinaison d'ions volatils libres dans l'air avec les ions sur la surface du polymère. Cette méthode de neutralisation est considérée comme inefficace avec des charges électriques importantes.

II.4.3 Neutralisation d'augmenter la conductivité

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. Un exemple est celui des vêtements spéciaux des ouvriers intervenant sur les lignes de fabrication des composants microélectroniques.

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 [11].

II.4.4 Neutralisation par augmentation d'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 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.

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 [13].

II.4.5 Neutralisation statique passif

La neutralisation passive est une électrode de faible rayon de courbure, reliée à la masse et placée à proximité de la surface chargée. Lorsque cette dernière s'approche de l'électrode passive, des charges de signe contraire sont créées sur cette électrode par influence électrostatique. Plus la charge sur la surface à neutraliser est importante, ou plus la distance entre celle-ci et l'électrode est petite, la charge image sur l'électrode neutralisante devient importante et de ce fait l'air entourant l'électrode peut s'ioniser. Ainsi des ions sont créés qui, sous l'effet du champ électrique, sont attirés par la surface chargée où les charges de signe contraire seront neutralisées par recombinaison et ceux de même signe seront repoussés.

II.4.6 Neutralisation statiques actifs

Les Neutralisation actifs utilisent une source de haute tension extérieure pour la création des charges. 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 de gaz (de l'air) pour entrainer les charges (Figure II.4)[11].

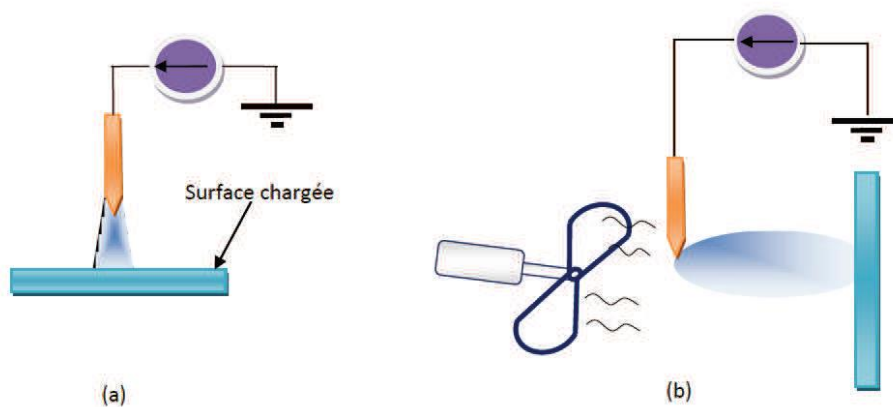


Figure II.4 : Types de Neutralisation statiques actifs: (a) charges entraînées par le champ, (b) charges entraînées par un flux d'air.

II.4.7 Neutralisants statiques nucléaires

Neutralisants statiques nucléaires utilisent une source nucléaire, le polonium 210, qui est un émetteur de particule alpha. La particule alpha, un noyau d'hélium, entre en collision avec des molécules d'air. Les molécules de gaz qui perdent des électrons deviennent des ions positifs. Les électrons délogés ne restent pas très longtemps avant d'être capturés par des molécules de gaz neutres, formant des ions négatifs (Figure II.5)

Les ioniseurs alpha produisent toujours des quantités équilibrées d'ions positifs et négatifs. Ceci est avantageux dans certaines applications impliquant des composants extrêmement sensibles aux décharges électrostatiques. Un nombre égal d'ions positifs et négatifs signifie que l'ioniseur est toujours équilibré à 0 V et neutralise toute la surface chargée.

L'ionisation alpha est utilisée dans le commerce pour des applications impliquant des environnements explosifs ou inflammables, ou dans des applications nécessitant un équilibre précis de l'ionisation.

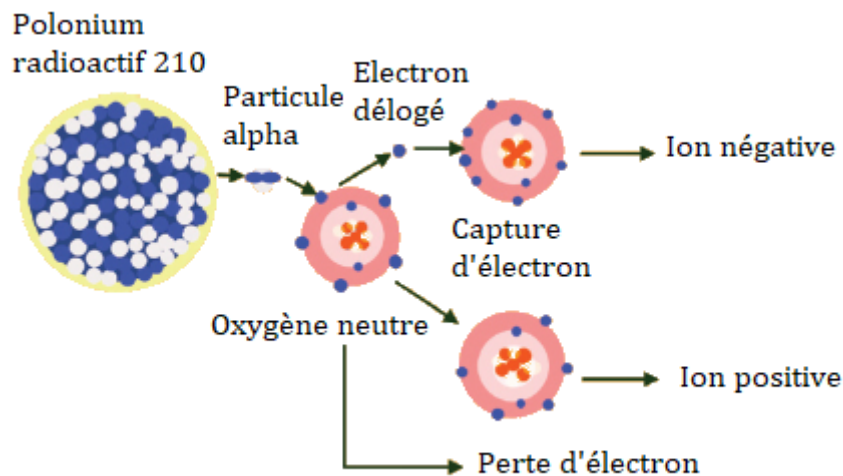


Figure II.5 : Représentation schématique du processus de production des ions bipolaires.

Le processus est coûteux car les ioniseurs alpha perdent la moitié de leur force tous les 143 jours (la demi-vie d'une source radioactive). Habituellement, ils doivent être remplacés chaque année. Bien que les ioniseurs alpha aient plus de 25 ans de sécurité, ils sont soumis à la réglementation gouvernementale. Tout ce qui est radioactif rend les gens nerveux. Pour ces raisons, l'utilisation de l'ionisation alpha n'est pas aussi répandue que celle de l'ionisation par décharge couronne [15].

II.4.8 Neutralisation par le soufflage d'air ionisé

L'ionisation de l'air. En effet, les charges accumulées sur l'isolant attirent les Ions de polarité opposée présents dans l'air et sont ainsi neutralisées.

On distingue deux grandes familles d'éliminateurs selon le mécanisme employé pour ioniser l'air :

- Les éliminateurs à induction et à haute tension utilisant l'effet couronne.
- Les éliminateurs radioactifs utilisant le rayonnement [11].

II.4.10 Augmentation de la conductivité des corps isolants

La conductivité du cuir, du carton, du caoutchouc, des textiles ou matières similaires, des plastiques, des liquides, peut être augmentée dans la masse ou superficiellement par addition ou application de produits dits « antistatiques ».

Certains polyols, des composés organiques soufrés tels que les sulfonâtes, azotés tels que les amines, les sels d'ammonium quaternaires, les amides, etc., ainsi que certains dérivés de l'acide phosphorique et de l'acide phosphoreux augmentent la conductibilité du corps traité en liaison avec l'eau absorbée. À l'inverse, les métaux, le noir de fumée, le graphite, agissent par conduction électronique et leur efficacité est indépendante du degré hygrométrique de l'atmosphère ambiante. Certains produits, appliqués en général sous forme d'aérosol, ont une durée de vie limitée et l'application doit être renouvelée à intervalles réguliers [12].

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons discuté de l'électricité statique en termes de définition, d'avantages et d'inconvénients, ainsi que de différentes techniques pour éliminer les charges électriques résiduelles qui peuvent entraîner des pertes financières importantes et des risques pour la sécurité. Il est important de noter que la neutralisation des charges statiques est un processus complexe qui dépend de nombreux facteurs, tels que la quantité de charges statiques présentes, l'environnement dans lequel les charges sont générées et les exigences spécifiques de chaque application.

CHAPITRE III

ETUDE EXPERIMENTALE DU PROCESSUS DE LA NEUTRALISATION

III.1. Introduction

Ce chapitre décrit les installations expérimentales et les méthodes utilisées au cours de notre étude. Il est consacré à l'étude de la neutralisation et des facteurs influençant de cette expérience.

III.1. Contexte et problématique

Les polymères isolants sont largement utilisés dans les applications électriques et électroniques en raison de leur haute propriétés électrique ; thermique ; mécanique... Cependant, ces polymères ont tendance à accumuler des charges électrostatiques sur leur surface, ce qui peut entraîner des problèmes de performance et de fiabilité.

Lorsque les charges électrostatiques s'accumulent sur la surface d'un polymère isolant, elles peuvent provoquer des décharges électriques imprévues, ce qui peut endommager les composants électroniques et perturber le fonctionnement des circuits. De plus, les charges statiques peuvent attirer la poussière et les contaminants, ce qui peut entraîner une accumulation de particules et une dégradation de la performance à long terme. Ainsi peuvent provoquer des incendies et des explosions aux endroits où se trouvent des produits chimiques inflammables.

III.2. Objectifs de la recherche

L'objectif de cette étude consiste à utiliser la neutralisation par la décharge couronne pour prévention contre les charges électrostatique résiduelles sur la surface des polymères isolants (polypropylène) sous l'effet de différents facteurs électriques et physiques à savoir : l'effet de la haute tension ; effet de vitesse de neutralisation; effet de fréquence ; effet de la distance inter électrodes ; effet d'humidité.

III.3. La neutralisation des charges électriques par décharge couronne

La décharge couronne est une méthode très efficace pour éliminer les charges statiques résiduelles sur la surface des polymères isolants. Elle peut éliminer les charges statiques sur de grandes surfaces en peu de temps, ce qui la rend adaptée aux applications nécessitant un traitement rapide et efficace.

III.4. procédure expérimentale

La figure III.1 montre la représentation schématique de la configuration expérimentale. Les échantillons de film PP vierges de 70 μm d'épaisseur et de forme carrée (50 mm \times 50 mm) ont été chargés en les exposant pendant 10 s à la décharge corona négative générée par une électrode double de type fil haute tension, face à une électrode à plaque mise à la terre (aluminium; 120 mm \times

90 mm). L'électrode haute tension était constituée d'un fil de tungstène (diamètre 0,2 mm) supporté par un cylindre métallique. Le fil et le cylindre étaient alimentés à partir de la même alimentation haute tension réglable 50 kV, 6 mA (modèle SL 300 SPELLMAN). La distance entre le fil et la surface de l'électrode plaque était de 30 mm ; une grille métallique est installée à mi-distance et reliée à la terre par une résistance calibrée.

Trois minutes après la charge corona en courant continu, l'échantillon a été transféré à une vitesse constante de 3 cm/s pour la mesure du potentiel de surface avec une sonde électrostatique (modèle 3450) reliée au voltmètre électrostatique (TREK, modèle 341B) connecté à un PC. L'acquisition et le traitement des données expérimentales ont été effectués dans l'environnement LabView. Après la mesure du potentiel de surface, l'échantillon a été déplacé sous une électrode à double fil pour le processus de neutralisation à une vitesse constante de 3 cm/s. Le fil était situé à 30 mm au-dessus de l'électrode mise à la terre et connecté à un amplificateur haute tension 30 kV, 20 mA (modèle 30/20A, Trek Inc.). L'amplitude V_n et la fréquence f_n de la haute tension alternative ont été ajustées à l'aide d'un générateur de fonctions synthétisées (modèle FG300, Yokogawa, Japon). Encore une fois, après élimination de l'électricité statique, le potentiel de surface a été mesuré par le même voltmètre.

Le taux de neutralisation N [%] a été calculé à partir des valeurs moyennes du potentiel de surface avant (V_{avant}) et après ($V_{après}$) le processus de neutralisation.

$$D_t = \frac{V_{t0} - V_t}{V_{t0}} * 100 \text{ (%)}$$
 (1)

Toutes les expériences ont été réalisées à l'air ambiant (humidité relative 40–44% ; température: 23–25 °C).

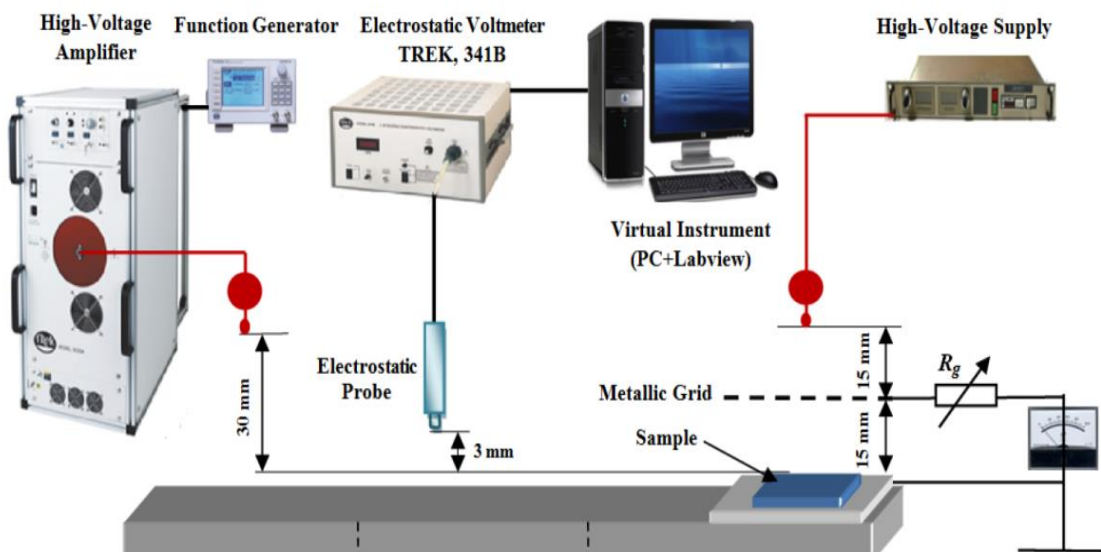


Figure III.1. : Dispositif expérimental pour l'étude de la neutralisation des polymères par décharge couronne.

III.5. Résultats et discussion

Dans ce chapitre, nous avons étudié la neutralisation des charges électriques résiduelles à la surface des échantillons de polymère sous l'influence de divers facteurs électriques ou physiques en utilisant la technique de décharge couronne.

III.5.1. Effet de la haute tension

Pour étudier l'effet de la tension sur la neutralisation nous avons appliqué différents niveaux des tensions sur les échantillons de polypropylène (16kV, 18kV et 20kV) sous les mêmes conditions (la fréquence $f=50$ Hz, la distance inter les électrodes fixe = 30mm, et la vitesse de neutralisation =2,5Cm/s)

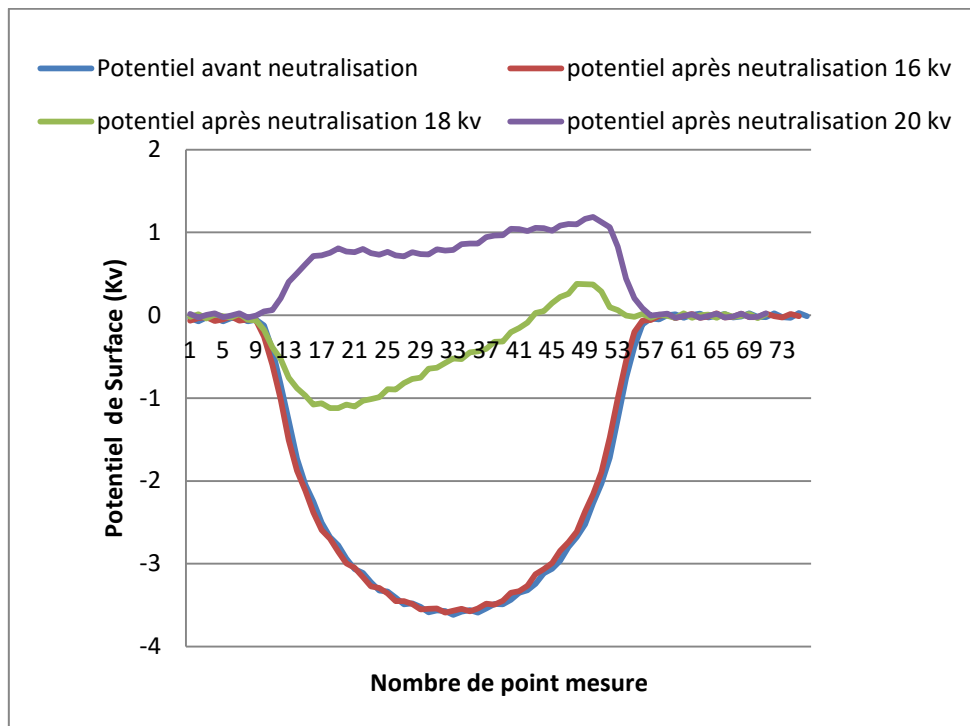


Figure III.2. Profil du potentiel de surface Avant et après neutralisation en fonction de la tension neutralisante 16kV; 18kV; 20kV.

A travers de Figure III.2, on observe que plus la tension neutralisante augmente, plus le taux de neutralisation devient important. À mesure que la tension augmente, des charges électriques de signe opposé commencent à apparaître, en particulier à partir de la 18kV, ce qui indique que les charges électriques négatives déposées précédemment sont entièrement neutralisées. Cette observation peut être expliquée par le fait que les densités des ions positifs et négatifs générés dans la décharge couronne dépendent principalement de la haute tension appliquée.

III.5.2. Effet de la vitesse de neutralisation

Dans cette partie nous allons étudier l'effet de la vitesse de neutralisation à savoir : 2.5cm/s, 2cm/s et 3cm/s, sur taux de neutralisation.

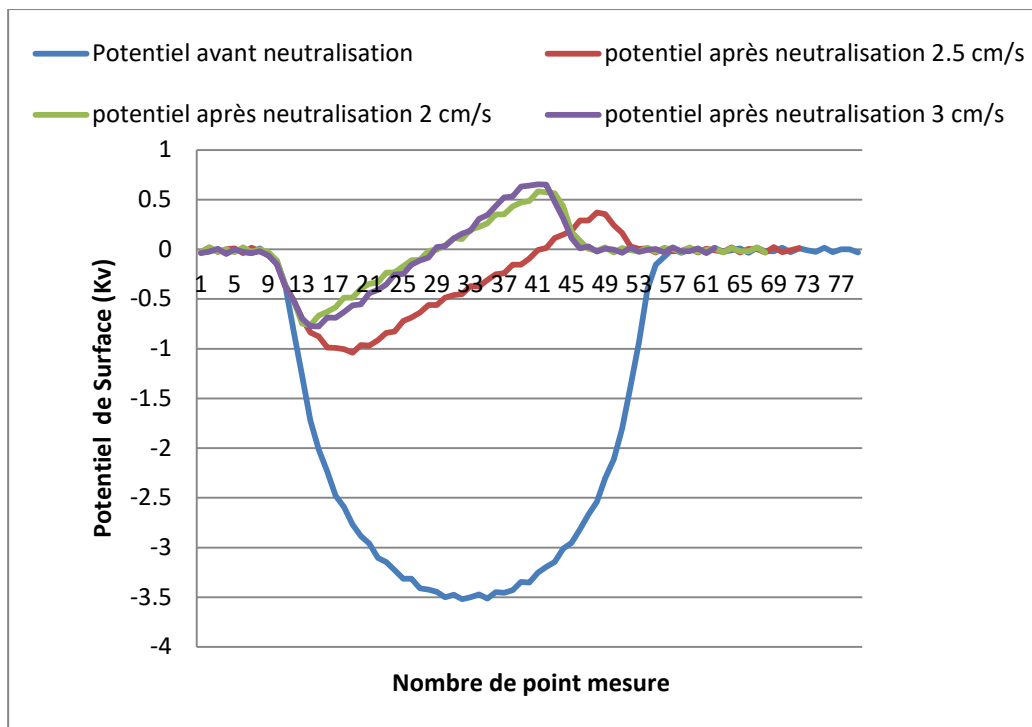


Figure III.3. Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la vitesse de déplacement sous les mêmes conditions : $V_n=18\text{kV}$, $f_n= 100\text{Hz}$, $d= 30\text{mm}$,

A travers la figure III.3, on peut voir clairement que la vitesse de déplacement de l'échantillon a un effet négligeable sur la neutralisation.

III.5.3. Effet De La Fréquence

Des mesures de profil de potentiel avant et après la neutralisation ont été effectuées sur des échantillons de polypropylène à des fréquences de 50 Hz, 100 Hz et 150 Hz, avec les mêmes conditions expérimentales (tension de neutralisation $V_n = 18\text{ kV}$, distance inter-électrode $d = 30\text{ mm}$ et vitesse de neutralisation $v = 2,5\text{ cm/s}$). Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure III.4.

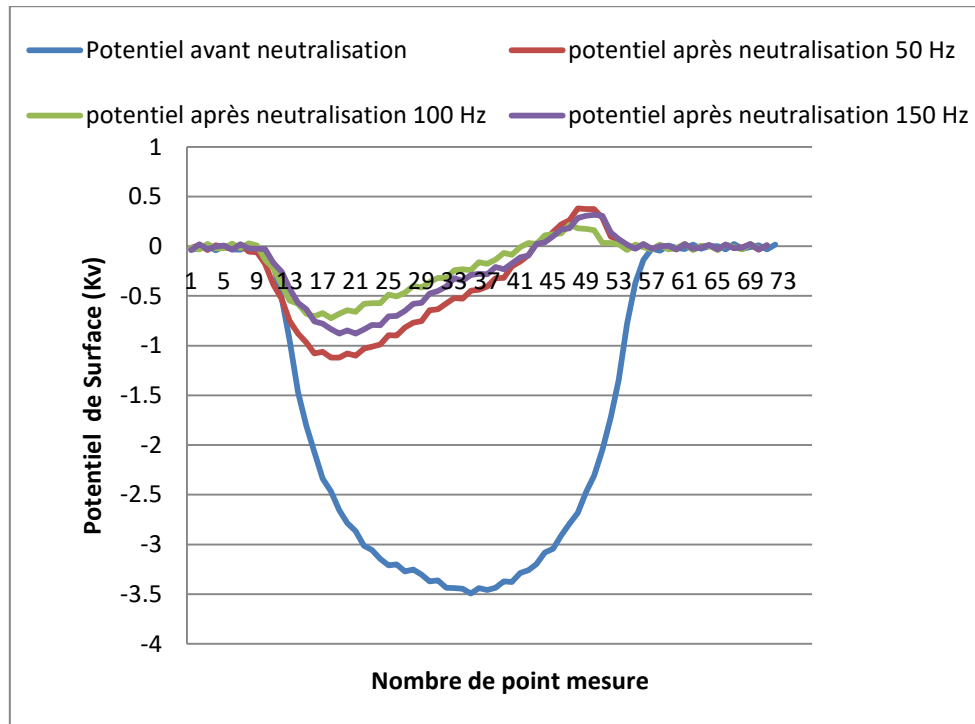


Figure III.4. Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la fréquence.

($V_n = 18$ kV, $d = 30$ mm et $v = 2,5$ cm/s)

A travers de figure, on observe que le changement du niveau de fréquence n'a aucun effet important sur la neutralisation.

III.5.4.Effet de la distance inter électrode :

Sous des conditions expérimentales identiques, des mesures de distribution de potentiel avant et après la neutralisation ont été réalisées sur des échantillons de polypropylène à différentes distances inter-électrodes (25 mm, 30 mm et 35 mm). Les résultats de ces mesures sont présentés dans la figure III.5

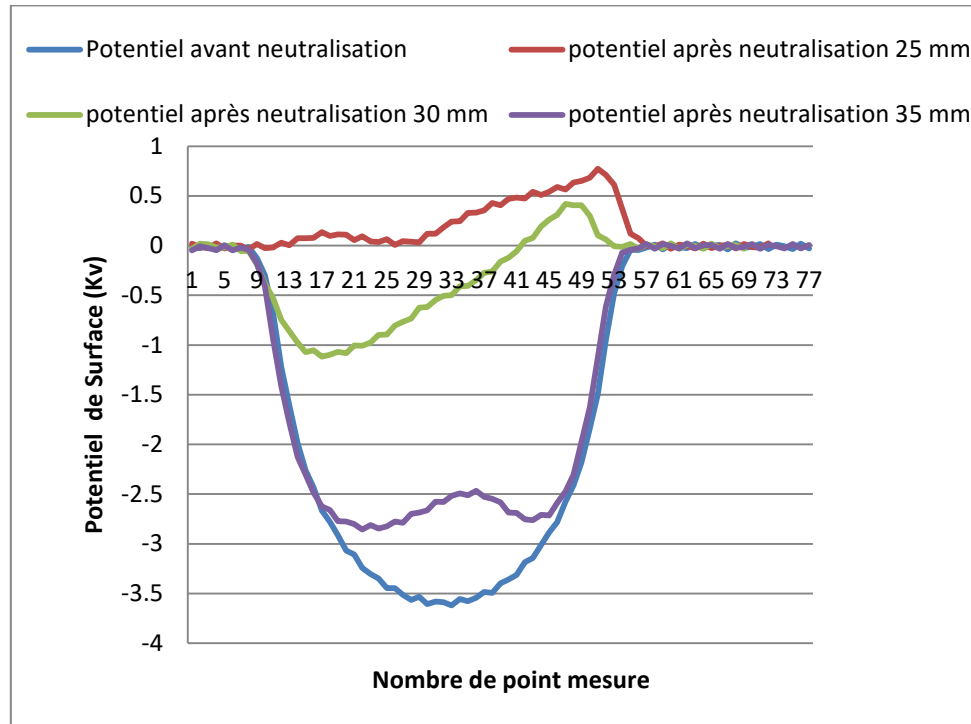
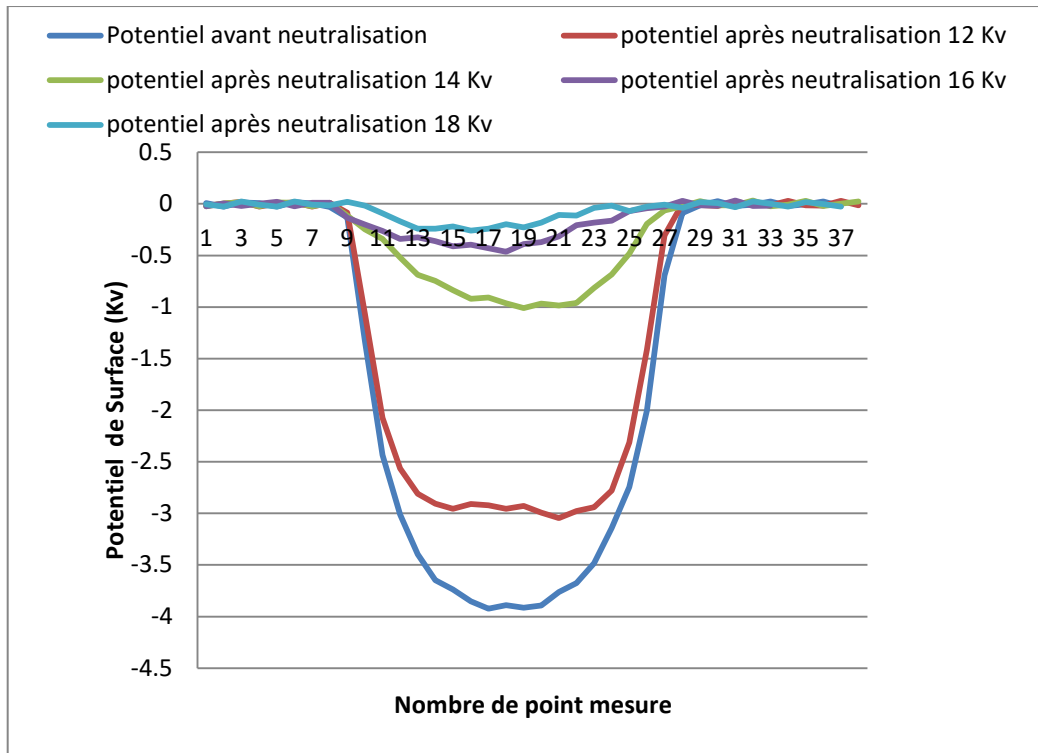


Figure III.5. Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la distance inter électrode 25mm; 30mm; 35mm

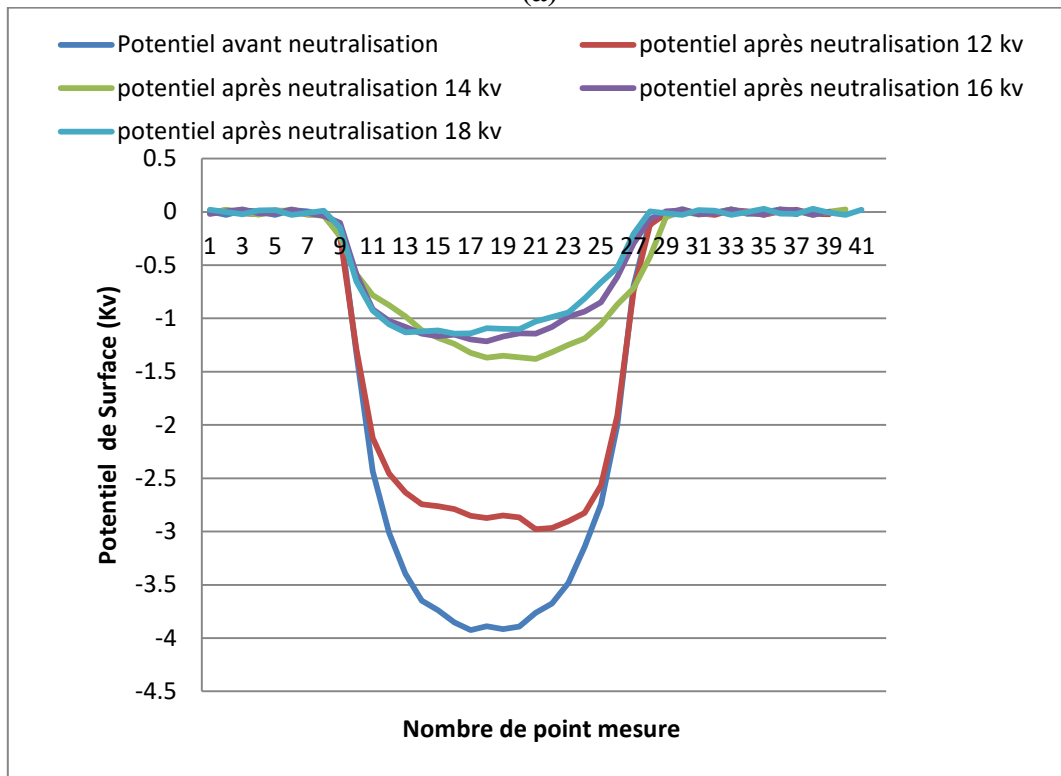
La figure III.5 illustre l'impact significatif de la distance inter-électrodes sur le processus de neutralisation. On observe que le taux de neutralisation augmente progressivement à mesure que la distance inter-électrodes diminue. Cette observation peut s'expliquer par le fait que, lorsque la distance inter-électrodes est réduite, les charges électriques générées par la décharge couronne alternative ont plus de temps pour traverser l'espace inter-électrodes et neutraliser la surface du matériau, ce qui conduit à une augmentation de la neutralisation.

III.5.5.Effet d'humidité

Dans cette étude, nous avons étudié l'effet d'humidité sur la neutralisation en réalisant une série d'expérience sous deux taux d'humidité différents (RH=40 et 50%).



(a)



(b)

Figure III.6. Profil du potentiel de surface avant et après neutralisation en fonction de la d'humidité : (a) RH=50% ; RH=40%

A travers la Figure III.6 (a) et (b), on voit un effet remarquable d'humidité sur le taux de la neutralisation notamment à partir du potentiel 14kV; Cette observation peut s'expliquer par l'oxydation de la surface du matériau provoqué par l'effet de la décharge couronne qui peut ensuite favoriser la fixation d'humidité, cette fixation peut rendre la surface du matériau plus conductrice, ce qui peut alors favoriser la conduction surfacique des charges électriques.

III.6. Conclusion

Ces expériences ont montré l'effet de facteurs électriques et physiques sur le processus de neutralisation des charges négatives à la surface du polymère.

Les résultats expérimentaux obtenus grâce à ces expériences ont indiqué que la haute tension, la distance inter électrode et l'humidité ont un effet significatif sur le processus de neutralisation, tandis que la fréquence et la vitesse de déplacement ont un effet négligeable.

Conclusion générale

Les polymères isolants sont largement utilisés dans de nombreuses applications en raison de leurs excellentes propriétés électriques, chimiques, physiques.... Cependant, l'utilisation de ces matériaux peut également présenter un risque d'accumulation des charges statiques indésirables qui peuvent causer des problèmes désastreux.

L'élimination de ces charges néfastes une opération indispensable, La neutralisation par décharge couronne est une technique efficace, importante, et également respectueuse de l'environnement largement utilisé dans de nombreuses applications industrielles pour neutraliser les charges électrostatiques sur les matériaux isolants. Cette étude nous a permis de tirer les points suivants :

- La production d'électricité est un phénomène complexe et est affectée par de nombreux facteurs.
- L'électricité statique présente de nombreux avantages dans le domaine industriel, et elle présente aussi des inconvénients, notamment les charges résiduelles.
- La neutralisation par décharge de couronne est une technique très efficace et la plus utilisée dans le processus de neutralisation.
- Le processus de neutralisation est affecté par de nombreux facteurs électriques et physiques.
- La haute tension, la distance entre les électrodes et l'humidité ont un effet très important sur le processus de neutralisation.
- La fréquence et la vitesse de neutralisation n'ont pratiquement aucun effet sur le processus de neutralisation.

Références bibliographiques

- [01] Bourekba Marwa "Etude des caractéristiques des matériaux isolants par la méthode de DPS" thèse de Master UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA, 2109
- [02] <https://www.techno-science.net>
- [03] <https://fr.wikipedia.org/>
- [04] Mohammed Ettayib MEGUIRECHE "Influence Du Vieillissement Electrique Sur Les Propriétés D'un Polymère Isolant Utilisé Dans Le Transport D'énergie Electrique" thèse de Master UNIVERSITE DE MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, 2015/2016.
- [05] Z. Ibtissam ., Elaboration et caractérisation d'un matériau composite polymère-ZnO, université de Tlemcen, 02 juillet 2017
- [06] R. RARIVOSON, les polymères naturels : fabrication d'un emballage film à base de fécule, université d'Antananarivo., 2016.
- [07] R. Mohammed., Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes. universite djillali liabes de-sidi-bel-abbes., 2015
- [08] G.Fouad, Neutralisation des charges électriques sur la surface des polymères isolants, thèse de Master UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2020/2021
- [09] R.Karim, Analyse de la dynamique des charges à la surface des polymères isolants, thèse Doctorat Université 8 Mai 1945 – Guelma, 2015.
- [10] M. Abdelbasset, Etude de l'écoulement des charges déposées sur la surface du polypropylène par la méthode de déclin de potentiel en surface, thèse de Master Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017.
- [11] R. Mohammed, Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes, thèse de Doctorat Universite djillali liabes de sidi-bel-abbes, 2015.
- [12] INRS, Phénomènes électrostatiques Risques associés et prévention, 2019.
- [13] F. Roqiya., neutralisation des charges sur la surface des isolantes applications sur les cheveu, thèse de Master, Université 8 Mai 1945 – Guelma.2018.
- [14] B.Yassine et B. Mohamed Oussama, Caractérisations de la décharge couronne dans le précipitateur électrostatique (PES) en différentes configuration, Thèse de Master, 2019/2020.
- [15] D.Khaled, Utilisation des tensions alternatives pour la neutralisation des matériaux granulaires chargés, Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès, 2018.
- [18] R.karim., Robust optimum operating conditions for AC corona neutralization of insulating materials. 2020.
- [19] S. Jouenne, thèse de Doctorat ; option chimie et physicochimie des polymères; Université Pierre et Marie Curie, 2005.