



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 de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : **Sciences et Technologie**

Filière : **Génie Mécanique**

Spécialité : **Maintenance Industrielle**

Thème

*Amélioration du fonctionnement du séparateur
électrostatique à plan incliné*

Présenté par :

BELGHITAR SALIM et SALMI BILAL

Devant le jury :

BAATOUCH Mona

UKMO

Président

KHETTABI Rym

UKMO

Examineur

ROUAGDIA Karim

UKMO

Encadreur

Année universitaire 2019/2020

REMERCIEMENT

Une grande gratitude a mon encadreur ROUAGDIA KARIM, qui m'a soutenu pendant toutes les étapes de mémoire en manifestant un grand intérêt pour mon travail.

Mes remerciements iront également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer mon modeste travail.

A tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin, par un geste, une parole ou un conseil, je leur dis merci.

Sans oublier tous nos enseignants qui nous ont assurés des études de haut niveau et qui nous permis d'acquérir des connaissances.

DÉDICACE

S.BELGHITAR

Je remercie Dieu tout puissant de m'avoir aidé pour achever ce modeste travail que je dédie :

À mes chers parents, ma mère et mon père, pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour leur patience, leur amour et leurs encouragements.

Que ce travail leur apporte joie et fierté.

À mes chères frères KHALED et SLIMAN et à toute ma famille,

À tous mes enseignants,

À mon ami de travail B.SALMI. sans oublier mon amis SALEM ,LAKHDAR qui m'ont aidé, merci à eux, à leur soutien et leur compréhension.

B.SALMI

Je dédie ce modeste travail a mes parents, mes estime pour eux sont immenses, je leurs remercie pour tout ce que ils ont fait pour moi.

Que dieu leurs préserve une longue vie heureuse.

A tous mes amis.

Je leurs dédie ce travail et leurs souhaite un avenir à la hauteur de vos ambitions.

A Toute ma famille, Tous ceux que j'aime, qui m'aiment et me comblez de conseils.

A tous ceux qui, un jour, ont pensé à moi, les plus beaux mots ne sauraient exprimer ma redevance.

TABLE DES MATIERES**PAGE**

Introduction générale	01
------------------------------	-----------

Chapitre I : Etat du l'art

I.1. Historique	03
I.2. Polymères.	03
I.2.1. Définition du polymère	03
I.2.2. Polymères organiques polaires	04
I.2.3. Polymères organiques apolaires	04
I.2.4. Matériaux isolants fibreux	04
I.3. L'intérêts des polymères dans notre vie	08
I.4. Classification des polymères	09
I.4.1. Classification selon l'origine	09
I.4.2. Classification selon l'architecture	09
I.4.3. Classification selon la structure chimique	10
a. Les homopolymères	10
b. Les copolymères	10
I.4.4. Classification selon le comportement thermique	11
a. Les thermoplastiques	11
b. Les thermodurcissables	11
c. Les élastomères	11
I.5. Applications des polymères	11
I.6. Les caractéristiques des polymères	12
I.6.1. Structure du polymère : plusieurs niveaux de polymères	12
a. Structure primaire	12
b. Structure secondaire	13
c. Structure tertiaire	14
I.6.2. Différents types de polymères	14
a. Les homopolymères	14

b. Les copolymères	15
I.7. Propriétés diélectriques des isolants solides	16
I.7.1. La polarisation et le déclin de potentiel	16
I.7.1.1. La fonction réponse diélectrique	17
I.7.1.2. Déclin de potentiel par polarisation diélectrique	18
I.7.1.3. Polarisation par charge d'espace	19
I.7.2. Mécanismes d'injection de charges et le déclin de potentiel	19
I.7.2.1. Effet Schottky	21
I.7.2.2. Effet Fowler-Nordheim	21
I.7.3. La conduction électrique et le déclin du potentiel	22
I.7.3.1. Conduction de surface	23
I.7.3.2. Conduction électrique contrôlée par le volume	23
I.7.3.3. Conduction limitée par pièges	24
I.7.3.4. Activation par champ - Dépiégeage de charges	25
I.7.3.5. Conduction par saut	25
I.7.3.6. Conduction ionique	26
I.7.4. Neutralisation atmosphérique et le déclin de potentiel	26
I.7.5. L'effet piézoélectrique	26
I.8. Propriétés mécaniques	27
I.9. Propriétés optiques	28
I.10. Effet de l'eau sur les polymères	29
I.10.1 Actions chimiques de l'eau	29
I.10.2 Actions physiques de l'eau	29
I.11. Les polymères biodégradables	32
I.12. Les matériaux composites	35
I.12.1 Les matrices polymères	36
I.12.2. Les renforts	36
I.13. Conclusion	39

Chapitre II : Différentes techniques de la séparation électrostatique

II.1. Introduction	40
II.2. Séparation tribo-électrostatique des matériaux plastiques	40
II.2.1. Mécanisme de charge triboélectrique	40
II.2.2. Série triboélectrique	42
II.2.3. Dispositifs de charge triboélectrique	44
II.2.3.1. Chargement par ventilateur	44
II.2.3.2. Chargement par cyclone	45
II.2.3.3. Chargement par vibro-transporteur	45
II.2.3.4. Chargement par lit-fluidise	46
II.2.4. Forces aérodynamiques et électrostatiques	49
A . Forces de la pesante	49
B . Forces de LONDON –van der WAALS	49
C . Forces électrostatiques	50
II.3. Installations de séparation tribo-électrostatique	52
II.3.1. Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires	52
II.3.1.1. Séparateur triboélectrique à tapis roulant	53
II.3.1.2. Séparateur triboélectrique à chute libre	54
II.3.1.3. Séparateurs industriels	54
II.3.2. Séparateurs tribo-électrostatique pour les mélanges poudreux	59
II.3.2.1. Séparateur électrostatique à convoyeur	59
II.3.2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique a chute libre	60
II.3.2.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes verticales	61
II.3.2.4. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants	62
II.3.2.5. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes cylindriques	63
II.3.2.6. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses	63
II.4. Conclusion	65

Chapitre III : Nouveau prototype du séparateur à plan incliné

III.1. Introduction	66
III.2. Nouveau prototype du séparateur à plan incliné	66
III.2.1. description	66
III.2.2. Comparaison des dispositifs	68
III.2.3. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé	69
III.3. Procédure expérimentale	69
III.3.1. Mesure de la charge triboélectrique	70
III.3.2. Mesure de la masse granulaire	71
III.4. Les matériaux	71
III.4.1. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	72
III.4.2. High Impact Polystyrene (HIPS)	72
III.5. Conclusion	74
Références bibliographiques	75

LISTE DES FIGURES

Figures chapitre I		page
Figure I.1. Classification des différentes matières utilisées pour la fabrication des fibres		5
Figure. I.2. Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia.		9
Figure I.3. Evolution de la polarisation molaire en fonction de la fréquence du champ appliqué		17
Figure I.4. Diagrammes de bande aux interfaces		20
Figure I.5. Diagramme d'énergie des porteurs dans un matériau isolant		23
Figure I.6. Abaissement de la barrière de piège par effet Poole-Frenkel		25
Figure I.7 : Différentes sollicitations mécaniques.		27
Figure I.8. : Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique.		28
Figure I.9: Classification des polymères biodégradables, (Avérous, 2004).		33
Figures chapitre II		
Figure II.1. L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux positivement et les petites négativement.		40
Figure II.2. Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.		41
Figure II.3. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions		42
Figure II.4. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur		44
Figure II.5. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.		45
Figure II.6. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge L_{tube} : longueur du tube.		46
Figure II.7. Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation.		47
Figure II.8. Dispositif à lit fluidisé		48
Figure II.9. Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique		48
Figure II.10. La force attractive de London-Van der		49
Figure II.11. Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères		50

Figure II.12. Force de coulomb entre deux sphères chargées(a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)(b) : répulsion, charges de même signe ($q_1 q_2 > 0$)	51
Figure II.13 Séparation électrostatique de matériaux granulaire à base de plantes croquettes	53
Figure II.14. Représentation schématique d'un séparateur TBS.	53
Figure II.15. Séparateur tribo électrostatique à chute libre développé au sein du laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême.	54
Figure II.16. Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique.....le matériau; 10- tube collecteur; 11- -déflecteur; C1,...., C5- collecteurs.	55
Figure II.1. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpc	55
Figure II.18. Prototype de laboratoire séparateur tribo-aéro-électrostatique.	56
Figure II.19. Séparateur tribo-aero-électrostatique pour les plastiques mixtes..... électrodes haute tension (convoyeurs à bande métallique); 11: lit fluidisé.	57
Figure II.20. Séparateur tribo-aero-électrostatique à deux étages (a) et Schéma de séparation ABS/ HIPS / PVC (B).	58
Figure II.21. Séparateur électrostatique à tapis roulant.	59
Figure II.22. Schéma descriptif du collecteur de produits.	60
Figure II.23. Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique	60
Figure II.24. Schéma descriptif du séparateur électrostatique	61
Figure II.25. Séparateur tribo-aéro électrostatique à deux électrodes verticales.	62
Figure II.26. (a) : photographie et (b) : représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants.	62
Figure II.27. Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes tournantes ; 1 : Moteur CC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs collecteurs	63
Figure II.28 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses	64
Figures chapitre III	
Figure III.1 : Nouveau prototype du séparateur à plan incliné	66
Figure III.2: Différentes configurations interelectrode	67
Figure III.3: Alimentation haute tension continu ; (a) polarité positive, (b) polarité négative	68

Figure III.4: (a) : Séparateur à plan incliné, (b) séparateur à double étage	68
Figure III.5 : Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé au laboratoire LGEG.	69
Figure III.6 :Représentation schématique de l'installation expérimentale du processus de séparation électrique	70
Figure III.7 : La cage de Faraday reliée avec l'électromètre au laboratoire LGEG	71
Figure III.8 : Balance numérique	72

LISTE DES TABLEAUX

Tableaux du chapitre I	page
Tableau 1.1 : Propriétés spécifiques des biopolymères et applications attendues (Rabetafika et coll., 2006)	34
Tableau 1.2 : Propriétés modifiées par l'incorporation d'une charge	38
Tableau du chapitre II	
Tableau II.1. Série triboélectrique	43
Tableau du chapitre III	
Tableau III.1: Les principales différences entre les dispositifs	69
Tableau III.2: Taux de présence des matériaux ABS et HIPS dans les équipements électriques et informatiques.	73

Nomenclatures

ABS : Acrylonitrile butadiène styrène.

ABS-PC : Acrylonitrile Butadiène Styrène-Polycarbonate.

HIPS : Polystyrène choc (*High Impact Polystyrene* en anglais).

PBu : Polybutadiène.

PCL : Polycaprolactones.

PEA : Polyesteramides.

PE : Polyéthylène.

PHB : Polyhydroxybutyrate.

PHBV : Polyhydroxybutyrate-cohydroxyvalerate.

PMMA : Polyméthacrylate de méthyle.

POE : Polyoxyde d'éthylène.

PP : Polypropylène.

PS : Polystyrène.

PTFE : Polytétrafluoroéthylène.

PU : Polyuréthannes.

PVC: Polychlorure de vinyle.

Introduction générale

Le plastique est un matériau important, omniprésent dans notre économie et dans notre vie quotidienne. Il possède des propriétés multiples qui contribuent à relever un certain nombre des défis qui se posent à notre société. Le recours à des matériaux d'isolation haute performance contribue à abaisser les factures énergétiques. Dans le secteur de l'emballage, les matières plastiques permettent d'assurer la sécurité des aliments et de lutter contre le gaspillage alimentaire. Associés à l'impression en 3D, les matériaux plastiques biocompatibles rendent possibles des innovations médicales qui peuvent sauver des vies humaines. Ainsi l'utilisation de matériaux légers et innovants dans les véhicules ou les avions permet d'économiser du carburant et de réduire les émissions de CO₂ ! [1]

Au cours des dernières années, les activités de recyclage sur les matériaux polymères augmentent et deviennent de plus en plus importantes [2]. Les méthodes de récupération des matériaux plastiques. Les procédés gravitationnels ou par flottation étant moins efficaces, les technologies électrostatiques se sont imposés comme la solution de choix pour le recyclage des matériaux plastiques. D'autant plus que la séparation électrostatique est une technique non-polluante, caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien. Divers dispositifs utilisant l'effet triboélectrique ont été conçus et réalisés comme moyens de charger les granules en vue de leur séparation dans un champ électrique, suivant la polarité de l'électrode et le signe de la charge acquise. Multiples recherches avaient déjà été réalisées par des laboratoires Européens, Américains, Canadiens, Algériens, Japonais ou Roumains, dans le domaine de la séparation tribo-électrique, notamment les bons résultats obtenus dans le cas des mélanges granulaires de taille millimétrique [3-5].

L'objectif principal de ce mémoire consiste à contribuer au développement d'un séparateur électrostatique à plan incliné à fin d'améliorer les performances du processus de recyclage.

Ce mémoire est réparti en trois chapitres présentés comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la présentation de certains concepts concernant les polymères isolants et toutes les propriétés, structures, classifications, applications et intérêts associés. En plus de cela, certaines des propriétés des isolants solides, des propriétés mécaniques

et des propriétés optiques. Les effets de l'eau sur les polymères, les composites et les polymères biodégradables sont également présentés.

Le deuxième chapitre est focalisé sur les différents dispositifs qui font l'objet de la séparation électrique, ainsi que les différentes méthodes expérimentales du processus.

Le troisième chapitre nous présenterons de nouveau prototype pour améliorer les séparateurs électrostatiques à plan incliné.

I.1. Historique

Les polymères appartiennent à une science qui a pris son essor dans les années 40, car pendant la guerre, il est apparu nécessaire de fabriquer certains matériaux qui manquaient alors. [6]

Avant 1940, il y avait déjà eu des sursauts. Les premiers soubresauts de la chimie des polymères sont apparus dès les années 1900.

A cette époque, on distinguait les molécules organiques en deux catégories

- Les cristalloïdes
- Les colloïdes

Les cristalloïdes sont des composés organiques cristallisables, de température de fusion et de masses molaires définies.

Les colloïdes sont des molécules visqueuses, ne cristallisant pas et ayant des températures de fusion mal définies. Lorsque l'on mesurait leur masse molaire, on la trouvait supérieure à 100 000. Cela renforçait l'idée que ces molécules étaient des agrégats. Les chimistes allemands appelaient cette chimie la chimie des saletés (« Schmutzen Chemie »).

En 1925, Staudinger déclare que les colloïdes sont une association de plus de 100 000 atomes de carbones reliés entre eux par des liaisons covalentes. A l'époque, c'est une hérésie. (Théorie de la chimie moléculaire). Dans le début des années 1950, Carothers et Flory admettent et montrent que des édifices covalents de masse molaire supérieure à 100 000 existent [6].

I.2. Polymères

I.2.1. Définition du polymère

Le mot "polymère" vient du grec "polus" plusieurs, et "meros" partie. Il désigne communément une famille, toujours plus nombreuse, de produits constitués de macromolécules caractérisées par la répétition du même groupe diatomé appelé motif constitutif (ou monomère, du grec mono : 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. Il existe différents types de polymères caractérisés par des propriétés différentes : certains sont utilisés pour leurs propriétés élastiques, thermiques ou encore électriques. Hormis les applications électriques, nous pouvons citer leur utilisation dans les emballages, les fibres textiles, la peinture, les adhésifs, les cosmétiques, les pneumatiques, etc. Un polymère peut être d'origine naturelle (c'est-à-dire trouvés en l'état dans la nature), ou obtenu par modification

chimique d'un polymère naturel (polymères artificiels ou régénérés), ou bien entièrement fabriqués par l'homme à partir de petites molécules réactives, appelées monomères (polymères synthétiques). La plupart des polymères utilisés aujourd'hui sont d'origine synthétique. Les macromolécules synthétiques sont obtenues par polymérisation du monomère. Les réactions de polymérisation, établissant des liaisons covalentes entre de petites molécules monomères, conduisent à la formation de macromolécules ayant une structure tridimensionnelle. Parmi ces différents types de polymères organiques, on peut trouver des polymères polaires et d'autres non polaires.

I.2.2. Polymères organiques polaires

Les polymères organiques polaires sont composés d'atomes possédant des électronégativités différentes tels que le fluor, l'oxygène, l'azote, le chlore, ce qui favorise la distribution des charges asymétriques. Les polymères polaires ont donc des hautes valeurs de pertes diélectriques et leur constante diélectrique, va être dépendante de la fréquence. Parmi ces polymères, on trouve le poly (chlorure de vinyle) PVC et le poly (méthacrylate de méthyle) PMMA.

I.2.3. Polymères organiques apolaires

Un polymère organique apolaire ou à faible indice de pertes diélectriques est caractérisé par une liaison entre ses molécules de type covalent (C-C). Par définition, les polymères à faibles pertes possèdent, une constante diélectrique, indépendante de la fréquence. Parmi ces polymères, on trouve le polypropylène (PP) et le polyéthylène (PE).

I.2.4. Matériaux isolants fibreux

Les matériaux fibreux font aujourd'hui l'objet de nombreux développements technologiques. Un média non tissé se présente sous la forme d'une nappe ou d'un voile de fibres enchevêtrées de façon pseudo-aléatoire et dont la cohésion provient du processus de fabrication. La cohésion d'un voile plus ou moins épais est assurée par des liaisons interfibreuses de types chimiques, physiques, voire mécaniques. Les fibres utilisées dans la fabrication des médias non-tissés sont soit naturelles, soit chimiques (synthétiques ou artificielles). Le schéma de la figure I.1. illustre la classification des différentes matières utilisées pour la formation des fibres .

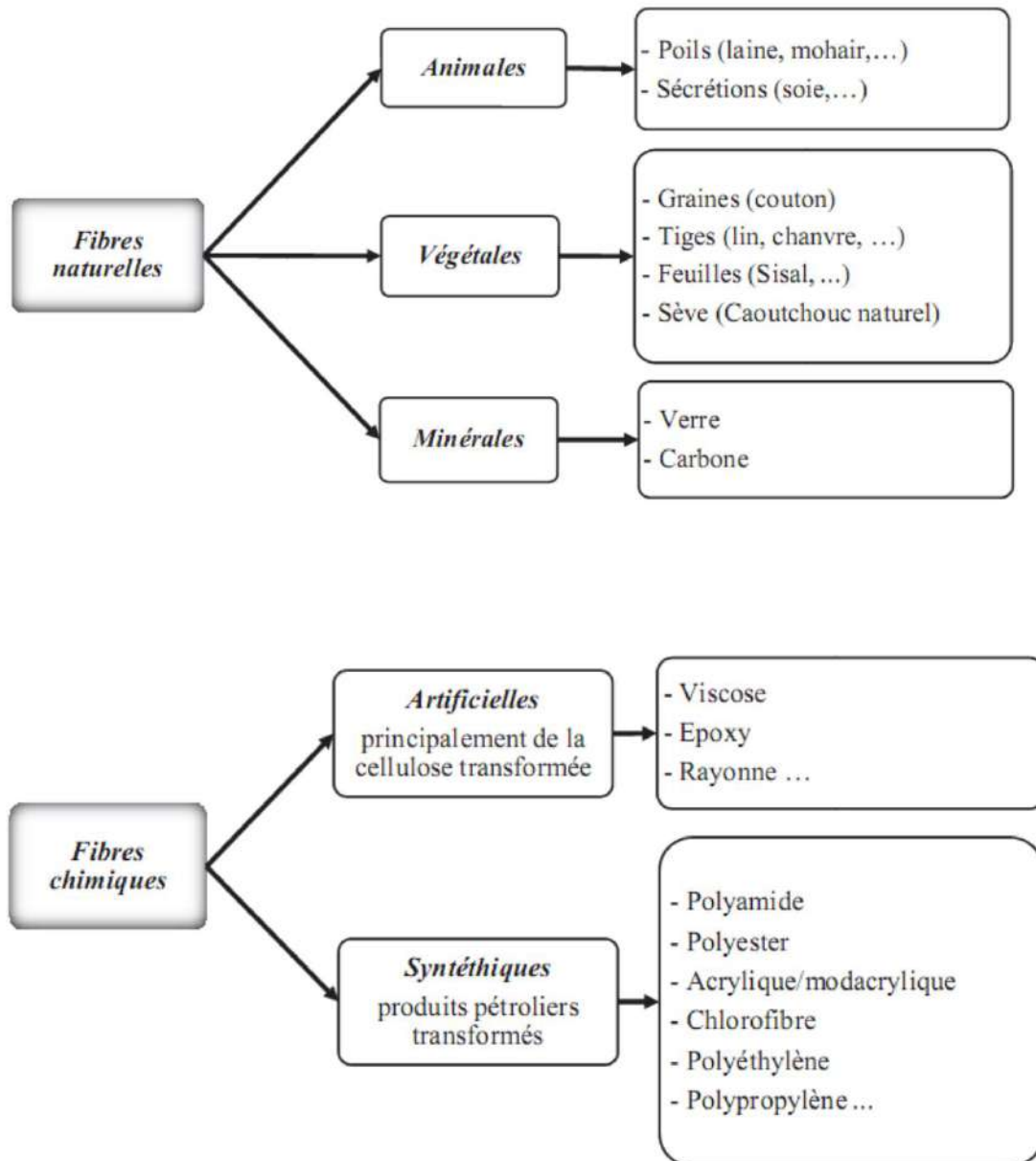


Figure I.1. Classification des différentes matières utilisées pour la fabrication des fibres

[7]

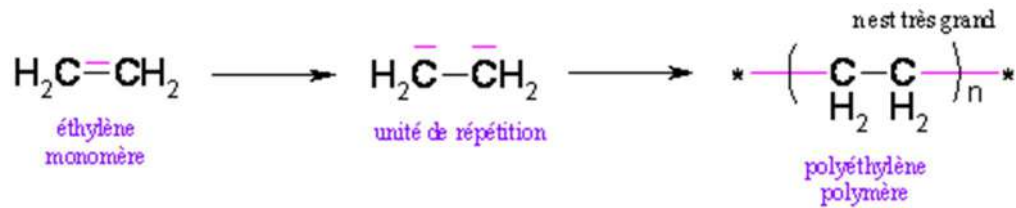
Les matériaux isolants fibreux non tissés sont souvent constitués de fibres de polymères. Des adjuvants confèrent aux produits certaines caractéristiques spécifiques ou facilitent la production. Les fibres de verre sont caractérisées par une haute résistance mécanique, tandis que les fibres de céramique et de carbone sont utilisées pour des applications spéciales à très haute température .

Le titrage d'une fibre indique sa grosseur, il établit le rapport qui existe entre le poids et la longueur de cette fibre. L'unité internationale la plus utilisée est le tex, qui désigne le poids de la fibre en milligrammes par un mètre de longueur (10^{-6} kg/m).

Les médias non tissés possèdent un énorme potentiel d'applications dans l'industrie automobile et aéronautique. Ils sont aussi utilisés pour diverses applications d'isolation et de

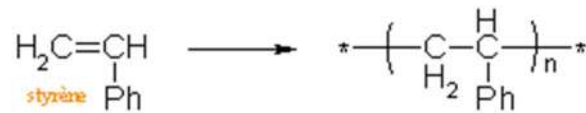
protection dans l'industrie électrique (séparateurs de batterie, enrobage des câbles) ainsi que dans le domaine médical.

Exemple :

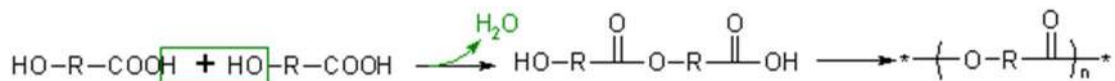


-CH₂-CH₂- est l'unité du polymère.

Tout monomère comporte au minimum deux sites réactifs. La polymérisation sur la double liaison du monomère correspond à l'ouverture de la double liaison [6].

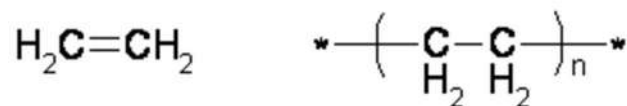


Il n'y a pas que des doubles liaisons qui forment des polymères :



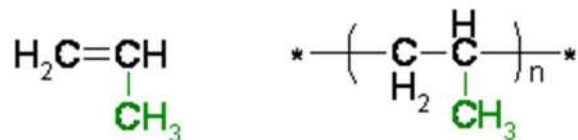
Exemple de polymères usuels

Le polymère le plus utilisé est le polyéthylène (**PE**)



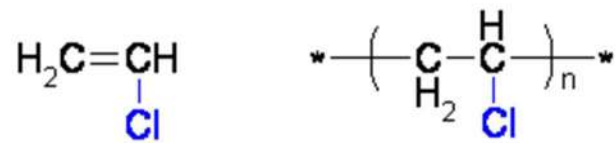
C'est le matériau d'emballage par excellence.

Le deuxième polymère fort utilisé est le polypropylène (**PP**)



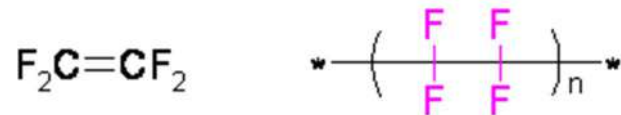
C'est un plastique dur. On le retrouve dans tous les matériaux de plomberie.

Le polychlorure de vinyle (**PVC**).



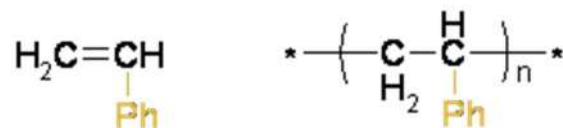
On l'utilise pour la fabrication des chaussures synthétiques et des disques.

Le polytétrafluoroéthylène (**PTFE**).



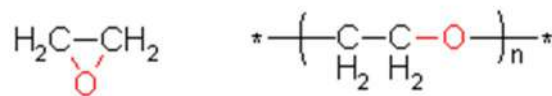
Ce polymère est plus connu sous le nom de Téflon (anti-adhésif).

Le polystyrène (**PS**).



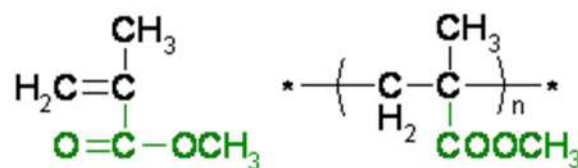
On s'en sert pour les emballages.

Le polyoxyde d'éthylène (**POE**).



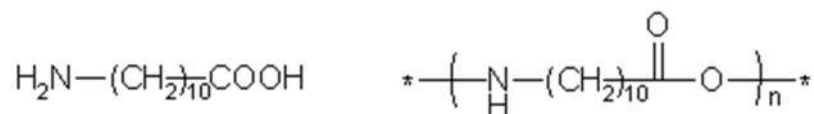
On l'utilise en cosmétique.

Le polyméthacrylate de méthyle (**PMMA**).



On l'utilise pour la fabrication de Plexiglas.

Les polyamides avec l'exemple du nylon.



On s'en sert pour la fabrication de fibres synthétiques.

I.3. L'intérêts des polymères dans notre vie

La seconde moitié du XXe siècle a connu un extraordinaire essor industriel des polymères synthétiques, au point qu'ils sont aujourd'hui omniprésents dans notre vie quotidienne. On les trouve sous forme de polymères de commodité (emballages, bouteilles, jouets, sports et loisirs), de polymères à usage structural (bâtiment, génie civil, transports) et aussi de polymères spéciaux, à forte valeur ajoutée, pour des applications pointues dans des domaines avancés (aérospatial, médical, électronique...). La production annuelle française – toutes structures chimiques confondues – est de l'ordre de 7 millions de tonnes pour un chiffre d'affaires de 45 milliards d'euros. La qualité première des matériaux polymères, à l'origine de leur succès commercial, est la légèreté : leur masse volumique est deux à trois fois plus faible que celle des alliages légers et environ sept fois plus faible que celle de l'acier. La seconde raison majeure de l'émergence des polymères a été l'énorme effort de recherche, tant fondamentale qu'appliquée, qui a été consenti dans le monde entier. Pas moins de 25 000 polymères différents ont été synthétisés, caractérisés en termes de propriétés physico-chimiques et mécaniques, et mis en forme. Un travail soutenu de formulation des matériaux polymères a permis de pallier leurs insuffisances les plus notoires : faible module d'Young, mauvaise tenue aux solvants, aux huiles et au feu, vieillissement rapide, et surtout extrême fragilité. Bref, comme en attestent nos skis ou nos raquettes de tennis, on a su s'affranchir des déconvenues rencontrées avec les « plastocs » de l'après-guerre, comme on disait alors avec dédain. Sans voir la production se démentir, le début des années 2000 a été marqué par l'émergence de questions nouvelles, liées à la raréfaction annoncée des matières premières fossiles, source quasi exclusive des polymères synthétiques, à la volonté de réduire la consommation énergétique et les émissions de dioxyde de carbone et aussi au besoin, parfois imposé par les réglementations, de développer des produits plus respectueux de l'homme et de son environnement. Progressivement, s'est précisé le cahier des charges de nouveaux matériaux pour un développement durable qui, dans l'idéal, devraient satisfaire différentes conditions touchant à la fois à leur synthèse et à leurs propriétés. Il est attendu de ces nouveaux matériaux qu'ils soient :

- non toxiques.
- recyclables.
- biodégradables.
- être sans danger.
- minimiser tout risque de pollution.
- consommer moins (ou pas du tout) de produits pétroliers.
- se réaliser dans des conditions.

I.4. Classification des polymères

Plusieurs classifications des composés macromoléculaires peuvent être proposées selon qu'on choisit l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le types de polymérisation, comme base de la classification.

I.4.1. Classification selon l'origine

Les polymères classés selon l'origine peuvent être:

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

I.4.2. Classification selon l'architecture

Selon Tomalia, les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles :

Les polymères linéaires, ramifiés, réticulés et plus récemment, les polymères dendritiques [11].

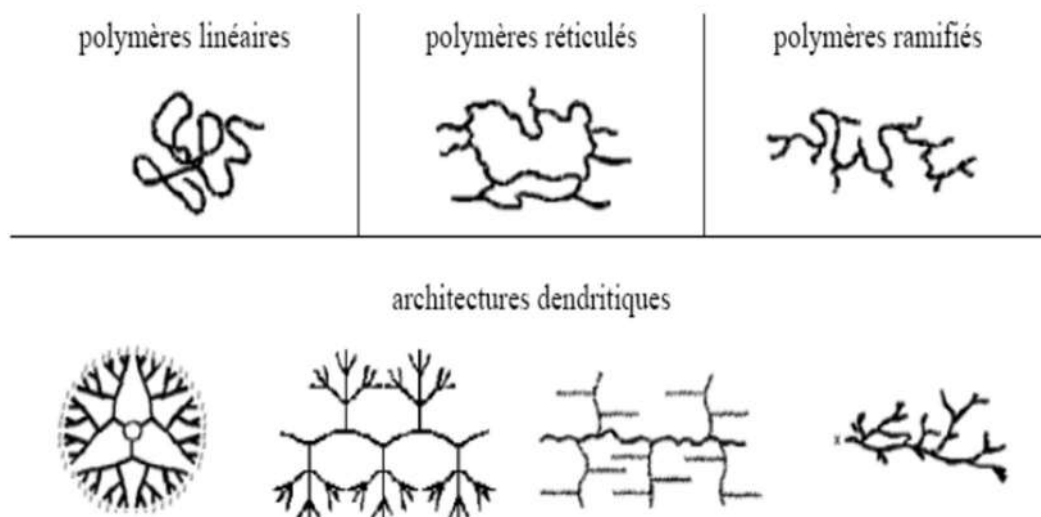


Figure. I.2. Classification des architectures macromoléculaires selon Tamolia.

- Les polymères d'architecture linéaire sont essentiellement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne (« vivante », depuis de nombreuses années, ou radicalaire contrôlée, plus récemment) ou des réactions de polymérisation par étapes ou polycondensation (entre monomères strictement di fonctionnels).
- Les architectures ramifiées découlent de réactions de transfert de chaîne, ou bien sont générées par des réactions de greffage. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le domaine des thermoplastiques. Le Nylon, le Plexiglas (polymères linéaires), dont la production a débuté dans les années 1930, ou bien le polyéthylène basse densité (polymère branché), produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques.
- L'introduction de liaisons covalentes entre chaînes de polymères linéaires ou ramifiés aboutit à la troisième famille, les polymères réticulés ou « crosslinked polymers ». Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures dès le début des années 1940. Elles définissent aujourd'hui le domaine communément appelé des thermodurcissables. Les résines époxy et les caoutchoucs sont des exemples de systèmes polymères réticulés.
- Les systèmes dendritiques constituent la quatrième famille d'architecture macromoléculaire. C'est Paul Flory en 1953 qui a le premier évoqué la possibilité de synthétiser des dendrimères à partir de monomères multifonctionnels, dans son célèbre livre "Principles of Polymer Chemistry" . Mais ce n'est qu'à la fin des années 1970 que Vögtle a décrit la première synthèse de dendrimères (qu'il a appelé « arborols »), suivi par Tomalia et Newkome.

I.4.3. Classification selon la structure chimique

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

a. Les homopolymères: sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité, ces homopolymères sont des longues chaînes formées par la répétition d'un monomère, leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes.[8] Il existe au sein des homopolymères différentes familles, on trouve: les homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

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

I.4.4. Classification selon le comportement thermique

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

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

b. Les thermodurcissables: les matières thermodurcissables sont les produits dont la transformation conduit, par une réaction chimique, à des composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matières thermodurcies ou thermorigides. Dans ce cas les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives, ces chaînes vont se lier ensemble chimiquement, cette réaction conduit à des liens chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules présentes pour former un réseau tridimensionnel .

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

I.5. Applications des polymères

Les polymères sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets usuels et courants, dans lesquels, ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Les cinq familles les plus utilisées sont:

- Les polychlorures de vinyles (PVC) utilisés comme pièces rigides, tuyauterie, films d'étanchéité.
- Les polyéthylènes (PE) utilisés comme emballages transparents, pièces rigides.
- Les polypropylènes (PP) et les polystyrènes (PS): pièces rigides, fibres.
- Les polyesters saturés: cosmétiques, revêtements de surface, peintures, vernis, plastifiants pour autres polymères; et les polyesters insaturés: films, fibres textiles, matériaux composites.

▪ les polyuréthannes (PU). Citons également les élastomères, qui proviennent pour certains de ces différentes familles et ou du caoutchouc naturel, et dont la principale utilisation se trouve dans le domaine des pneumatiques.

Il existe également des polymères spécialement «dessinés» pour des applications plus particulières. Parmi ceux-ci, on retrouve les grandes familles déjà citées, mais aussi les polymères fluorés comme le Téflon ou les polymères minéraux comme les silicones.

I.6. Les caractéristiques des polymères

I.6.1. Structure du polymère : plusieurs niveaux de polymères.

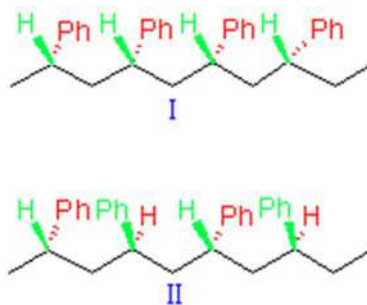
Un polymère peut avoir une structure que l'on peut détailler en plusieurs niveaux [6]:

- Structure primaire.
- Structure secondaire.
- Structure tertiaire.

a. Structure primaire.

La structure primaire est l'enchaînement covalent des motifs monomères.

Ainsi du point de vue stéréoisomérique, le motif $-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{Ph})-$ va avoir plusieurs formes :



Le cas I est un isomère isotactique et le cas II est le cas syndrotactique.

Quand il n'y a aucun ordre dans le polymère, on parle d'isomère atactique.

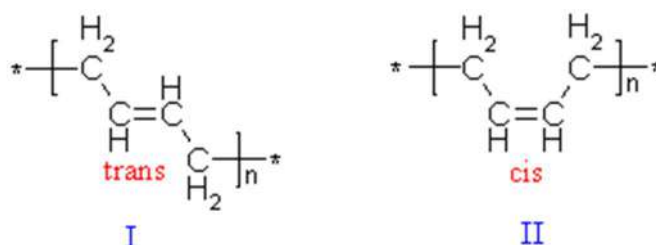
L'existence de plusieurs formes stéréoisomériques va entraîner des propriétés physiques complètement différentes entre les stéréoisomères.

Ainsi si on a un enchaînement covalent de monomères **St** et **Bu**, le polymère obtenu aura une structure primaire de type : *St-Bu-Bu-Bu-St-St-Bu-St*.

Exemple avec le butadiène :

Le butadiène de formule $C_1H_2=C_2H-C_3H=C_4H_2$.

Pour former le polybutadiène, on peut avoir deux types d'addition, l'addition 1,2 qui donne le PBU 1,2 et l'addition 1,4 qui donne le PBU 1,4. Ce dernier possède deux isomères géométriques I et II.

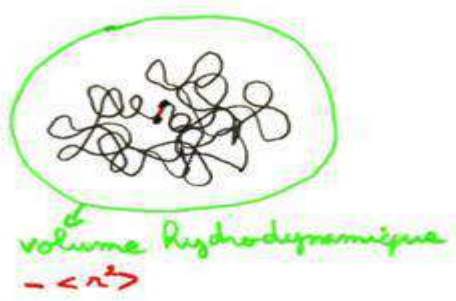


Ainsi cette différence géométrique va entraîner deux polymères de propriétés complètement différentes. Ainsi le polymère I trans est un élastomère (caoutchouc naturel) tandis que le polymère II cis est le gutta percha (utilisé pour les balles de golf).

b. Structure secondaire.

C'est la conformation d'une chaîne isolée [6].

Ainsi, en solution, la chaîne se met en pelote statistique.



La pelote statistique est sans arrêt en train de bouger mais elle occupe un volume hydrodynamique à peu près constant, la distance entre les deux extrémités étant $\langle r^2 \rangle$.

Sous forme solide, on retrouve la chaîne sous deux formes.

- La chaîne garde son organisation en pelote et le solide obtenu est amorphe.
- La chaîne s'organise du fait d'interactions particulières (liaisons H, interactions polaires).

Ainsi, quand on a une chaîne d'hydrocarbures saturés du type polyéthylène, il y a peu d'interactions. Pour d'autres chaînes du type $HC=CH(C^{\circ}N)$ (acrylonitrile), le groupement $C^{\circ}N$ a un grand moment dipolaire, ce qui va organiser la molécule de polymère en forme d'hélice.

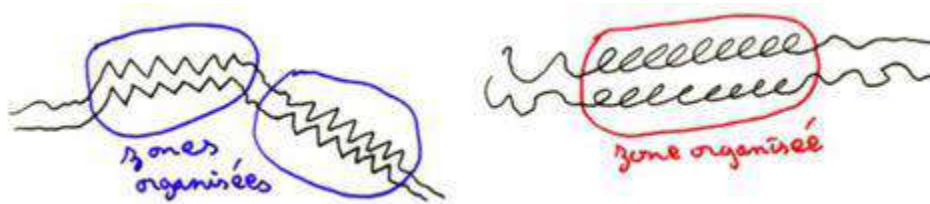


c. Structure tertiaire.

Cette structure touche à l'organisation des chaînes au sein du matériau.

Certains polymères, à l'état solide, gardent leur forme pelote. On va donc avoir un matériau constitué de pelotes statistiques enchevêtrées. Un matériau **amorphe** est un verre et l'on dit alors que le polymère est à l'**état vitreux**.

Si le polymère est constitué d'hélices ou de zigzags, il y a des possibilités de réorganisation de ces hélices. On a alors organisation des hélices ou des zigzags du matériau à l'échantillon supérieur [6].



Les zones organisées baignent dans des zones amorphes.

Ces structures sont parfaitement analysables par analyse thermique. Cette analyse va nous dire si le polymère a une structure amorphe ou s'il existe une certaine organisation de celle-ci.

I.6.2. Différents types de polymères

Il existe deux types de polymères :

- Les homopolymères.
- Les copolymères.

a. Les homopolymères

Les homopolymères sont des polymères qui ne possèdent qu'une seule unité. Parmi les homopolymères, on peut citer le polyéthylène [6].

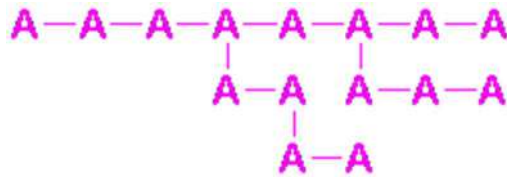
Il existe, au sein des homopolymères, différentes familles. Pour la suite du paragraphe, **A** sera l'unité de l'homopolymère.

Parmi les différents types d'homopolymères, nous trouvons :

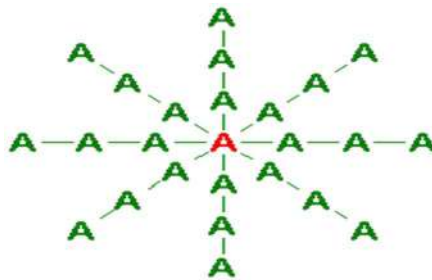
- les homopolymères linéaires.



- les homopolymères branchés.



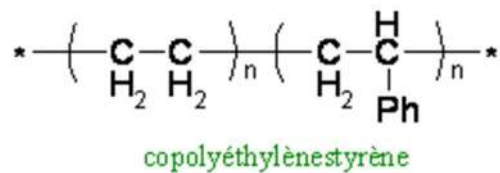
- Les homopolymères étoilés.



b. Les copolymères

Les copolymères sont des polymères qui possèdent plusieurs unités. Comme pour les homopolymères, les copolymères peuvent se classer dans différentes familles .

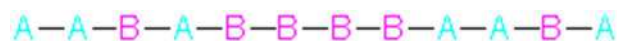
On parle alors de modes de copolymères



Pour la suite du paragraphe, A et B seront deux unités différentes du copolymère.

Parmi les différents modes de copolymères, nous trouvons :

- le mode statistique.



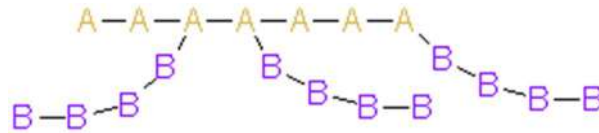
- le mode alterné.



- le mode séquencé.



- le mode greffé.



Les polymères, qu'ils soient homo ou copolymères, peuvent être réticulés.

Un polymère réticulé est un polymère dont certaines de ses chaînes sont reliées entre elles par des ponts chimiques covalents.

La plupart des polymères doivent être réticulés avant leur utilisation. En effet, un polymère est un liquide et pour le maintenir en place, il faut le réticuler.

I.7. Propriétés diélectriques des isolants solides

I.7.1. La polarisation et le déclin de potentiel

La polarisation des diélectriques s'exprime, dans la pratique, par une propriété fondamentale, à savoir la permittivité relative. Celle-ci se manifeste communément par l'augmentation de la capacité d'un condensateur que l'on constate lorsque l'espace inter-électrode, initialement vide, est rempli d'un isolant condensé. Cette augmentation est liée à l'aptitude du matériau à se polariser en présence d'un champ électrique. Bien que la constante diélectrique soit une propriété fondamentale des matériaux isolants, leur réponse est en réalité très complexe et ne peut pas être résumée par une constante, souvent donnée pour une fréquence donnée. Cependant, dans un domaine de champ électrique où le matériau reste linéaire, on peut intégrer les imperfections du matériau si on utilise une permittivité comme une fonction variable avec le temps $\epsilon(t)$.

La polarisation \vec{P} , définie comme le moment dipolaire par unité de volume, est souvent supposée proportionnelle au champ électrique. Elle est liée aux permittivités du matériau et du vide ϵ_0 par la relation macroscopique :

$$\vec{P} = (\epsilon + \epsilon_0) \vec{E} \quad (\text{I.1})$$

Également, il existe une relation microscopique entre la polarisation, le champ local \vec{E}_1 , la concentration moléculaire Nm et la polarisabilité globale α , rapportée à la molécule :

$$\vec{P} = Nm. \alpha. \vec{E}_1 \quad (\text{I.2})$$

La polarisabilité globale α_p est la somme des polarisabilités, électronique et ionique et d'orientation ou dipolaire α_0 . L'évolution de la polarisation molaire (polarisation rapportée à une molécule) en fonction de la fréquence est présentée sur la figure I.3. Avec l'augmentation de la

fréquence du champ appliqué, la contribution des différents types de polarisation disparaît progressivement, puisque l'entité polarisable n'a pas le temps de suivre les variations du champ électrique.

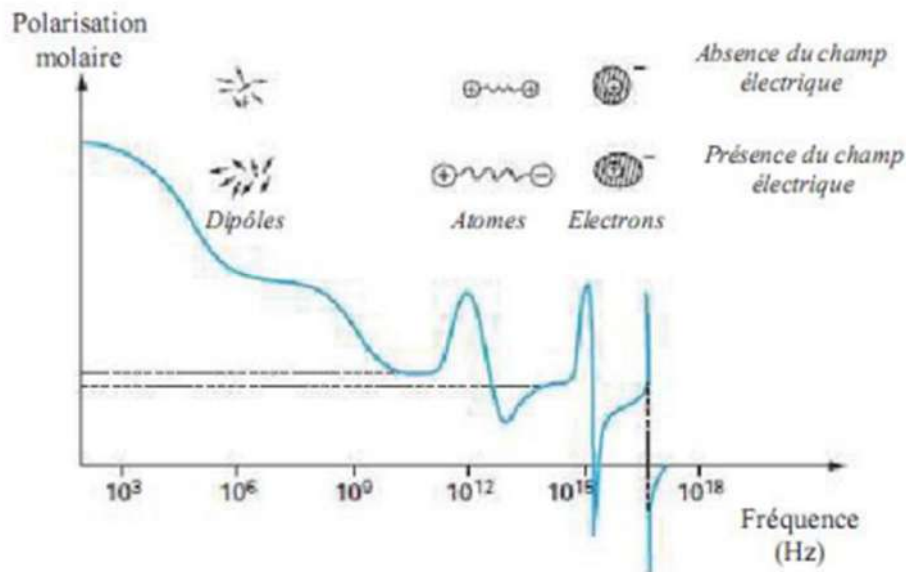


Figure I.3. Evolution de la polarisation molaire en fonction de la fréquence du champ appliqué

Une polarisation d'orientation s'établit progressivement après l'application du champ. Il en résulte que la permittivité dépend de la fréquence du ce champ. Si la variation du champ est assez lente pour que les dipôles suivent le champ, la permittivité prend sa valeur maximale qui correspond à une sollicitation statique [7]. A l'opposé, pour une variation du champ assez rapide pour que l'orientation ne puisse pas suivre le champ, la permittivité dépend uniquement des polarisabilités, électronique α_e et ionique α_i .

I.7.1.1. La fonction réponse diélectrique

Bien que la réponse soit instantanée pour la contribution du vide, lorsque le diélectrique est soumis à une sollicitation électrique $E(t)$ variable, la polarisation ne va s'établir qu'avec un retard plus ou moins long selon la nature du diélectrique. La dépendance temporelle de la polarisation sous l'action de cette sollicitation est déterminée à l'aide de la fonction réponse diélectrique $F(t)$, qui caractérise le comportement d'un milieu diélectrique soumis à une excitation électrique spécifique.

Considérons une impulsion de champ électrique appliquée durant une courte période Δt . La fonction réponse $F(t)$, est alors définie par :

$$P(t) = \epsilon_0 \cdot E \cdot \Delta t \cdot F(t) \quad (I.3)$$

Puisqu'il n'y a pas de polarisation permanente, la limite de cette fonction tend vers zéro pour des valeurs de temps élevées. En vertu du principe de causalité, il n'y a pas de réaction avant l'action alors :

$$F(t) = 0 \text{ pour } t < 0 \quad (\text{I.4})$$

Un champ électrique variant de façon arbitraire, $E(t)$ peut être vue comme une somme d'impulsions. Par le théorème de superposition, on peut donc faire la somme de toutes les polarisations pour chacune de ces impulsions de telle sorte que la polarisation peut s'exprimer par la convolution suivante:

$$P(t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \cdot E(t - \tau) d\tau \quad (\text{I.5})$$

τ : Temps de réponse à la polarisation.

La réponse à la polarisation n'est pas instantanée.

I.7.1.2. Déclin de potentiel par polarisation diélectrique

Dans le cas où le matériau reste linéaire et homogène à l'échelle macroscopique, la réponse temporelle de l'isolant due à sa relaxation diélectrique en négligeant les phénomènes de conduction et d'injection de charge, peut être modélisée par des fonctions diélectriques $\phi d(t)$ et $\phi e(t)$ établissant des relations de convolution entre le déplacement électrique et le champ [9]:

$$D(t) = \epsilon_0 \int_{-\infty}^t E(\tau) \cdot \phi d(t - \tau) d\tau \quad (\text{I.6})$$

$$E(t) = \frac{1}{\epsilon_0} \int_{-\infty}^t E(\tau) \cdot \phi e(t - \tau) d\tau \quad (\text{I.7})$$

Pour un diélectrique homogène d'épaisseur e , en absence de la charge d'espace, chargé uniquement en surface, le champ électrique sera constant dans l'isolant. Le déplacement sera égal à la densité de charge libre sur la surface σ_s . Ainsi, nous pouvons relier la charge au potentiel par un produit de convolution :

$$V(t) = \frac{e}{\epsilon_0} \int_{-\infty}^t \sigma_s \cdot \phi e(t - \tau) d\tau \quad (\text{I.8})$$

Pour un dépôt instantané d'une quantité finie de charges, celle-ci peut être exprimée par une fonction échelon d'amplitude q_0 . Ainsi, en utilisant la transformée de Laplace, la relation (I.8) s'écrit :

$$V(p) = \frac{e}{\text{sp} \cdot \epsilon_0} q_0 \cdot \phi e(p) \quad (\text{I.9})$$

D'où :

$$pV(p) = \frac{e}{.S.\epsilon_0} q_0 \cdot \phi e(p). \quad (I.10)$$

Le premier membre de la relation (I.10) représente la dérivée du potentiel dans le domaine temporel. Ainsi la vitesse de déclin du potentiel de surface sous l'influence d'une polarisation lente est exprimée par :

$$\frac{dv(t)}{dt} = \frac{e}{\epsilon_0} q_0 \cdot \phi e(t). \quad (I.11)$$

Il existe un lien entre la réponse transitoire en courant à un échelon de tension et l'évolution de la tension sur un échantillon après un dépôt de charge ; le courant varie comme la dérivée du potentiel. En pratique, la représentation bi-logarithmique de la dérivée du déclin de potentiel $\log\left(\frac{dv}{dt}\right) = F(\log(t))$ fait apparaître sur un nombre suffisamment élevé de décade de temps deux asymptotes de pentes différentes. Selon Jonscher, la réponse diélectrique suit une loi empirique composée de deux puissances de temps. Dans le cas où la mesure est effectuée sur un nombre insuffisant de décades de temps, c'est-à-dire sur une durée relativement courte, seule une des deux pentes est observée en représentation bi-logarithmique de la dérivée du déclin de potentiel. Par conséquent, la réponse sera représentée par la loi empirique de Curie-Von Schweider [9].

I.1.3. Polarisation par charge d'espace

La polarisation peut également être associée aux charges piégées dans le volume et/ou aux interfaces. Dans ce cas, elle est désignée comme polarisation par la charge d'espace. Ceci se produit principalement dans les solides amorphes ou poly-cristallins. Coehlo a présenté un traitement asymptotique du déclin de potentiel dû à la polarisation par la charge d'espace. Ce traitement ne fait aucune hypothèse sur la distribution initiale de la charge d'espace mais il tient compte du fait que le champ à l'extérieur de l'échantillon est négligeable, ce qui correspond à la mesure du potentiel par une sonde asservie. A des temps longs, lorsque la charge est pratiquement uniformisée, la solution asymptotique pour le potentiel obéit à une loi en t^{-1} . Pour vérifier cette prédiction, il suffit de porter l'inverse du potentiel en fonction du temps et de constater que la courbe tend vers une droite.

I.7.2. Mécanismes d'injection de charges et le déclin de potentiel

L'injection de charges est un mécanisme contrôlé par l'interface. Elle désigne une injection dans le matériau de porteurs de charges extrinsèques qui ne chargeront qu'une partie du volume.

Le rôle de la couche de surface est déterminant pour ce mécanisme. Dans notre configuration, où le matériau est caractérisé par la mesure du DPS, l'injection peut avoir lieu au niveau de la surface libre. En effet cette surface est chargée par décharge couronne et l'injection est contrôlée par l'interface gaz-isolant. L'injection qui se produit au niveau de la surface du matériau qui est en contact avec l'électrode de masse est contrôlée par l'interface métal-isolant. Ce phénomène d'injection de charges dans les isolants a été beaucoup invoqué dans l'étude du déclin de potentiel, et l'injection est mise en cause dans l'apparition du phénomène dit de "cross-over" [9 ,12].

L'isolant, selon la théorie des bandes d'énergie, possède une densité de pièges au niveau de la couche de surface différente de celle du volume. On peut trouver des cas différents d'échanges avec l'extérieur si la surface est en contact avec un gaz ou un métal. La figure I.4, présente les schémas de bandes aux interfaces gaz-isolant et métal-isolant.

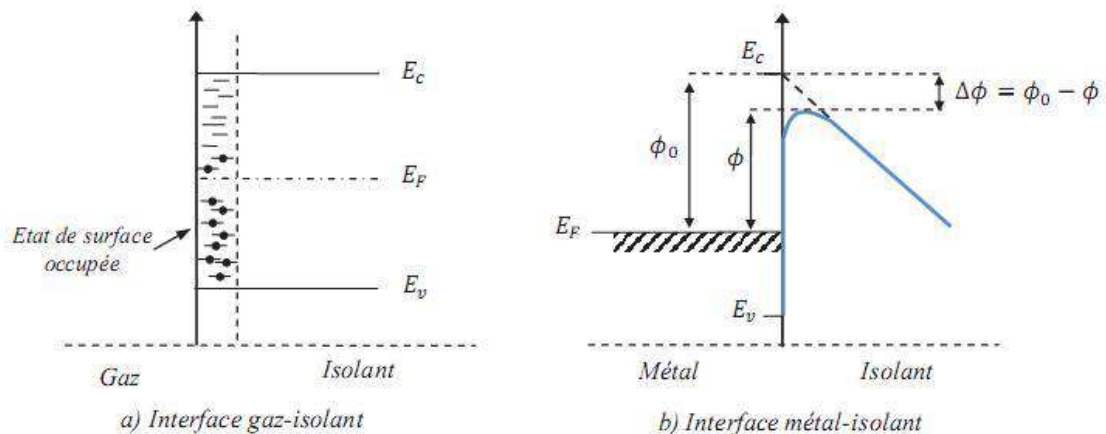


Figure I.4. Diagrammes de bande aux interfaces

La surface libre de l'isolant, exposée à l'air ambiant, est le siège d'un dépôt de charges et des substances étrangères ainsi que des oxydations. Ceci conduit à des niveaux d'énergie mal définis sur la surface. Ces niveaux seront répartis de manière plus large dans la bande interdite de l'isolant. Une charge électrique déposée sur un isolant sera piégée à des énergies très variables.

Lorsqu'on met en contact un isolant et un métal, un transfert de charge se produit entre les deux matériaux du fait de la différence entre leurs niveaux de Fermi respectifs. Lorsqu'un champ électrique est appliqué à l'isolant, une énergie supplémentaire est fournie aux charges injectées par l'électrode en plus de leur énergie thermique. Cet apport d'énergie conduit à un abaissement de la hauteur de la barrière de potentiel. Les porteurs ont deux possibilités pour réaliser le transfert de charge qui donnera lieu à un courant. La première possibilité consiste à franchir par

activation thermique cette barrière de potentiel pour injecter des porteurs de charges dans la bande de conduction de l'isolant (effet thermoélectronique ou effet Schottky). La deuxième possibilité consiste à transférer la charge par effet tunnel ou effet Fowler-Nordheim qui ne nécessite pas d'activation thermique. Si l'injection de charges est faible devant la mobilité de ces mêmes charges dans l'isolant, alors les courants de conduction seront limités par le phénomène d'injection. Le champ électrique et la décharge couronne sont des facteurs d'activation de l'injection de charge aux interfaces. Cette injection apparaît à partir d'une valeur seuil du champ [7,9,13].

I.7.2.1. Effet Schottky

Lorsqu'un champ électrique est appliqué, l'abaissement de la barrière de potentiel favorise l'injection de charges par ce mécanisme. La hauteur de barrière s'exprime alors :

$$\Phi = \phi_0 - \beta_s \sqrt{E} \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Avec : } \beta_s = \sqrt{\frac{q^3}{4\pi\epsilon_s\epsilon_0}}$$

Où est la constante de Schottky, sa valeur dépend du matériau diélectrique considéré. La densité du courant produit par un tel mécanisme est :

$$J = AT^2 e^{-\frac{\phi_0 - \beta_s \sqrt{E}}{kT}} \quad (\text{I.13})$$

$$\text{Avec : } A = \frac{4\pi m k^2}{h^3}$$

Où est la masse de l'électron, h est la constante de Planck et est la constante de Boltzmann. Pour reconnaître si un courant est contrôlé par ce type de mécanisme, la représentation graphique du logarithme de la densité de courant en fonction de la racine carrée du champ donnera une droite, dont la pente est égale à $\frac{\beta_s}{kT}$. Sur ce même graphique, l'extrapolation à champ nul donne accès à la hauteur de barrière à l'interface électrode-isolant.

I.7.2.2. Effet Fowler-Nordheim

Ce mécanisme traduit le passage des charges à travers la barrière de potentiel selon le mécanisme de l'effet tunnel. Un tel mécanisme est quasiment invariant avec la température, la densité de courant peut donc s'exprimer seulement en fonction du champ appliqué et de la hauteur de barrière par l'équation (I.14):

$$J = \frac{q^3}{8\pi\hbar\phi_0} E^2 \exp\left(-4 \frac{\Delta W}{E} \sqrt{2m}\right) \quad (\text{I.14})$$

On constate que la température n'apparaît pas dans cette relation, cet effet est le seul mécanisme sur lequel la température a un effet négligeable. L'effet Fowler-Nordheim sera dominant à basse température et champs électriques très élevés.

I.7.3. La conduction électrique et le déclin du potentiel

Un matériau qui ne contiendrait pas d'autres charges que les noyaux atomiques et les électrons des couches internes et de couches de valence complètes, ou qui contiendrait des charges qui resteraient immobiles dans le champ serait effectivement un isolant parfait.

Ces conditions, en particulier pour les polymères, ne sont jamais réalisées. Même en absence du champ, le rayonnement cosmique interagissant avec la matière augmente la concentration des porteurs libres dans l'isolant. Aux champs faibles, de l'ordre de 10^6 V/m, la conduction des isolants peut avoir un caractère ohmique. Par contre, aux champs élevés, supérieurs à 10^6 V/m la conduction des isolants perd son caractère ohmique.

Les théories de la conduction consistent à décrire les phénomènes d'injection et le mouvement des porteurs sous l'action d'un champ électrique. Outre ce champ extérieur, les porteurs sont, dans la matière, en interaction avec les atomes et les molécules. En général, les polymères contiennent des zones cristallines et des zones amorphes avec des propriétés de transport de charges très différentes. Les porteurs de charges extrinsèques sont généralement générés par les impuretés introduites accidentellement ou délibérément dans le matériau durant la fabrication.

La modélisation de l'isolant comme une résistance et un condensateur en parallèle ou en série est insuffisante dans la plupart des cas. Une conductivité intrinsèque constante donnerait naissance à un déclin de potentiel exponentiel. En réalité, la conductivité est généralement très dépendante du champ électrique, qu'il soit un champ extérieur ou rayonné par la charge d'espace. Associée à d'autres facteurs d'activation, ceci fait que le modèle à conductivité constante ne soit pas réaliste. L'introduction d'une loi de dépendance de la conductivité avec le champ ne suffit pas pour expliquer les effets complexes, tels que le retour de potentiel et le « cross-over » [9,13].

A la température ambiante et champ modéré, on peut considérer la charge électrique comme essentiellement piégée dans le matériau. Dans la plupart des cas, la conductivité varie avec la température T :

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{\Delta W}{KT}\right) \quad (\text{I.15})$$

Où ΔW désigne l'énergie d'activation, liée à la profondeur de piège, est la température et est la constante de Boltzmann.

I.7.3.1. Conduction de surface

Dans certaines conditions, le déclin du potentiel de surface peut être expliqué par la dominance de la conduction de surface dans le matériau. Cette conduction est liée aux propriétés de la surface et à la valeur du champ électrique tangentiel. Dans le cas où une mince couche d'eau se forme à la surface du matériau, la conductivité superficielle devient importante. On parle alors d'une activation en présence d'humidité.

Également, si la surface a été vieillie, par exemple par effet couronne, la quantité de pièges pour les porteurs de charges augmente. Ainsi, les sauts entre pièges énergétiques sont aussi possibles le long de la surface et le déclin s'ajuste à une exponentielle sur une bonne période du déclin pour les échantillons vieillies. Les relevés de profils de charges et/ou de cartographies du potentiel de surface de l'isolant permettront la détection d'une éventuelle conduction ou diffusion dans la surface. La grande stabilité latérale de la charge déposée permettra de les exclure [9].

I.7.3.2. Conduction électrique contrôlée par le volume

La physique du solide se propose d'expliquer les propriétés d'un solide en considérant la nature de ses atomes et leur arrangement dans l'espace. Elle repose principalement sur la théorie des bandes, qui permet de décrire de façon simple les propriétés électriques et thermiques dans les matériaux et faire la différence entre matériaux conducteurs, semi-conducteurs et isolants. Dans cette théorie, les polymères isolants sont décrits comme des matériaux possédant une grande bande interdite (figure I.5). La répartition en énergie des porteurs dans un matériau détermine largement les propriétés de conduction.

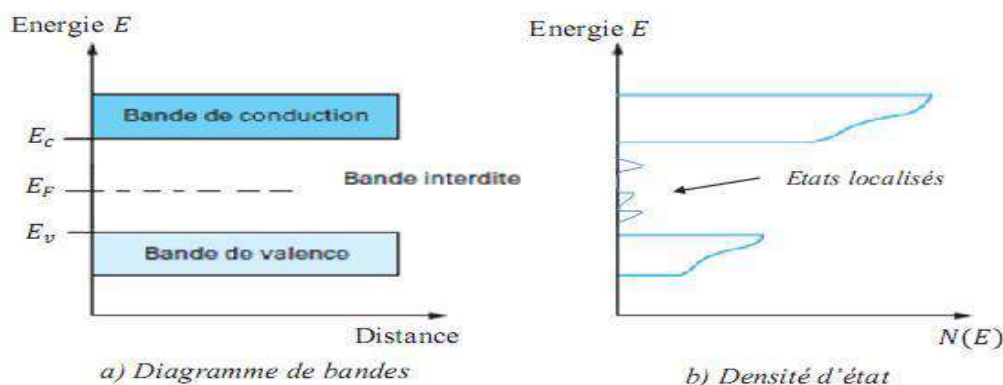


Figure I.5. Diagramme d'énergie des porteurs dans un matériau isolant

Le nombre d'électrons $n(E)$ susceptibles de participer à la conduction est déterminé par le produit de la fonction $N(E)$ (nombre de places disponibles) par une fonction de distribution $G(E,T)$, qui exprime la probabilité que ces places soient occupées, caractérisées par l'énergie et à une température absolue T . Cette fonction est appelée fonction de Fermi-Dirac.

$$G(t) = \frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{Een - Er}{KT}\right)} \quad (\text{I.16})$$

Où K est une constante de Boltzmann.

Cependant, pour le cas des polymères, il existe des irrégularités au niveau moléculaire. Ces irrégularités conduisent à l'existence de niveaux énergétiques qui peuvent être des états localisés ou bien des pièges pour les porteurs de charges. Ces pièges se situent donc nécessairement dans la bande d'énergie interdite, et ils peuvent avoir le caractère donneur d'électrons (pièges de trous) pour les niveaux proches de la bande de valence ou accepteurs d'électrons pour les niveaux proches de la bande de conduction (pièges d'électrons) [9].

I.7.3.3. Conduction limité par pièges

L'existence de pièges dans le matériau réduit le nombre de porteurs de charge disponibles pour le transport et donne lieu à une conduction limitée par les pièges. Lorsque la bande interdite est large ($E_c - E_f \gg KT$), la concentration d'électrons disponibles dans la bande de conduction est donnée par une approximation de la distribution de Fermi-Dirac à l'équilibre thermodynamique et en introduisant le nombre effectif d'états N_{eff} [9]:

$$n_c = N_{\text{eff}} \exp\left(-\frac{E_c - E_f}{KT}\right) \quad (\text{I.17})$$

Un piège ayant un niveau de densité au-dessus du niveau de Fermi, de façon à ce que $(E_i - E_f) \gg KT$, est un piège peu profond. La densité d'états occupés pour ce piège est :

$$n_i = N_i \exp\left(-\frac{E_i - E_f}{KT}\right) \quad (\text{I.18})$$

La fraction de porteurs de charges libres caractérise le concept d'une mobilité limité par piège, elle est définie par :

$$n_f = \frac{n_c}{n_i} = \frac{N_{\text{eff}}}{N_i} \exp\left(-\frac{\Delta E_i}{KT}\right) \quad (\text{I.19})$$

ou : $\Delta E_i = E_c - E_i$

I.7.3.4. Activation par champ - Dépiégeage de charges

Les charges issues de la bande de conduction peuvent être piégés à la profondeur ϕ_0 et une énergie d'activation est nécessaire pour qu'ils puissent se dépiéger. Lorsqu'un champ électrique intense est appliqué à un matériau, la barrière coulombienne des puits de potentiel s'abaisse sous l'effet du champ (figure I.6). La charge peut se dépiéger en acquérant une énergie permettant de passer au-dessus de la barrière. Ceci conduit à une activation de la conduction par effet Poole-Frenkel [13].

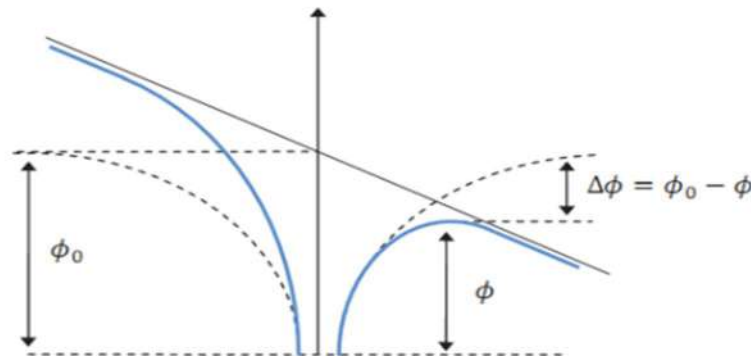


Figure I.6. Abaissement de la barrière de piège par effet Poole-Frenkel

En introduisant la constante de Poole-Frenkel β_{PF} , l'abaissement de la barrière s'exprime par:

$$\Delta\phi = \phi_0 - \phi = \beta_{PF}\sqrt{E} \quad \text{ou} \quad \beta_{PF} = \sqrt{\frac{e^3}{\pi\epsilon_r\epsilon_0}} \quad (\text{I.20})$$

L'activation de la conduction par effet Poole-Frenkel, conduira à une conductivité dépendante du champ où l'expression de la densité de courant qui en résulte s'écrit [13]:

$$J = J_0 \exp\left(-\frac{\phi_0 - \beta_{PF}\sqrt{E}}{KT}\right) = J_0 e^{\phi_0} \cdot \exp\left(\frac{\beta_{PF}\sqrt{E}}{KT}\right) \quad (\text{I.21})$$

Généralement, l'identification de la conduction de type Poole-Frenkel s'effectue par la représentation du logarithme du courant en fonction de la racine carré du champ électrique ce qui doit conduire à une ligne droite (pente). Pour vérifier la validité du modèle on peut alors calculer la valeur de la permittivité avec la pente de la droite.

I.7.3.5. Conduction par saut

Un transport d'électron peut se produire entre états localisés dans la bande interdite, au voisinage de niveau de Fermi qui sépare statiquement les niveaux occupés et les niveaux vides.

Un tel processus est de nature à augmenter notablement la mobilité apparente des porteurs. Pour mettre en évidence ce mécanisme, il ne faut pas que ce processus soit masqué par un transport plus classique qui se produit par émission vers la bande de conduction. C'est pourquoi il a été le plus souvent mis en évidence à basse température [13].

I.7.3.6. Conduction ionique

La conduction ionique se produit à cause de la dissociation d'impuretés qui ont été introduits dans le matériau lors de sa fabrication, ou lors des processus d'ionisation liés, par exemple, à l'absorption de rayonnement. Ces ions auraient une certaine mobilité dans le matériau et leur mouvement pourrait être activé par le champ et la température. En général, on considère que ce mouvement devrait être plus difficile lorsque la pression hydrostatique sur le matériau augmente.

Les ions disposeraient alors de moins de volume libre pour leur mouvement et leur mobilité serait réduite. Le transport d'ions résulte en un transport de matière [9,13].

La conduction ionique implique des transferts de masse dans le matériau mais les échanges ioniques aux électrodes sont difficiles ou impossible, en tout cas, limités. C'est pourquoi, sous tension continue, la conduction ionique ne peut pas se poursuivre indéfiniment, le nombre de porteurs de charge étant limité. Si une électrode est bloquante pour les ions, il se produira une zone d'accumulation de charge qui conduira à l'élévation du champ à l'électrode, et par la suite à la réduction du champ électrique dans le matériau, donc à la réduction du courant. Aussi, la conduction ionique peut être accompagnée d'une conduction de type électronique de telle manière qu'il est difficile de les séparer. L'effet de la pression n'est pas concluant puisqu'il aurait tendance à réduire la conduction ionique d'origine extrinsèque mais pourrait augmenter la conduction intrinsèque en rapprochant les atomes et facilitant les échanges [9].

I.7.4. Neutralisation atmosphérique et le déclin de potentiel

La charge déposée en surface par décharge couronne peut être neutralisée par les charges libres provenant directement de l'atmosphère environnant le matériau. On peut trouver un exemple de neutralisation par le gaz dans des études sur le Téflon.

I.7.5. L'effet piézoélectrique

Est un processus physique qui peut contribuer au déclin du potentiel de surface d'un matériau. L'application d'un champ électrique élevé à un diélectrique peut générer dans le matériau une pression électrostatique. Cette dernière conduit à une contraction mécanique du volume du matériau qui peut avoir une influence sur le potentiel de surface.

I.8. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques décrivent le comportement des matériaux soumis à des sollicitations mécaniques telles que des pressions, des étirements, des torsions, des frottements, des cisaillements, des chocs ou sous l'effet de la pesanteur (figure I.7). Elles dépendent fortement du type de contrainte appliquée [10].

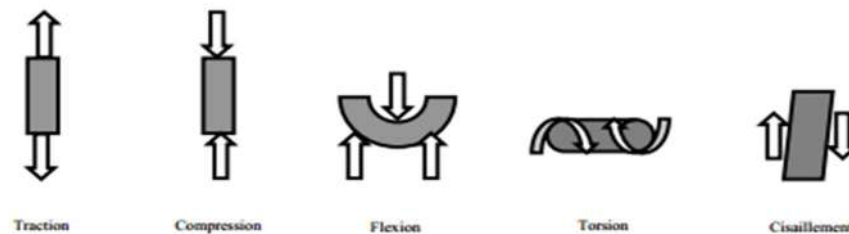


Figure I.7 : Différentes sollicitations mécaniques.

C'est la structure du réseau résultant de l'enchevêtrement des chaînes qui confère aux polymères leurs propriétés mécaniques les plus importantes, à savoir l'élasticité caoutchoutique et le comportement viscoélastique à l'état fondu d'une part, et un comportement à la fois vitreux et ductile à l'état solide d'autre part.

La figure I.8, présente un exemple de comportement d'un matériau soumis à une contrainte de traction. On y distingue trois zones :

- La zone 1 de la courbe contrainte – élongation est linéaire et correspond à une déformation élastique. Le matériau s'allonge sous l'action de la traction et reprend sa forme et ses dimensions initiales lorsque la contrainte est interrompue. Le coefficient de proportionnalité de la droite est appelé module de Young ou module d'élasticité. Celui-ci est d'environ 10^{-3} GPa pour un caoutchouc, contre quelques unités pour le polystyrène, quelques dizaines pour les métaux et 10000 pour le diamant [10].
- La zone 2 est appelée zone de déformation plastique. La déformation est toujours élastique, mais la variation contrainte-déformation n'est plus linéaire. Cette zone présente un maximum au-delà duquel le matériau subit une déformation irréversible. A l'arrêt de la contrainte, le matériau ne retrouve pas sa forme initiale : il existe une déformation résiduelle permanente.
- Au-delà d'une déformation critique, une contraction du matériau s'opère en un point donné jusqu'à rupture. On aborde alors la zone 3 de la courbe, dite zone de rupture. Si un matériau se casse dans son domaine élastique, c'est-à-dire sans subir de déformation plastique

avant sa rupture, il est considéré comme fragile. Par contre, il sera considéré comme ductile s'il peut subir de grandes déformations plastiques avant sa rupture.

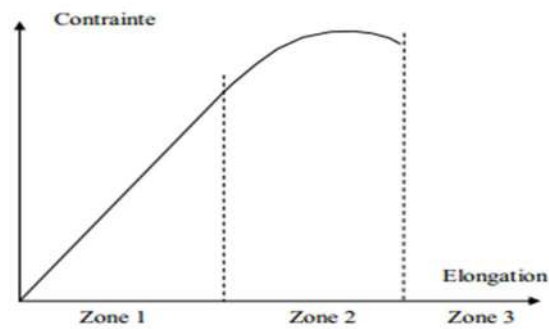


Figure I.8. : Comportement d'un matériau soumis à une contrainte mécanique.

Différents paramètres peuvent influencer les propriétés mécaniques des polymères :

La température : il est à noter que lorsque la température de travail est inférieure à la température de transition vitreuse du matériau, la partie de la courbe à droite du maximum est courte, voire inexistante. Les chaînes se déforment peu. Au-dessus de la température de transition vitreuse, le mouvement des chaînes est possible dans les zones amorphes du matériau. Les déformations sont plus aisées. Le polymère perd de sa ténacité et le module d'élasticité diminue fortement

La cristallinité : dans un polymère semi-cristallin, les cristallites jouent le rôle de renfort. La valeur du module d'Young est alors plus élevée que celle d'un polymère amorphe.

La masse molaire : une valeur élevée de celle-ci signifie une longueur importante des chaînes, ce qui favorise leurs enchevêtrements dans les zones amorphes et de meilleures liaisons entre zones cristallines. Il existe ainsi une valeur seuil de la masse molaire à partir de laquelle la résistance à la rupture augmente fortement [10].

I.9. Propriétés optiques

Les plastiques diffèrent par leur capacité à transmettre la lumière. Certains plastiques sont transparents, proposant des propriétés optiques similaires à celles du verre. D'autres sont opaques et ne laissent passer aucune lumière. Les plastiques translucides laissent passer un peu de lumière, mais les images sont floues. Enfin, certains plastiques sont semi-opaques, c'est-à-dire qu'ils laissent passer une quantité de lumière suffisante pour pouvoir voir des ombres et des formes. Comme les valeurs de transmission de lumière correspondant à ces différentes catégories ne sont pas clairement définies, quelques règles ont été établies. Si un journal est placé de l'autre côté du

plastique et est facilement lisible, le plastique est transparent. Si l'image est floue et qu'on ne peut rien lire, mais que les formes générales peuvent être distinguées, le plastique est translucide. [10]

Certains plastiques sont utilisés pour leur transparence : le polycarbonate, le polystyrène. Ils sont utilisés pour fabriquer des lentilles pour les yeux, des vitres pare-balle, des éclairages de voiture. Contrairement au verre, une exposition prolongée aux U.V. dégrade les polymères qui deviennent jaunes et perdent de leur transparence.

Les propriétés optiques d'un polymère sont déterminées par sa structure chimique. En effet, un polymère semi-cristallin dont les cristallites ont au moins une dimension voisine de celle de la longueur d'onde de la lumière va la diffuser. Le matériau sera alors opaque ou translucide. Par contre, un polymère amorphe, isotrope à la lumière visible, est en général transparent. L'ajout de renforts ou d'additifs conduit bien souvent à une réduction de la transmission de lumière [10].

I.10. Effet de l'eau sur les polymères

Les polymères, dans leurs utilisations quotidiennes, peuvent être mis en présence de milieux aqueux. Si les effets de tels milieux sur les métaux, et plus particulièrement leur corrosion, font l'objet d'études depuis de nombreuses années, les connaissances sur les matériaux polymères sont moins avancées. Les effets peuvent se produire à long terme et être d'origine chimique ou physique [10].

I.10.1 Actions chimiques de l'eau

Une réaction d'hydrolyse peut avoir lieu entre l'eau et le polymère. La chaîne est coupée, ce qui engendre une diminution de la masse molaire et une réduction des propriétés mécaniques. C'est une réaction lente, dont les effets, irréversibles, se manifestent à long terme (plusieurs mois à plusieurs années). Elle est favorisée par une augmentation de température [10].

Les principaux groupements chimiques hydrolysables sont les esters, les amides, les imides, ...

I.10.2 Actions physiques de l'eau

L'action physique de l'eau sur un polymère peut se traduire par différents phénomènes dont la plastification ou le gonflement. Les molécules d'eau s'incèrent dans le réseau macromoléculaire et détruisent les liaisons secondaires entre groupements polaires. La cohésion mécanique du réseau est altérée, la température de transition vitreuse est diminuée et un gonflement du matériau peut apparaître. Les propriétés mécaniques du matériau peuvent s'en trouver altérées.

La prise en eau d'un polymère est liée à son hydrophilie. Elle se détermine par la mesure de la teneur en eau, généralement exprimée en pourcentage massique. Celle-ci se mesure le plus souvent par gravimétrie. La vitesse de prise en eau dépend du coefficient de diffusion de l'eau dans le polymère qui est compris entre 10^{-11} et $10^{-14} m^2 s^{-1}$ à température ambiante, selon le matériau. La structure chimique du polymère influence la teneur en eau. Ainsi, la contribution à la prise en eau est faible pour les groupements carbonés ou fluorés, moyenne pour les groupements modérément polaires (comme les esters ou les éthers) et forte pour les groupements donneurs de liaison hydrogène (acides, alcools, amides).

On peut alors en déduire que les polymères hydrocarbonés et halogénés (comme le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène ou le PVC) absorbent très peu d'eau (moins de 0,2 % en masse), les polymères de type polycarbonate ou poly (méthacrylate de méthyle) absorbent de 0,5 à 2 % en masse d'eau, et les polymères tels que l'alcool polyvinylique, le polyacrylamide ou l'acide polyacrylique sont très hydrophiles. Enfin, lorsqu'un polymère est composé de groupements hydrophiles et de groupements hydrophobes, l'hydrophilie dépend des proportions de chaque type de groupements. Par exemple, dans les polyamides, le PA6 est plus hydrophile que le PA11, ce dernier comportant plus de groupements -CH₂-.

Lorsqu'un polymère hydrophile est immergé dans de l'eau, les molécules de celle-ci diffusent dans le polymère, entraînant un gonflement du matériau plus ou moins rapide en fonction de la relaxation des chaînes polymères. Au-dessus de la température de transition vitreuse du polymère, la relaxation des chaînes est rapide et la diffusion de l'eau dans le réseau polymère peut avoir lieu, en suivant les lois de Fick. En-dessous de la température de transition vitreuse, la relaxation des chaînes peut être plus ou moins lente. Alfrey et coll. (1966) ont proposé trois cas de figures pour décrire les phénomènes de transferts dans les polymères vitreux :

Cas I : la diffusion est Fickienne si la vitesse de diffusion de l'eau est moins élevée que celle de la relaxation des chaînes de polymères. Le mécanisme est contrôlé par la diffusion.

Cas II : la vitesse de diffusion de l'eau est supérieure à celle de relaxation du polymère et le mécanisme est contrôlé par cette dernière.

Cas III : Les deux vitesses sont comparables.

Friesch (1980) a exprimé le mécanisme de diffusion de l'eau par l'équation suivante :

$$\frac{m_l - m_i}{m_\infty - m_i} = kt^n \quad (I.22)$$

Où m_i est la masse initiale de l'échantillon de polymère.

m_t la masse de l'échantillon au temps t .

m_∞ la masse de l'échantillon à l'équilibre.

n , l'exposant diffusionnel et k , la constante du système.

L'exposant diffusionnel, n , est alors utilisé comme un indicateur du mécanisme de diffusion. Pour un système plan, un exposant de 0,5 est spécifique d'une diffusion Fickienne. En effet, la seconde loi de Fick s'écrit communément :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (\text{I.23})$$

En se basant sur les hypothèses suivantes (Yu et coll., 2008) :

- la matrice polymère doit être isotrope.
- la concentration de l'eau est uniforme dans la pastille.
- la diffusion est constante.

Les conditions initiale et limite sont les suivantes :

- condition initiale : à $t = 0$, $C = C_0$ pour $0 < x < e$
- condition limite : pour $t > 0$, $C = C_e$ pour $x = e$ et $\partial C / \partial x = 0$ pour $x = 0$

Dans l'équation (I.23) et les hypothèses ci-dessus, t est le temps, C est la concentration en eau, C_0 la concentration initiale en eau, C_e est la concentration constante en eau à la surface de l'échantillon et D est le coefficient de diffusion.

Crank (1975) a proposé la solution suivante de la seconde loi de Fick sous la forme de séries trigonométriques :

$$\frac{m_t - m_i}{m_\infty - m_i} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp \left[\frac{-D(2n+1)^2 \pi^2 t}{e^2} \right] \quad (\text{I.24})$$

Pour des valeurs de $(m_t - m_i) / (m_\infty - m_i)$ inférieures à 0,5, cet auteur a simplifié l'équation I.25 en s'appuyant sur l'approximation de Stefan :

$$\frac{m_t - m_i}{m_\infty - m_i} = \frac{4}{e} \left(\sqrt{\frac{D}{\pi}} \right) \sqrt{t} \quad (\text{I.25})$$

En comparant l'équation I.26 et l'équation I.23, on peut alors dire que l'exposant diffusionnel est bien égal à 0,5 dans le cas d'une diffusion Fickienne.

Pour ce qui est du cas II, où le mécanisme est contrôlé par la vitesse de relaxation du polymère, l'exposant diffusionnel vaut 1. Enfin, dans le cas III, n varie entre 0,5 et 1.

Plusieurs auteurs (Peppas et Sinclair, 1983, Russo et coll., 2007, Yu et coll., 2008, Tang et coll., 2008) ont étudié la diffusion de l'eau dans des polymères hydrophiles en utilisant la loi présentée ci-dessus pour déterminer le coefficient de diffusion de l'eau dans le matériau.

I.11. Les polymères biodégradables

Depuis quelques années, un intérêt croissant est porté sur les polymères biodégradables, en raison des stocks pétroliers qui sont amenés à diminuer à moyen terme, mais aussi en raison de problèmes de recyclage des polymères issus du pétrole. La valorisation de la biomasse est ainsi une solution très sérieusement envisagée pour répondre aux besoins du marché en matière plastique. Deux voies peuvent être envisagées : l'utilisation de la biomasse comme source de matière première pour l'industrie chimique, et l'utilisation de la biomasse comme charge dans la production des matériaux composites.

La biodégradabilité d'une substance se définit comme sa capacité à être entièrement décomposée en dioxyde de carbone et/ou méthane, en eau et en matière organique (biomasse) par les micro-organismes (bactéries, champignons, protozoaires). Différents facteurs influencent la biodégradabilité : les paramètres physico-chimiques du milieu (température, teneur en eau, pH) ; les paramètres microbiologiques du milieu (présence de microorganismes, taux de colonisation microbienne à la surface du matériau) ; la structure et les propriétés du polymère (degré de polymérisation, caractère hydrophile ou hydrophobe, porosité, cristallinité, présence de liaisons facilement hydrophobes comme les liaisons ester ou les doubles liaisons) ; le procédé de fabrication et les conditions de mise en forme du matériau qui agiront sur la cristallinité, la composition, le comportement vis-à-vis de l'eau ou l'épaisseur du matériau.

Les biopolymères peuvent être classés en deux catégories (Figure I.9) :

- les polymères extraits directement de la biomasse (souvent appelés agro-polymères) et leurs dérivés. Ils constituent la plupart du temps les parois cellulaires des végétaux ou servent de réserve aux plantes en vue de leur croissance. On trouve par exemple, les polysaccharides (comme l'amidon ou la cellulose) et les protéines (gluten, caséine, collagène, gélatine).
- les polyesters biodégradables ; répartis en 3 sous-groupes : les polymères bactériens obtenus principalement par fermentation tels que les polyhydroxyalcanoates (PHA) avec par exemple le polyhydroxybutyrate (PHB) ou le poly (hydroxybutyrate-cohydroxyvalerate) (PHBV) ; les polymères dont seuls les monomères sont issus de la biomasse tels que les polymères dérivés des acides lactiques (PLA) ; les polymères dont les monomères sont issus de ressources fossiles comme des polycaprolactones (PCL), polyesteramides (PEA) et différents copolyesters aromatiques ou aliphatiques.

Quatre domaines d'applications des biopolymères sont identifiés en fonction de leurs propriétés (tableau 1.1): la médecine, l'agriculture, les emballages et l'automobile.

La propriété la plus importante recherchée dans les biopolymères est la biodégradabilité. Celle-ci est due à la présence dans les molécules de liaisons facilement clivables telles que des liaisons esters ou amides. On utilisera donc les biopolymères pour des applications de courte durée, présentant des risques de contamination rendant difficile le triage ou le recyclage, nécessitant des précautions d'hygiène et de stérilisation particulières ou pour lesquelles il est difficile de contrôler les déchets.

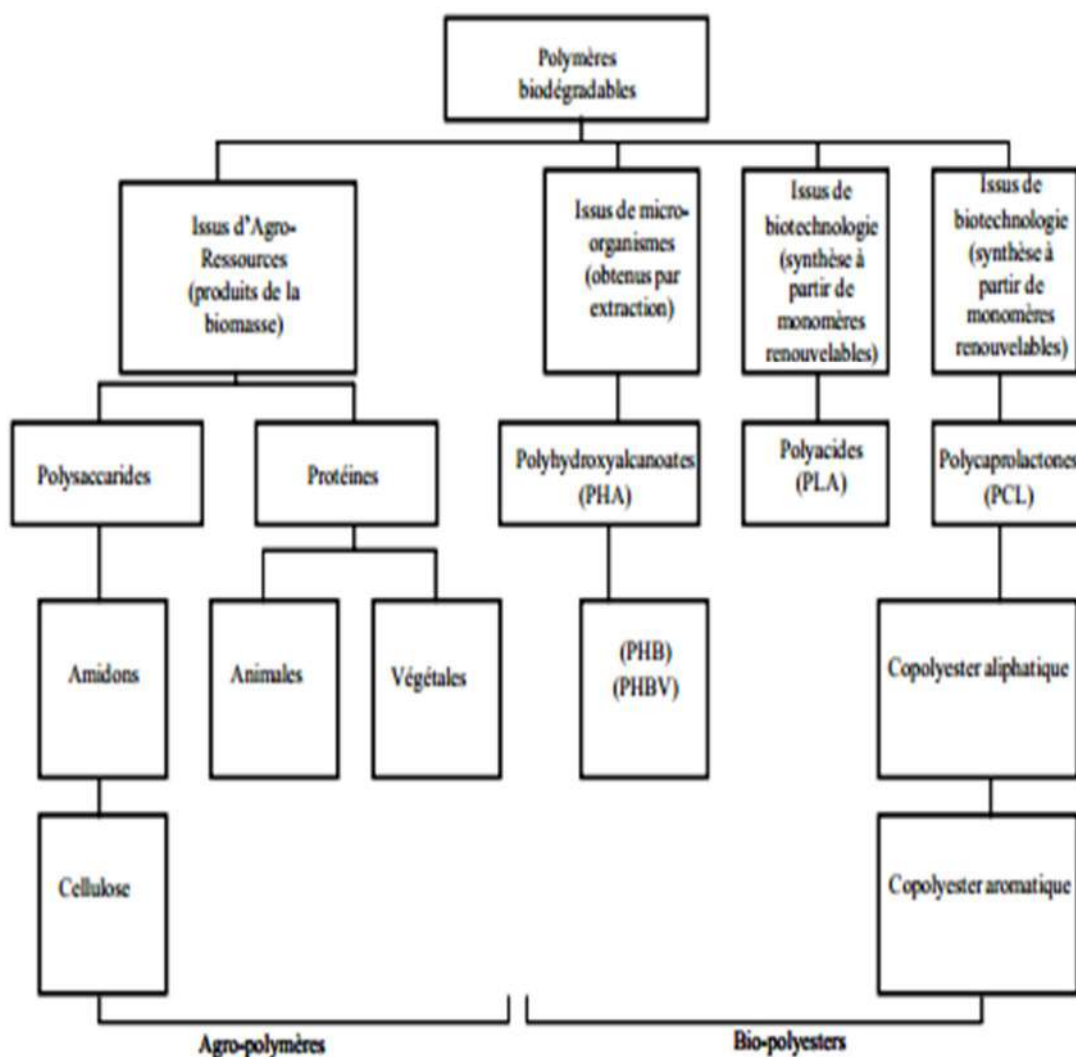


Figure I.9: Classification des polymères biodégradables, (Avérous, 2004).

Tableau 1.1 : Propriétés spécifiques des biopolymères et applications attendues (Rabetafika et coll., 2006)

Biopolymères	Propriétés particulières	Applications ciblées
Polymers à base d'amidon	Antistatiques, anticondensation, toucher naturel	Emballages et sacs
Polymères à base de cellulose	Transparences, antistatiques	Emballages
Polymères à base de protéines	Comestibles, grandes diversités chimiques des acides aminés, perméabilité sélective aux gaz	Galénique, emballages, alimentaires
Polymères à base d'huile	Siccativités	Peinture, vernis
Polymères de synthèse à base d'acide lactique	Anti-condensations, brillances, anti-bactériens	Emballages, textiles
Polyesters bactériens (Polyhydroxyalcanoates)	Propriétés piézoélectriques, anti-oxydants, insolubilité dans l'eau	Médical, matériaux ostéosynthétique, emballage rigide
Caoutchouc	Elastomère	Vulcanisation

La perméabilité à la vapeur d'eau est également une propriété recherchée des biopolymères. Cette propriété résulte de l'hydrophilie observable dans la plupart de ce type de matériaux, comme l'amidon, la cellulose et les protéines, résultant de la présence de fonctions polaires hydroxyle et/ou amine qui confèrent une forte réactivité avec l'eau par formation de ponts hydrogènes (Auras et coll., 2004). Si cette propriété peut être un inconvénient, par exemple pour l'emballage de certains produits alimentaires sensibles à l'humidité, elle devient un avantage pour l'emballage de produits frais sensibles à la condensation ou qui doivent continuer à sécher pendant les périodes de transport et de stockage. Les matériaux biocompatibles et biorésorbables sont particulièrement intéressants dans le domaine médical car ils peuvent remplacer les implants médicaux en céramique. En effet, d'une part ils possèdent des propriétés mécaniques intéressantes, et d'autre part en se décomposant dans l'organisme humain, ils sont progressivement remplacés par un tissu vivant. De même, dans le domaine pharmaceutique, les

médicaments à libération contrôlée sont des exemples d'application où la biorésorbabilité des polymères joue un rôle important en libérant progressivement le principe actif. Dans l'agriculture, les films de paillage sont de plus en plus en biopolymère. Ils permettent, tout comme les films plastiques classiques, de réduire l'évaporation de l'eau et d'accroître la température du sol, mais présentent l'avantage d'éviter les travaux d'enlèvement, de nettoyage et de traitement des déchets plastiques.

Enfin, des applications plus ponctuelles comme la fabrication de tees de golf, de peignes ou de stylos à base d'amidon ou de jouets pour animaux ont été envisagées, mais l'objectif de ce type de développement est essentiellement de l'ordre du marketing.

D'une manière générale, ces différentes applications nécessitent de combiner plusieurs matériaux. Par exemple, le polystyrène expansé utilisé pour la fabrication de barquettes alimentaires peut être remplacé par un biomatériau réalisé sous forme d'un système multicouche constitué d'une couche interne en amidon expansé mélangé à des fibres végétales et de couches externes protectrices en polyester biodégradable hydrophobe [10].

I.12. Les matériaux composites

D'une manière générale, les propriétés d'un polymère seul sont insuffisantes pour conférer à l'objet que l'on veut fabriquer toutes les propriétés souhaitées en terme de rigidité, résistance mécanique, légèreté ou autre propriété physico-chimique, électrique, optique...

C'est pourquoi on s'oriente de plus en plus vers les matériaux composites. Un matériau composite peut être défini comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. La matrice assure la cohésion et l'orientation de la charge. Elle permet également de transmettre à la charge les sollicitations auxquelles est soumis le composite. Les matériaux ainsi obtenus sont très hétérogènes et souvent anisotropes. La nature de la matrice et de la charge, la forme et la proportion de charge, la qualité de l'interface et le procédé de production utilisé sont autant de paramètres qui peuvent influencer les propriétés du matériau composite. La matrice et le renfort peuvent être métalliques, céramiques ou plastiques, ce qui permet d'envisager une multitude de combinaisons. Nous ne présenterons pas ici une revue exhaustive sur les matériaux composites mais nous nous concentrerons sur ceux dont la matrice est constituée d'un polymère [10].

I.12.1 Les matrices polymères

Le rôle de la matrice polymère est de recevoir les renforts, répartir les contraintes, apporter la tenue de la structure et donner la forme désirée au composite. On peut utiliser des polymères thermoplastiques ou des polymères thermodurcissables tels que :

Les thermoplastiques se présentent sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme et les refroidir pour les fixer. Cette opération est réversible. Les matrices thermoplastiques ont de faibles propriétés mécaniques ; un renforcement par l'incorporation de charge leur confère une tenue thermique et mécanique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les matrices les plus courantes sont le poly (chlorure de vinyle) qui est utilisé dans la fabrication des tuyauteries, le poly (acétate de vinyle) que l'on trouve dans les colles et adhésifs, le polyéthylène dont on se sert pour fabriquer les jouets, les bouteilles de shampoing ou les sacs de supermarchés, le polypropylène pour les boîtes alimentaires ou les revêtements de sols, le polystyrène qui intervient dans la composition des contenants alimentaires, de la vaisselle jetable, des jouets ou des vitres [10].

Les thermodurcissables durcissent de façon définitive lors de leur synthèse. La transformation est donc irréversible. Ce sont les matrices les plus utilisées dans la production de matériaux composites. On trouve les résines polyester qui, associées à des fibres de verre ont une bonne tenue à la température et aux agents chimiques, les résines époxy qui possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, thermiques et chimiques, et les résines phénoliques qui résistent bien au feu [10].

I.12.2. Les renforts

L'incorporation d'une charge au sein d'une matrice permet d'agir sur plusieurs propriétés du matériau composite formé :

- propriétés physico-chimiques (résistances aux produits acido-basiques...)
- propriétés mécaniques (résistances aux chocs, à la compression, aux cisaillements...)
- propriétés électriques (amélioration de la conductivité ou de la résistance)
- facilité de mise en œuvre
- réduction du coût...

Les renforts sont répartis en trois familles qui sont :

Les charges organiques : ce sont des polymères qui peuvent apporter une bonne tenue mécanique.

Les charges minérales : qui sont souvent utilisées comme additifs et permettent d'améliorer les propriétés mécaniques du composite tout en réduisant son prix de revient.

Les charges métalliques : qui améliorent les propriétés électriques et thermiques du composite.

On peut également les classer selon leurs aspects. On distingue ainsi :

- les charges particulières renforçantes dont certaines peuvent permettre de modifier la masse volumique du composite, ses propriétés électriques, mécaniques et physicochimiques. Elles sont généralement de petites tailles et peuvent être sphériques, en paillettes, ...
- les charges particulières inertes qui, de par leur faible coût, réduisent le prix du composite. Ce sont essentiellement des minéraux comme le carbonate de calcium, la craie, la silice ou le kaolin. Ce type de charge peut éventuellement augmenter la dureté et la résistance à la rupture du composite,
- les fibres qui peuvent être minérales (verre, carbone, céramique) ou organiques, et conférer au composite un module de Young, une résistance à la rupture ou une conductivité électrique élevés [10].

Le tableau 1.2 rassemble les propriétés courantes qui peuvent être modifiées par l'incorporation, dans une matrice polymère, d'une charge telle que celles évoquées ci-dessus.

Tableau 1.2 : Propriétés modifiées par l'incorporation d'une charge

Propriétés recherchées	Types de propriétés	Types de charges
Mécaniques	Résistance à l'abrasion	Carbure de silicium, oxyde d'aluminium, silice, métaux
	Force à l'impact	Fer, aluminium, fibres, particules d'élastomères
	Module de flexion	Carbonate de calcium, sulfate de calcium
	Résistance à la compression ou à la flexion	Silice, alumine, fer, aluminium, carbure de silicium
	Résistance à la traction	Fibres, métaux
Electriques	Résistance électrique	Alumine, silice, talc, mica
	Conductivité électrique	Or, argent, cuivre, électrolyte, aluminium, graphite
Physico-chimiques	Résistance à la Corrosion	Zinc
Nucléaire	Boucliers antiradiations	Plomb, carbure de bore
Thermiques	Transfert de chaleur	Aluminium, alumine, béryllium, silice, or, argent
	Réduction de chaleur	Fer, aluminium, silice

I.13.Conclusion

Dans cette partie, nous avons rappelé de manière bibliographique quelques notions sur les polymères, leurs structures et quelques domaines d'application, nous avons ensuite présenté différentes propriétés des polymères isolants dont les phénomènes physiques qui gouvernent l'évolution de la charge électrique.

II.1. Introduction

Deux mécanismes physiques sont couramment employés pour charger les matériaux granulaires en vue de leur séparation dans un champ électrique intense : l'effet couronne, assurant la charge par « bombardement ionique » et l'effet triboélectrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. L'effet triboélectrique est utilisé pour la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants, grâce à l'aptitude de ces matériaux à garder la charge obtenue par effet triboélectrique le plus longtemps possible [14].

II.2. Séparation tribo-électrostatique des matériaux plastiques

II.2.1. Mécanisme de charge triboélectrique

Lorsque deux matériaux différents sont mis en contact (figure II.1) ils acquièrent des charges électriques dues au phénomène de triboélectrisation. À l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Le concept de localisation ou de délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans la figure II.4. Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température (T°), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par sauts. Comme le précise Touchard, ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite (E_g) au voisinage du niveau Fermi (E_f). En particulier, lorsque la densité d'état près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants [15].

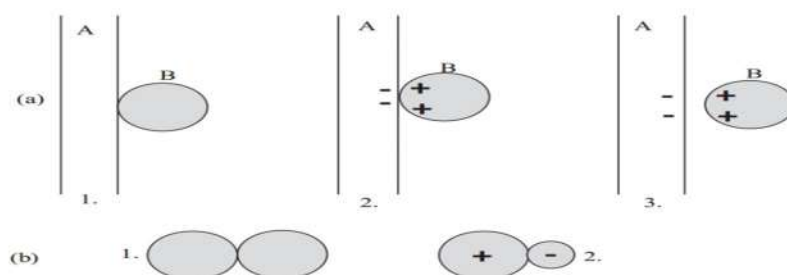


Figure II.1. L'effet triboélectrique et l'échange de la charge électrique entre deux surfaces : (a) : 1 Surface A neutre, particule B est neutre ; 2. La surface A et la particule B sont en contact ; 3Après la séparation, la surface A à tendance à se charger négativement, et la particule B positivement ;(b) :1; Deux particules neutres de même taille en contact ; 2 ; les particules grandes ont la tendance à se charger positivement et les petites négativement.

Les travaux de Liu et Bard ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validé par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, Whitesides et McCarthy ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles, afin de proposer que le transfert d'ions soit une explication possible pour la tribo charge des matériaux isolants.

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons, mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité. Des considérations théoriques s'opposent aussi à un mécanisme faisant intervenir le transfert d'électrons. Plusieurs chercheurs ont remarqué que le processus de tribo électrisation est en corrélation avec l'acidité ou la basicité des matériaux isolants. En 1902 Knoblauch a fait observer que les solides organiques acides tendent se charger négativement, et les solides organiques basiques tendent à se charger positivement. Il a proposé un mécanisme de transfert de proton pour l'effet tribo. Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert de proton puisse expliquer la tribo électrisation d'un large éventail de matériaux isolants. Ces observations, que les propriétés acides ou basiques des matériaux sont en corrélation avec leurs propriétés tribo électriques, sont difficiles à concilier par un mécanisme qui implique le transfert d'électrons (figure II.3).

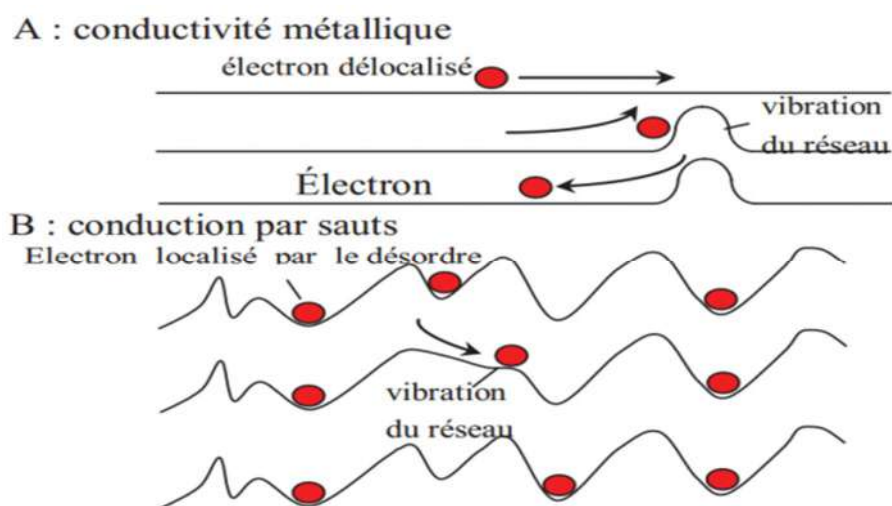


Figure II.2. Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons

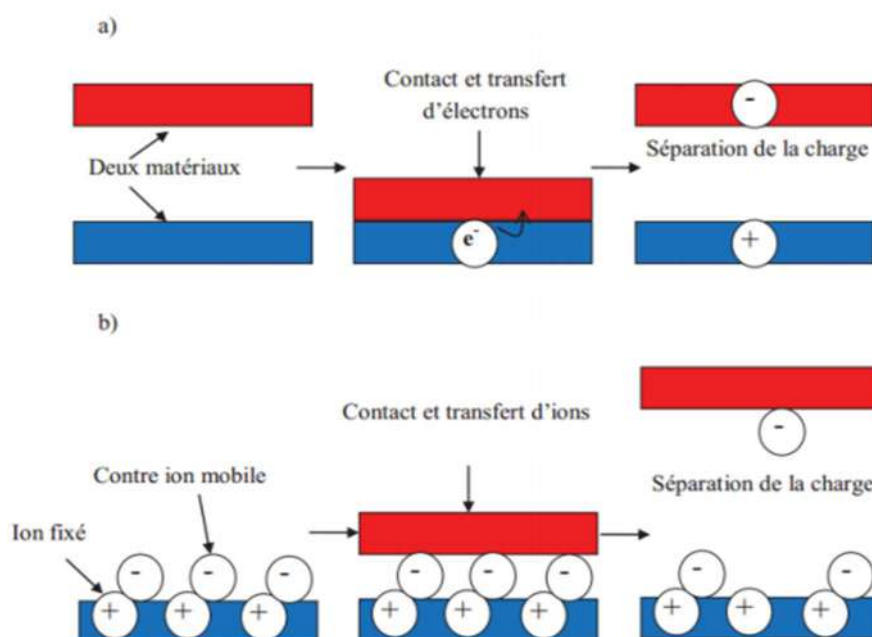


Figure 11.3. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions

II.2.2. Série triboélectrique

Deux corps frottés l'un sur l'autre s'électrisent l'un positivement et l'autre négativement. On appelle série triboélectrique un classement des diverses matières dans un ordre tel que, de deux matières qui se suivent, la première est positive. Plus les deux matériaux frottés sont éloignés l'un de l'autre sur la liste, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée. Certaines séries sont proposées de longues dates. Wilcke (1759), Faraday (1840), Jamin et Bouty donnent à peu près la même série.

Une série beaucoup plus étendue a été donnée par Shaw (1917) qui a mieux défini les échantillons employés ; il a aussi étudié l'influence de la température qui peut produire des inversions, etc. Les séries triboélectriques varient en tout cas d'un chercheur à l'autre et chaque série reflète la culture matérielle de son moment historique. En effet une différence dans le frottement, des facteurs externes peuvent inverser les signes obtenus, il semble donc impossible de réaliser une liste avec un ordre fiable ; le fait que les signes peuvent s'inverser de manière si facile, est très surprenant.

Tableau II.1. Série triboélectrique [14]

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

La série suivante (tableau II.1) a été réalisée par Bill Lee en (2009), c'est un tableau qui peut être utilisé pour prédire le signe des charges acquises par effet triboélectrique au contact entre deux matériaux [16].

Ce classement n'est donc que très approximatif et l'ordre des différents matériaux peut varier sous l'influence de facteurs tels que : la rugosité de la surface, les forces de contact, le travail de sortie...etc. En définitive ce diagramme n'est qu'un outil de comparaisons relatives entre les différents corps plutôt qu'une référence absolue.

II.2.3. Dispositifs de charge triboélectrique

L'acquisition de charge par effet triboélectrique se produit au niveau surfacique entre deux corps. La charge statique acquise se produit dans un système où généralement la conductivité du matériau est faible, ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés. Cette charge importante est nécessaire pour le tri des granules dans un champ électrique intense.

Multiplés travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique utilisant : des ventilateurs, des tubes rotatifs, des lits fluidisés (créés par des souffleurs et des compresseurs), des micros-cyclones, des chargeurs statiques...

II.2.3.1. Chargement par ventilateur

Le dispositif de chargement type ventilateur (figure II.4) agit le mélange de plastique et donne des particules chargées par rotation. Les lames rotatives, qui peuvent fonctionner à vitesse élevée, sont faites de divers matériaux, afin de faciliter la charge triboélectrique des constituants du mélange. Ce chargeur a été utilisé dans la séparation du PA/PC et PS/ABS. Le principal inconvénient est le traitement discontinu.

La charge non homogène à la sortie de ce type de dispositif et sa sensibilité aux changements climatiques ne permettent pas d'envisager une séparation électrostatique satisfaisante dans une installation industrielle.

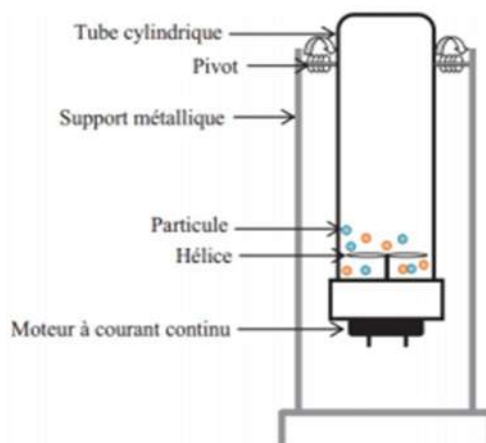


Figure II.4. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur

II.2.3.2. Chargement par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant (figure II.5), disposé en position verticale. Les matériaux granulaires ou pulvérulents à charger sont introduits en direction radiale à la paroi intérieure du cylindre, par un ventilateur, dont la vitesse de rotation peut être modifiée. Le frottement continu entre les particules et la paroi génère la majorité de la charge acquise dans un dispositif de ce type.

Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du séparateur tribo-aéro-électrostatique, mais son efficacité dans le cas des particules fines reste à tester.

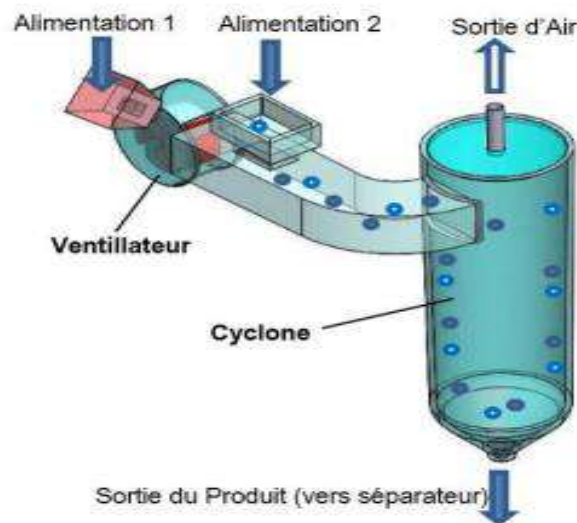


Figure II.5. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone

II.2.3.3. Chargement par vibro-transporteur

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations. Cette installation a été développée par Blajan et al (Figure II.6). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

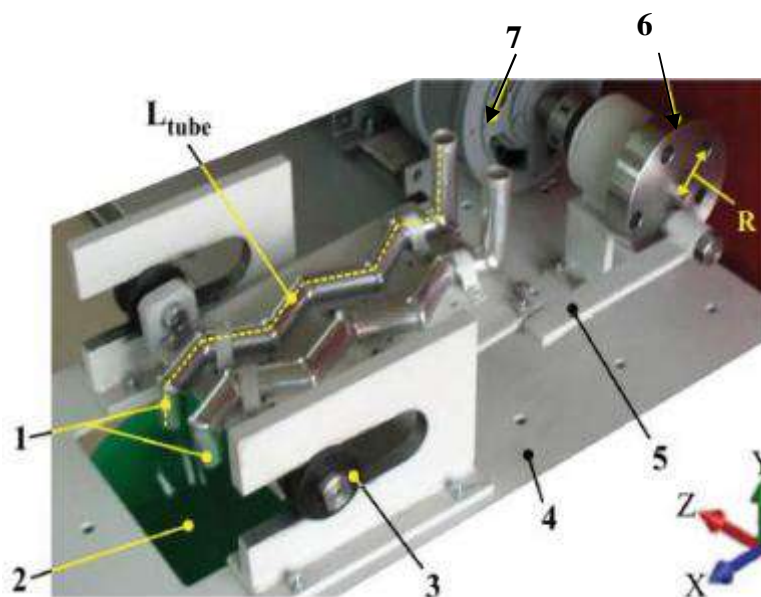


Figure II.6. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube.

II.2.3.4. Chargement par lit-fluidisé

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (figure II.7).

- La vibration : pour les plus faibles vitesses du gaz, la couche des particules reste sur le disperseur sans mouvements visibles. Si on augmente encore la vitesse, on observe des vibrations de particules.
- La formation : le lit commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...) grâce à une vitesse superficielle de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine expansion de la couche, on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules.
- Le bullage : à une vitesse de gaz égale ou supérieure à la vitesse minimum de bullage U_{mb} , des bulles se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution de gaz au bas du cylindre, s'élèvent dans le lit, grossissent par coalescence et viennent finalement éclater en surface comme dans le cas d'un liquide à ébullition.
- Le pistonage : en excès au-delà de U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions comparables à celles du cylindre. Il y a alternance dans le lit de passage de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.
- Le renardage: les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.

- L'entraînement : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

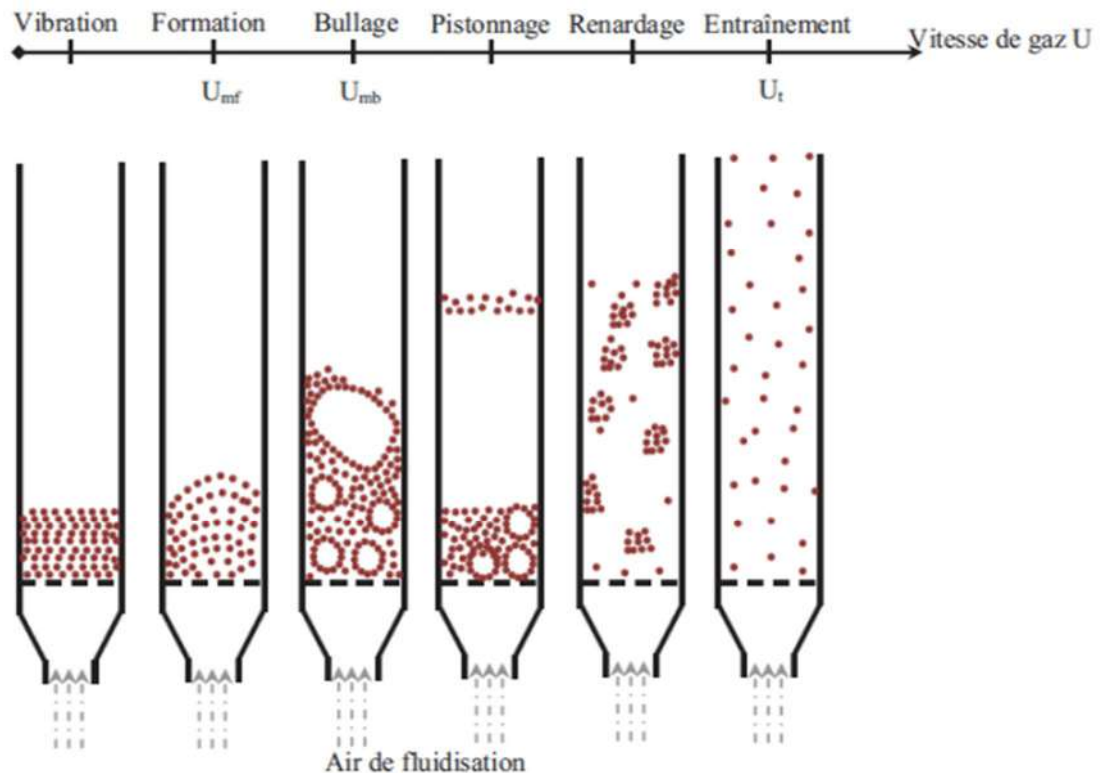


Figure II.7. Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation.

Le dispositif a souvent la forme d'un tube cylindrique isolant (figure II.8), en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un disperseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit d'une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signes opposés grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

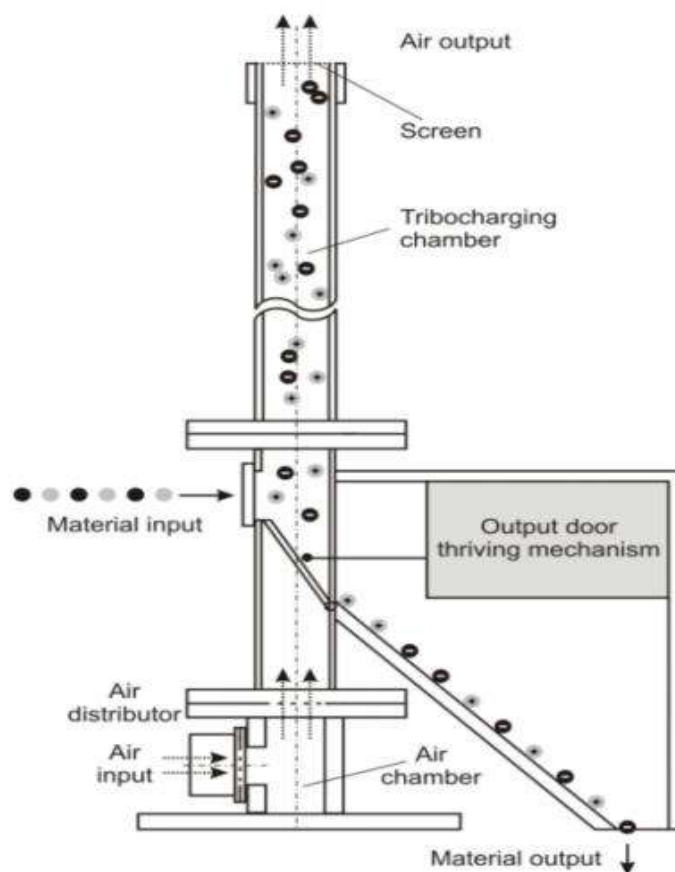


Figure II.8. Dispositif à lit fluidisé

La figure II.9, représente une combinaison de deux modes de chargement en cascade. La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules fines sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

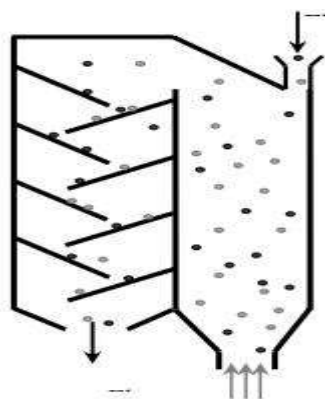


Figure II.9. Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique

II.2.4. Forces aérodynamiques et électrostatiques

Le transport, le stockage, les mélanges, l'écoulement, la densification des matériaux pulvérulents sont influencés par les forces inter particulaires qui prennent naissance lors de la friction ou du simple contact [15].

Trois types de forces s'exercent sur les matériaux granulaires :

- A. Les forces de la pesanteur
- B. Les forces de London-Van der Waals
- C. Les forces électrostatiques.

A) Forces de la pesanteur

Le poids d'un corps de masse m s'exprime par :

$$P = mg \quad (\text{II.1})$$

Avec $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

Aux forces de la pesanteur s'opposent des forces inter particulaires. Elles sont différentes pour des particules chargées d'électricité statique ou électriquement neutres.

B) Forces de LONDON –van der WAALS

Il s'agit de forces attractives (figure II.10). Si on considère deux atomes distants de r , la force d'interaction F [N] entre moments dipolaires instantanés s'écrit :

$$F = -\frac{\alpha^2}{r^7} \frac{4}{3} \frac{hc}{\lambda_i} \quad (\text{II.2})$$

Où α est la polarisabilité de l'atome et $\frac{hc}{\lambda_i}$ son énergie d'ionisation.

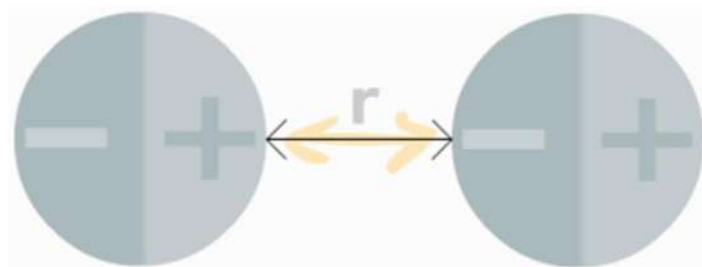


Figure II.10. La force attractive de London-Van der

La figure II.11 montre la force d'interaction entre deux sphères matérielles : c'est la somme de toutes les forces d'interaction de London-Van der Waals relatives aux paires constituées d'un atome dans chaque sphère [14].

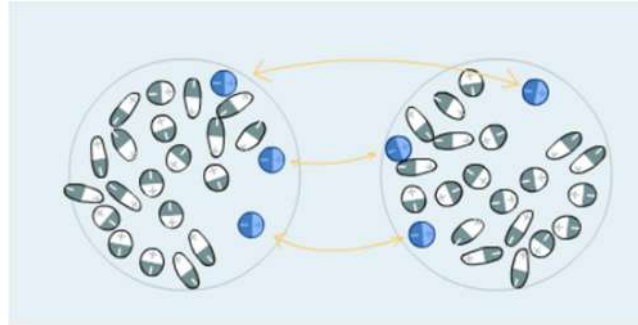


Figure II.11. Force attractive de London-Van der Waals entre deux sphères

Le calcul réalisé par Hamaker pour 2 sphères identiques de rayon R séparés de r (distance centre à centre) et baignant dans le vide conduit à :

$$F_A = -\frac{A}{6(r-2R)} \left(\frac{2R^2}{r^2-4R^2} + \frac{2R^2}{r^2} + \ln \frac{r^2-4R^2}{r^2} \right) \quad (\text{II.3})$$

Où A est la constante de Hamaker.

Les forces de Van der Waals ne sont significatives (pour le processus d'agrégation) que si la distance inter-particulaire ($r-2R$) est inférieure à 100 nm ; l'équation donnée par Hamaker est donc suffisante.

C) Forces électrostatiques.

❖ Forces de COULOMB

Charles-Augustin Coulomb découvre expérimentalement l'expression de la force électrique que s'exercent deux charges électriques immobiles disposées sur des sphères.

Coulomb réalise que le module de la force électrique dépend des paramètres suivants :

- La force électrique est proportionnelle au produit des deux charges q_1 et q_2 en attraction ou en répulsion.
- La force électrique est inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux charges $1/r^2$

- La force électrique est proportionnelle à une constante k afin d'évaluer la force électrique en newton.

Voici l'expression scalaire de la loi de Coulomb en électrostatique :

$$F_e = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} \quad (\text{II.4})$$

Où :

F_e : Force électrique en newton (N) ;

q_1 : première charge qui applique la force électrique sur la deuxième charge en coulomb (C) ;

q_2 : deuxième charge qui applique la force électrique sur la première charge en coulomb (C) ;

r : distance entre les deux charges ponctuelles en mètre (m) ;

k : Constante de la loi de Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ et ϵ_0 : permittivité du vide.

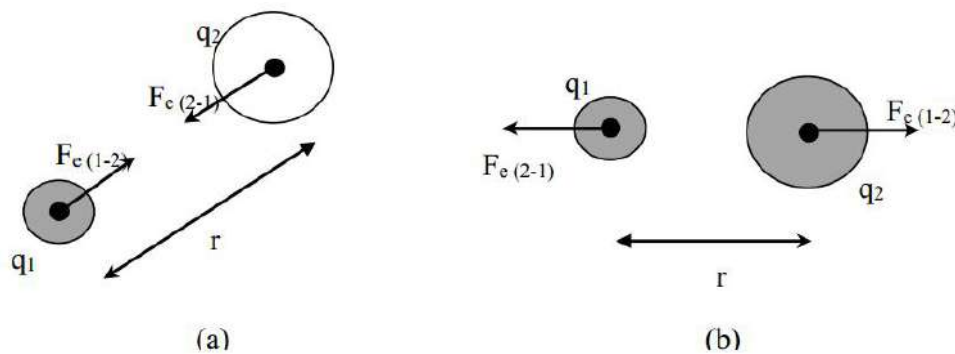


Figure II.12. Force de coulomb entre deux sphères chargées

(a) : attraction, charges de signes contraires ($q_1 q_2 < 0$)

(b) : répulsion, charges de même signe ($q_1 q_2 > 0$)

❖ Forces aérodynamiques

Afin de bien étudier les mouvements des particules dans les procédés de chargement triboélectrique, une bonne connaissance des forces aérodynamiques agissant sur ces particules s'impose. Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrostatique a lieu sous l'action de la force suivante :

$$F_i = F_{el}(Q, E_0, x) \pm F_a - F_g \quad (\text{II.5})$$

Où :

F_i : la force d'inertie

F_{el} : la force exercée par un champ électrique uniforme d'intensité E_0 sur une particule chargée, de charge Q , située à une distance x de l'électrode.

F_a : la force aérodynamique et F_g la force gravitationnelle.

La force d'inertie F_i s'exprime par la relation :

$$F_i = W(\rho_s - K\rho) \frac{dv}{dt} \quad (\text{II.6})$$

v : La vitesse de particule

$K\rho$: Coefficient de forme (pour les particules sphériques $K= 0,5$),

W : Le volume d'une particule ayant la densité ρ_s

ρ_s : Densité de l'air.

La force aérodynamique s'écrit :

$$F_a = \frac{c_d \pi R^2 \rho v_i^2}{2} \quad (\text{II.7})$$

C_d étant en fonction du nombre de Reynolds : $R_e = \frac{v.l}{\nu_i}$

V : vitesse du fluide [m/s] ;

L : dimension du fluide [m] ;

ν_i : viscosité du fluide [m²/s] ;

V_r : vitesse relative d'une particule dans l'air [m/s].

La force de frottement avec l'air est dépendante de la vitesse, cette dépendance peut être très compliquée. Seuls des cas simples peuvent être traités analytiquement.

II.3. Installations de séparation tribo-électrostatique

II.3.1. Séparateurs tribo-électrostatiques des mélanges granulaires

Multiples installations destinées à la séparation tribo-électrostatique des matériaux granulaires plastiques ont été conçues et construites. Le point commun entre ces dispositifs est la nécessité de réaliser deux opérations successives, le chargement triboélectrique des particules suivi de leur séparation.

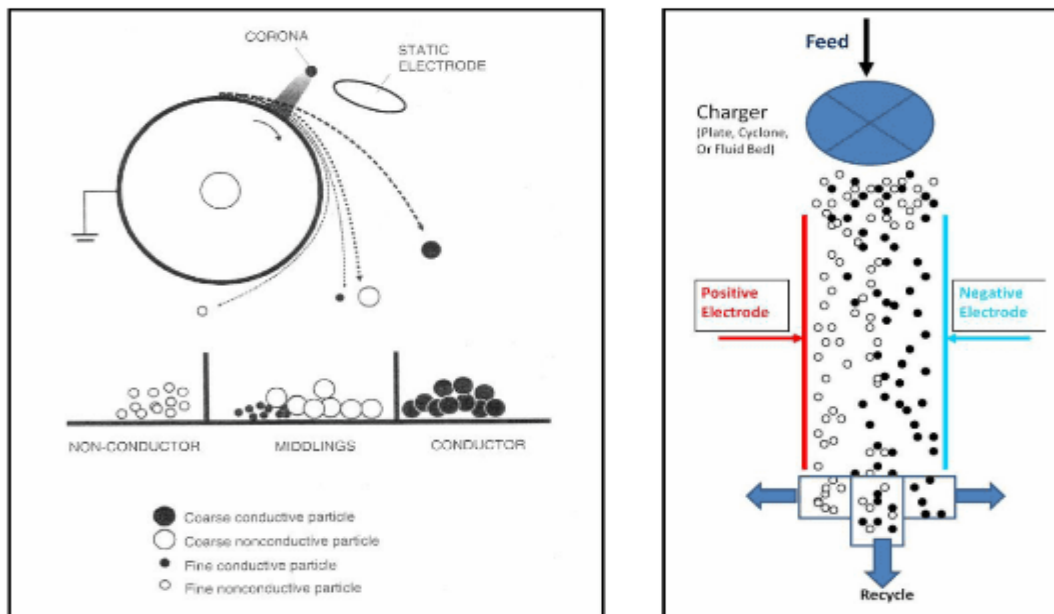


Figure II.13 Séparation électrostatique de matériaux granulaire à base de plantes croquettes

II.3.1.1. Séparateur triboélectrique à tapis roulant

Le schéma de la figure II.14 explique le fonctionnement d'un séparateur triboélectrique à tapis roulant TBS (Tribocharged Belt Separator). Les particules sont tribo-électrisées par un dispositif de chargement statique, puis elles tombent sur un tapis roulant qui les transporte vers la zone de séparation.

La séparation est réalisée par une électrode haute tension qui attire les particules d'une polarité et repousse les particules de polarité opposée, grâce aux forces électriques de Coulomb [17].

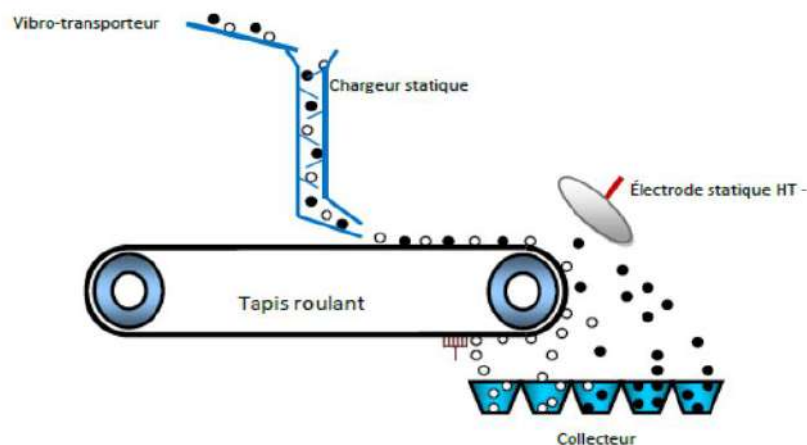


Figure II.14. Représentation schématique d'un séparateur TBS.

II.3.1.2. Séparateur triboélectrique à chute libre

Le séparateur électrostatique à chute libre STECL présenté sur la figure II.16 a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la tribo-électrisation, de la séparation des matériaux granulaires plastiques [18] et de la purification des minerais.

Le mélange granulaire est préalablement chargé par un des différents dispositifs de chargement triboélectrique. Il est ensuite introduit dans la partie haute du STECL, sa chute libre l'entraîne dans une zone inter électrodes où le champ électrique est intense. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode désignée opposé à leur charge acquise.

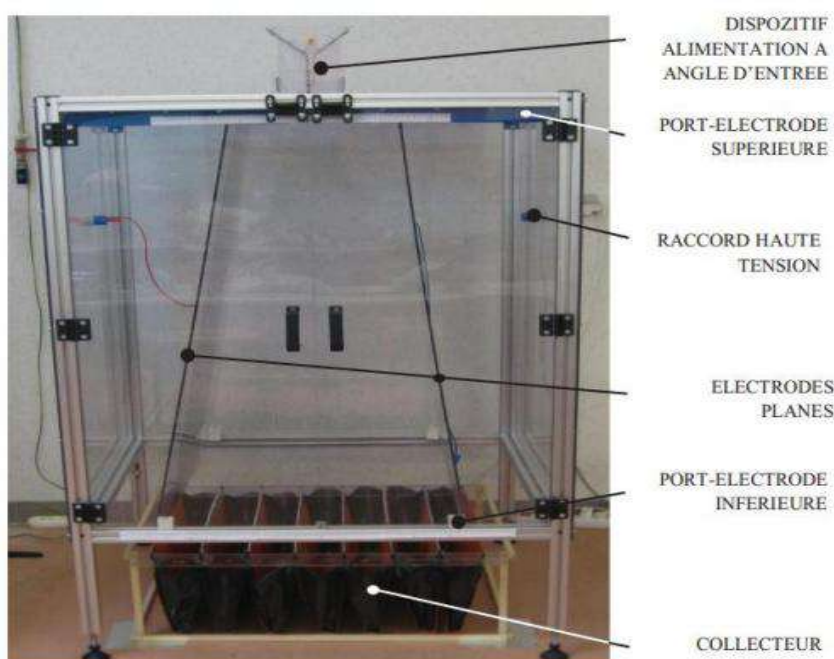


Figure II.15. Séparateur tribo électrostatique à chute libre développé au sein du laboratoire d'Electrostatique d'Angoulême.

II.3.1.3. Séparateurs industriels

Hamos GmbH est un leader mondial dans le domaine de la séparation électrostatique des matériaux granulaires. Son séparateur EKS (figure II.16) est largement utilisé dans l'industrie du recyclage.

Le mélange de plastiques est introduit par un convoyeur vibrant dans l'unité de charge triboélectrique. Le mélange de granules de plastiques chargés passe par un champ électrique intense où est réalisée la séparation électrostatique. Les particules chargées positivement sont attirées par une électrode négative, tandis que les particules chargées négativement ne sont pas

attirés. Il est possible de séparer toutes sortes de mélanges plastiques, moyennant quelques modifications mineures de l'unité de chargement et de la position de la plaque de séparation.

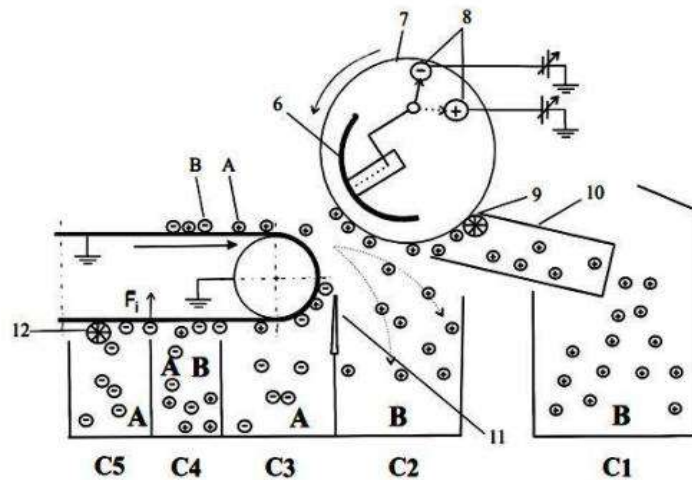


Figure II.16. Schéma de principe de la zone de séparation électrostatique du séparateur EKS HAMOS: A, B –granules en plastique; 6- électrode haute tension; 7- cylindre métallique rotatif; 8-contacts haute tension; 9,12- brosses pour enlever le matériau; 10- tube collecteur; 11- - déflecteur; C1,..., C5- collecteurs.

Le séparateur Carpco (figure II.17), est un représentant du groupe des séparateurs tribo électrostatiques à chute libre, de grande capacité, pour la séparation de deux ou plusieurs matériaux. La nouvelle conception de cette installation est facilement adaptable à diverses applications, notamment à la séparation des minerais et des plastiques dont la taille varie de 1 mm à 1 cm). Le séparateur utilise un champ électrostatique produit par deux électrodes plaques, connectées à deux sources variables de haute tension, de polarités opposées, ajustables dans la gamme 0-60 kV.

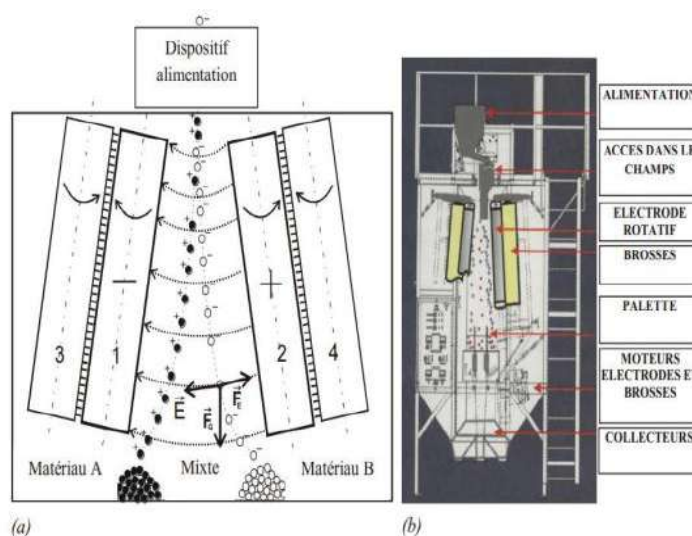


Figure II.1. Séparateur tribo électrostatique à chute libre Carpco

Ces dispositifs évitent l'inconvénient des séparateurs "standard" tribo-électrostatique présentés dans la section précédente, par l'utilisation simultanée de l'effet de tribo électrostatique, la force de Coulomb et la force d'image électrique. Dans de tels séparateurs, le chargement et la séparation sont combinés en une seule opération. Les granules sont chargés et séparés simultanément. Un des avantages de cette solution réside dans le fait que les particules moins chargées ne quitteront pas la zone active du séparateur jusqu'à ce qu'ils acquièrent une charge suffisante pour permettre aux forces électriques de les conduire à l'électrode de polarité opposée.

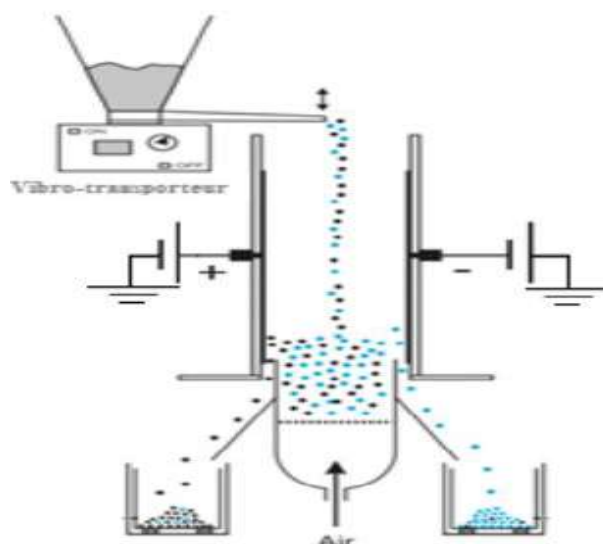


Figure II.18. Prototype de laboratoire séparateur tribo-aéro-électrostatique.

Le plus simple de ces séparateurs tribo aéro-électrostatique, est représenté dans la figure II.18 a, il est composé d'une chambre parallélépipédique (110 mm x 80 mm x 400 mm), avec deux parois verticales opposées en PMMA, et de deux plaques d'aluminium reliées à deux alimentations de haute tension continue de polarité positive et négative.

Un dispositif d'alimentation vibratoire introduit la matière granulaire par l'intermédiaire d'une goulotte dans la partie supérieure de la chambre triboélectrique. Les granules chargés par effet tribo-électrique dans le lit fluidisé sont attirés par les électrodes de polarités opposées et sortent de la chambre à travers les deux espaces sous les électrodes et tombent ensuite dans les deux collecteurs dédiés. La masse du produit collecté est mesurée de manière continue avec des balances électroniques positionnées sous les collecteurs et connectés à un ordinateur par l'intermédiaire de deux connecteurs RS232.

Les résultats montrent que le matériau majoritaire dans le mélange peut-être collecté à des puretés supérieures à 99%. En revanche, les matériaux minoritaires récupérés après la séparation ont une pureté nettement plus faible, car des particules du matériau majoritaires sont plus nombreuses à être entraînées dans une mauvaise direction par l'air de fluidisation.

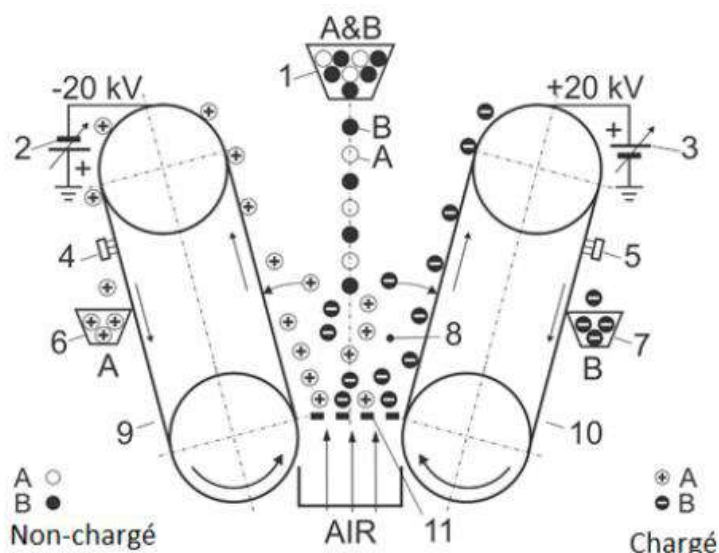


Figure II.19. Séparateur tribo-aéro-électrostatique pour les plastiques mixtes granulaires récemment breveté. 1: alimentation en produit; 2, 3: générateurs haute tension; 4, 5: brosses; 6,7:collecteurs; 9, 10: électrodes haute tension (convoyeurs à bande métallique); 11: lit fluidisé.

Le séparateur tribo-aéro-électrostatique breveté par Calin et Dascalescu a la particularité que ses électrodes sont deux convoyeurs à bande métalliques reliés à une alimentation haute tension (figure II.20). La longueur active d'une électrode (à savoir, la distance entre les deux rouleaux de chaque transporteur) est de 500 mm. La distance moyenne entre les électrodes dans la zone du lit fluidisé étant de 20 cm, un champ électrique de 2 kV/cm peut être obtenu avec des électrodes alimentées à ± 20 kV. Les granules chargées dans le lit fluidisé sont attirés par les convoyeurs et plaqués par les forces électriques à la surface des bandes métalliques qui les transportent vers la trémie de collecte. Le débit d'alimentation du séparateur est ajusté à une valeur qui est égale à la somme de la masse des produits collectés par unité de temps.

Comme aucune particule non chargée ne peut quitter la chambre de séparation, la pureté des produits collectés est proche de 100%. D'autre part, chaque particule ne passe dans le séparateur que le temps nécessaire à l'acquisition d'une charge suffisante pour qu'elle soit recueillie au niveau des électrodes. Si l'état de surface des matériaux granulaires et les conditions ambiantes sont adéquats, alors les particules sont rapidement attirées par les électrodes et l'installation peut fonctionner à des vitesses d'alimentation élevées. Dans des conditions défavorables de tribochargement, le débit d'alimentation est réduit de sorte que les particules séjournent plus longtemps dans la zone active du séparateur.

Un autre défi pour la séparation tribo-électrostatique consiste à traiter des mélanges de trois ou plusieurs types de matières plastiques. Une séparation en deux étapes est une solution pour le traitement de mélanges de matières plastiques ternaires. Combinés avec d'autres procédés de

séparation mécanique telle que des techniques de gravimétrie, des mélanges plus complexes peuvent également être traités.

Une autre solution au problème du recyclage des mélanges de ABS / HIPS / PVC est donnée par une nouvelle conception [19,20], qui combine deux techniques de charge et deux procédés de séparation électrostatiques (figure II.20 a). Le premier module de la nouvelle installation est un séparateur électrostatique à lit fluidisé, les deux électrodes sont reliées à deux alimentations haute tension de polarités opposées, qui créent un champ électrique suffisamment fort pour attirer les granules chargés par effet tribo-électrique et les séparer. Deux enceintes de PMMA, avec des parois intérieures en aluminium, transfèrent respectivement les particules chargées positivement et négativement vers deux tribochargeurs statiques inclinés. Ils modifient la charge des granules pour faciliter leur tri. Les granules tombent ensuite librement entre les plaques électrodes des deux séparateurs électrostatiques à chute libre qui effectuent un second tri sélectif des matériaux. Les produits séparés sont récupérés dans deux collecteurs identiques, chacun divisé en quatre compartiments, comme le montre la figure II.20 b.

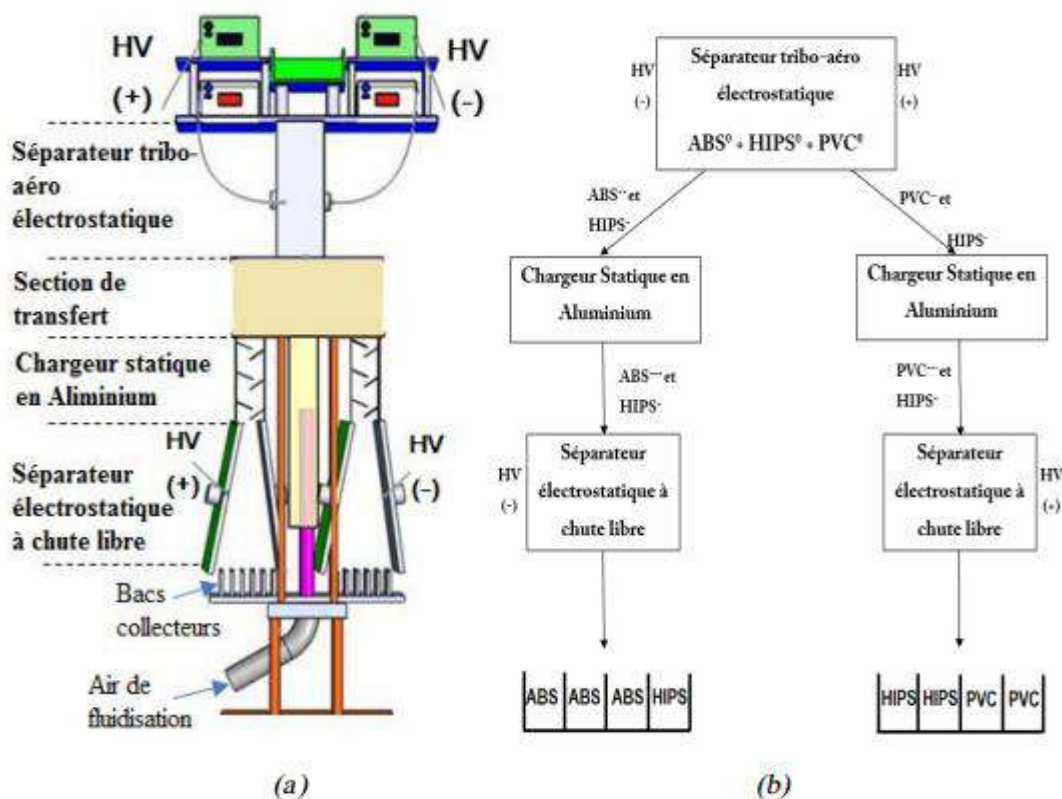


Figure II.20. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux étages (a) et Schéma de séparation ABS/HIPS/PVC (B).

II.3.2. Séparateurs tribo-électrostatique pour les mélanges poudreux

La majorité des séparateurs électrostatiques ont largement prouvé leur efficacité dans le tri sélectif des granules de taille millimétrique provenant de différents déchets. Cependant, ces séparateurs semblent être inappropriés pour le traitement des déchets finement broyés, principalement en raison de la difficulté de contrôler les trajectoires des particules, et les forces qui entrent en considération pour ce type des particules (adhésion, cohésion, agglomération...). Peu de travaux ont été menés dans ce domaine.

II.3.2.1. Séparateur électrostatique à convoyeur

Le séparateur électrostatique à convoyeur (figure II.21), conçu par l'Institut PPRIME, à Angoulême, France, il est capable de trier des matériaux micronisés. Pour cela, un des dispositifs de charge par effet tribo-électrique cités précédemment (lit fluidisé, ventilateur ou Vibro-transporteur, etc.), viendra se positionner en amont du séparateur. Ainsi, après le chargement des particules, celles-ci sont déposées en monocouche sur la surface du convoyeur à bande métallique (1) (longueur : 700 mm ; largeur : 70 mm), qui est connecté à la terre et entraîné en par un moteur (2) lui-même relié à un variateur de vitesse électronique

Même remarque pour (3) et (4) Une électrode cylindrique tournante (3) (acier inoxydable ; diamètre : 30 mm ; longueur : 70 mm) est connectée à un générateur de haute tension (4) réversible (positive ou négative).



Figure II.21. Séparateur électrostatique à tapis roulant.

Une zone de champ électrique intense est créée entre cette électrode et la bande métallique du convoyeur reliée à la terre (figure II.22). L'électrode haute tension attire les particules d'une polarité (produit B) et repousse les particules de polarité opposée (produit A), permettant ainsi la séparation.

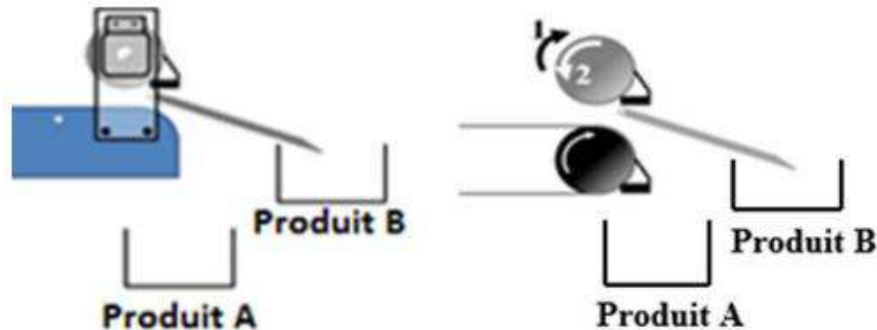


Figure II.22. Schéma descriptif du collecteur de produits.

II.3.2.2. Séparateur tribo-aéro-électrostatique a chute libre

La particularité de séparateur présenté dans la figure II.23 est que les mélanges pulvérulents subissent un chargement triboélectrique dans un tube isolant, grâce à l'injection d'air par une soufflante. Une fois chargées, les particules sortent vers le séparateur à chute libre à travers un clapet commandé.



Figure II.23. Photographie d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique

Le mélange est chargé par la triboélectricité (figure II.24), il tombe ensuite dans un fort champ électrique horizontal produit entre deux électrodes et situé dans une chambre isolante. Les particules chargées sont alors déviées dans leur chute, elles sont attirées par l'électrode du signe opposé à leur charge.

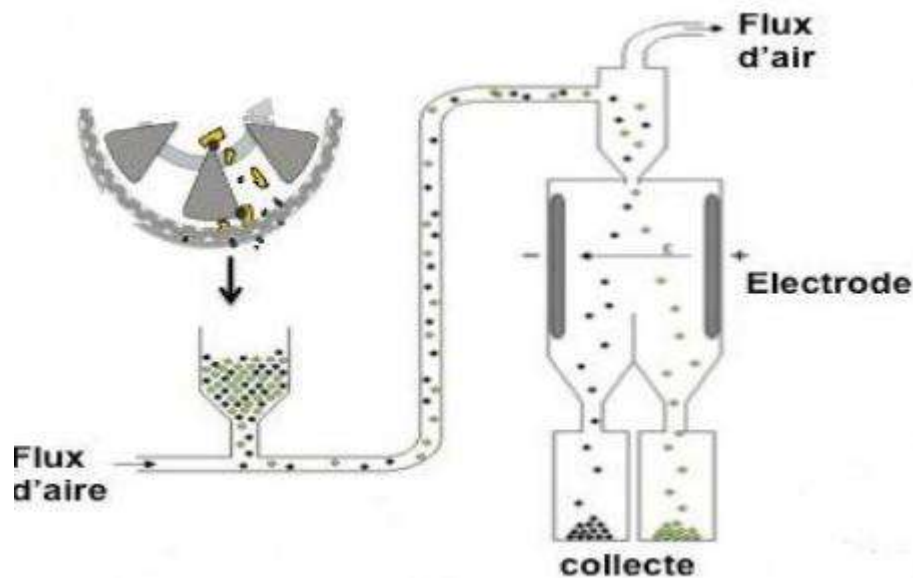


Figure II.24. Schéma descriptif du séparateur électrostatique.

II.3.2.3. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes verticales

Le nouveau séparateur tribo-aéro-électrostatique (figure II.25) est conçu pour le traitement des mélanges de matériaux isolants fins (taille moyenne : 10-100 micromètres). Le dispositif se compose de deux électrodes verticales à plaques de dimensions 20 cm x 30 cm, reliées à deux alimentations haute tension continue de polarités opposées. Les deux électrodes effectuent des mouvements de va-et-vient à l'intérieur du lit fluidisé contenant les matériaux micronisés à séparer. La fluidisation est réalisée par injection d'air en utilisant un souffleur d'air à vitesse variable.

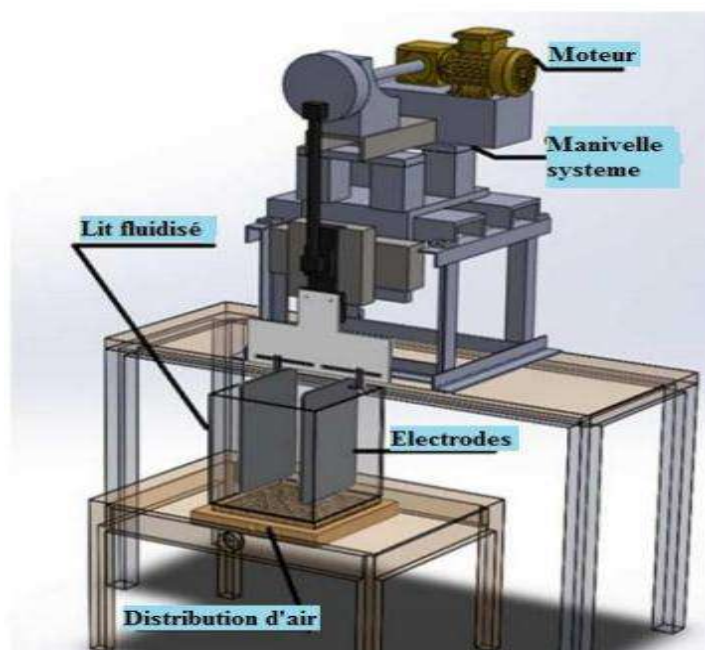


Figure II.25. Séparateur tribo-aéro électrostatique à deux électrodes verticales.

II.3.2.4. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

C'est une installation particulièrement adaptée à la séparation des particules fines de plastique. Deux disques métalliques sont montés sur le même arbre (figure II.26), entraîné par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés par deux sources de haute tension de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques [21, 22].

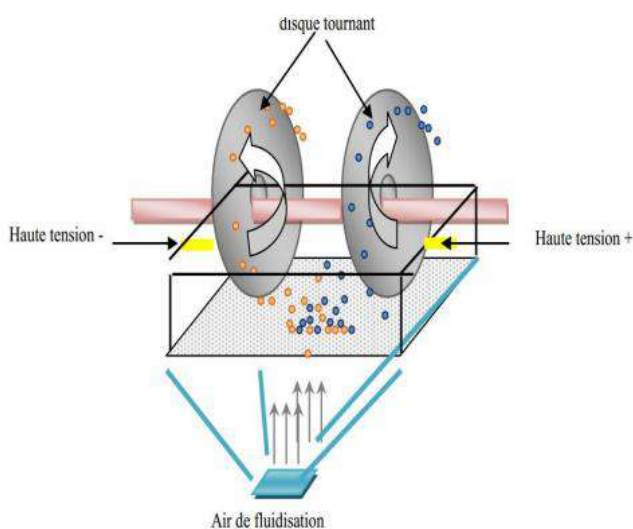


Figure II.26. (a) : photographie et (b) : représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants.

II.3.2.5. Séparateur tribo-aéro-électrostatique a deux électrodes cylindriques

On utilise le séparateur tribo-aéro-électrostatique pour les mélanges de matériaux isolants poudreux, avec une application au recyclage des équipements électriques et électroniques. Les deux électrodes cylindriques rotatives connectées à deux alimentations hautes tensions de polarités opposées sont partiellement immergées dans un lit fluidisé contenant le mélange à séparer. Les variables de contrôle du procédé de séparation sont la haute tension appliquée aux électrodes, la vitesse de rotation de la soufflante de l'air de fluidisation et le débit d'alimentation du séparateur [14].

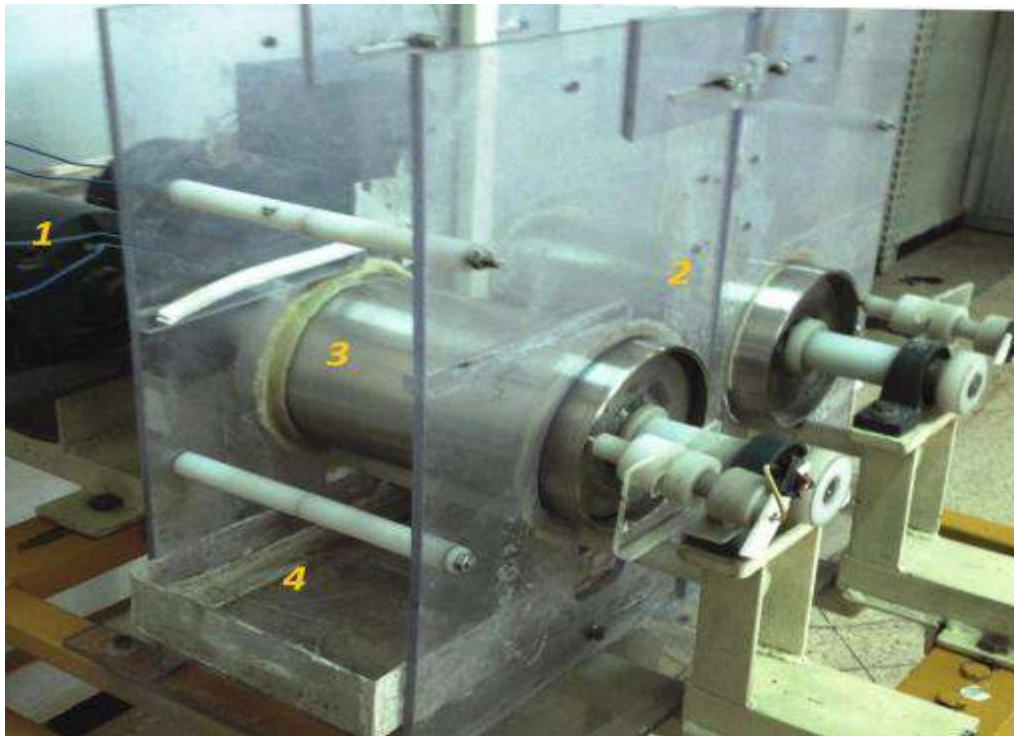


Figure II.27. Photographie du séparateur tribo-aéro-électrostatique à deux électrodes tournantes ; 1 : Moteur CC ; 2 : Chambre de séparation ; 3 : Electrodes cylindriques tournantes ; 4 : Bacs collecteurs.

II.3.2.6. Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont deux bandes transporteuses du tapis roulant, ils sont à base d'une matière conductrice (figure II.28), elles s'appuient à des tambours isolants, leur entraînement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Les particules chargées collent sur la surface des bandes contrairement polarisées, pour être transporté vers la zone de récupération [17].

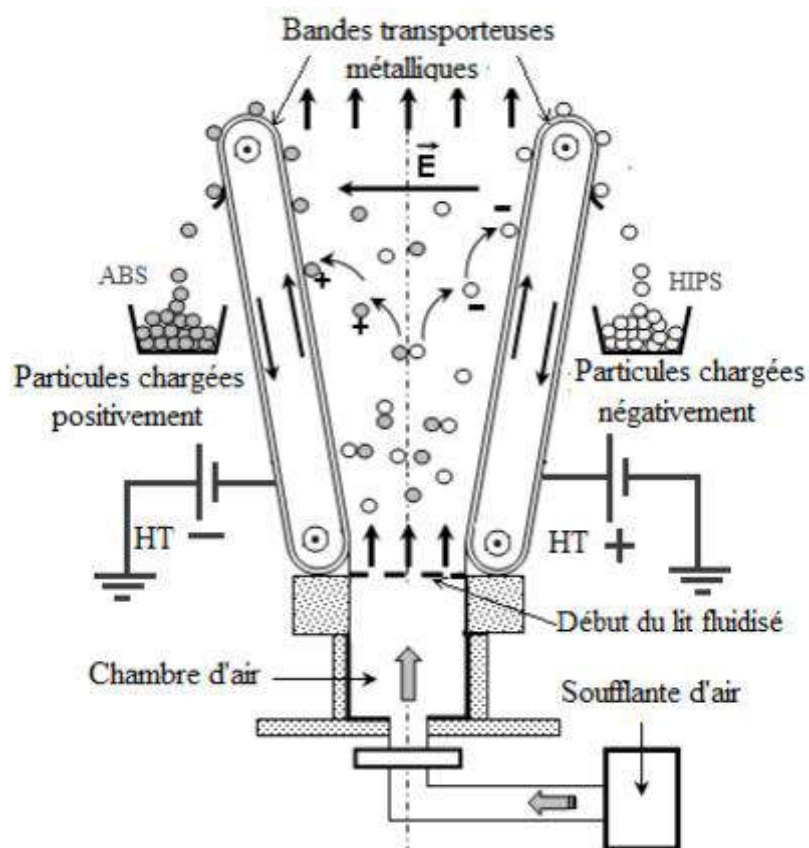


Figure II.28 : Représentation schématique d'un séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une multitude d'installations de séparation tribo-électrostatique à chute libre et tribo-aéro-électrostatique.

Le recyclage est une combinaison de plusieurs processus avec une variété de dispositifs dont la majorité reposent sur le phénomène de la triboélectricité.

La séparation électrostatique reste la méthode la plus efficace qui pourrait être réalisée pour économiser l'énergie et éviter le danger écologique des déchets en plastique.

III.1. Introduction

La séparation électrostatique est une technique non polluante appropriée pour le recyclage des matériaux granulaires plastiques préalablement chargés électriquement. Ce processus nécessite globalement deux étapes : une étape de chargement du mélange granulaire, puis, l'application d'un champ intense afin de séparer les particules selon leur signe de charge grâce à la force électrique.

III.2. Nouveau prototype du séparateur à plan incliné

III.2.1. description

La figure (III.1) représente un nouveau prototype expérimental de séparation électrostatique des matériaux plastiques.

Notre prototype est constitué essentiellement d'une deux électrodes montés sur la surface d'un plan isolant (100 x 50 cm) à inclinaison réglable, chaque électrode se compose d'une partie supérieur fixe (20 cm) et l'autre partie inférieure mobile (80 cm) en faisant varier la distance interelectrode d'une manière symétrique ou asymétrique (figure III.2)

Les parois internes latérales en aluminium des deux électrodes (10 cm) sont connectées à deux alimentations haute tension continu réglable de polarité différentes (figure III.3) en créant un champ électrique suffisant pour attirer les granules chargés.

Les granules chargés se déplacent vers les électrodes de polarités opposées, c-a-d ; les granules chargés positivement sont attirés vers l'électrode négative et les granules chargés négativement sont dirigés vers l'électrode positive, ensuite tombent dans le compartiment approprié du collecteur.

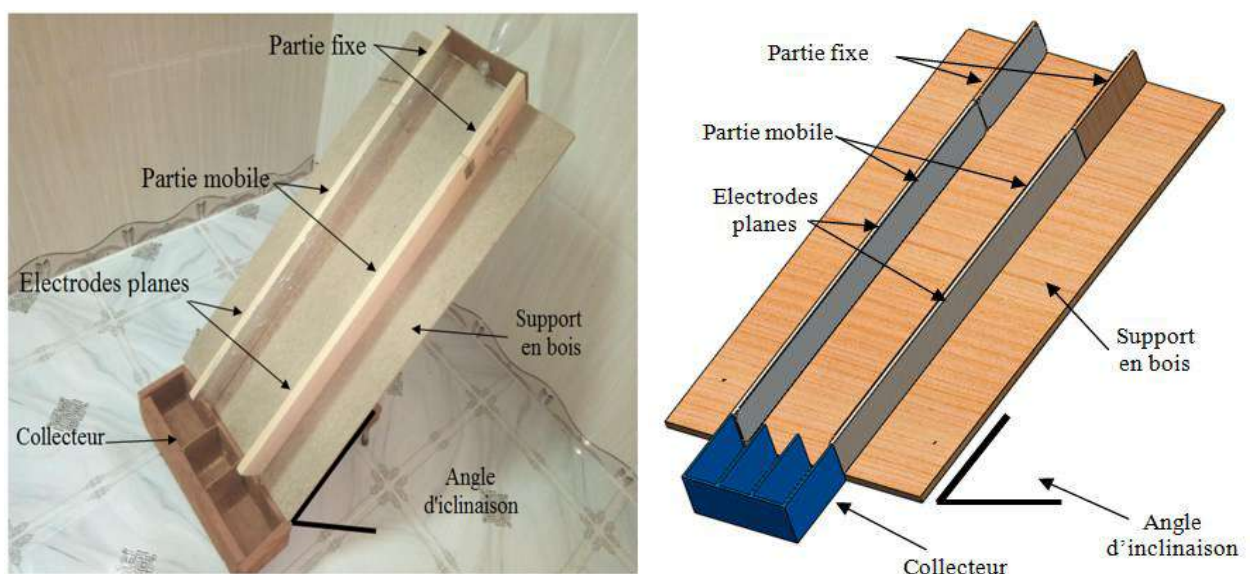


Figure III.1 : Nouveau prototype du séparateur à plan incliné

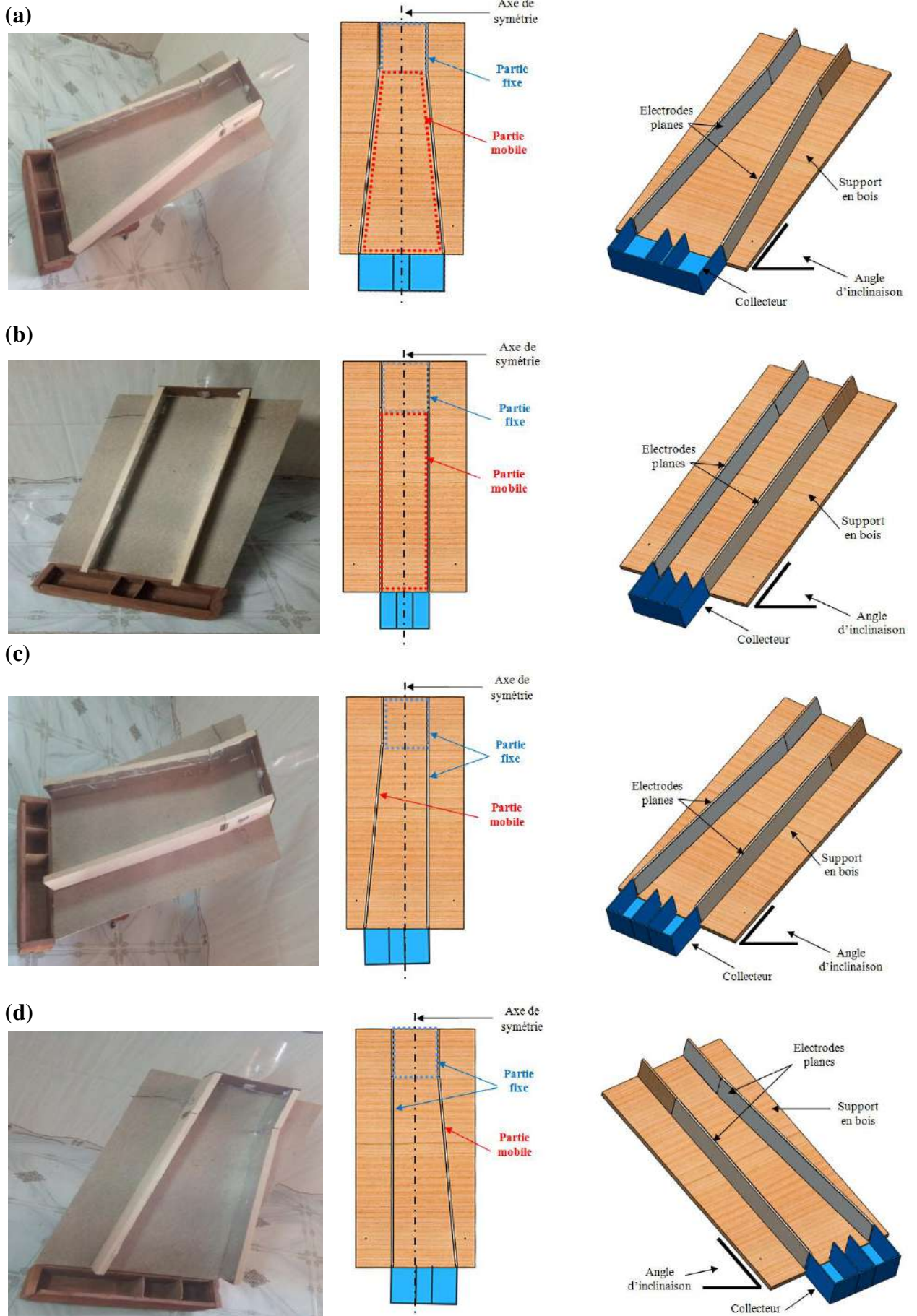


Figure III.2: Différentes configurations interelectrode



(a)



(b)

Figure III.3: Alimentation haute tension continu ; (a) polarité positive, (b) polarité négative

III.2.2. Comparaison des dispositifs

Dans le tableau III.1, nous voulons mentionner les principales différences entre les différents dispositifs du séparateur à plan incliné au laboratoire de génie électrique de Guelma (LGEG), notre nouveau prototype (figure III.1) et les précédents dispositifs (figure III.4) [25,26].



(a)



(b)

Figure III.4: (a) : Séparateur à plan incliné, (b) séparateur à double étage

Tableau III.1: Les principales différences entre les dispositifs

	Nouveau prototype	Séparateur à plan incliné [25]	Séparateur à deux étages [26]
Inter électrode	constante/variable	Constante	Constante
Nombre des électrodes	2	2	4
Angle d'inclinaison	10-90°	25-90°	25-90°
Haute tension DC	+ et -	+ et -	+ et -
Collecteur	1	1	2
Plan incliné	1	1	2

III.2.3. Dispositif de chargement triboélectrique à lit fluidisé

Le chargement triboélectrique des granules se fait dans un dispositif à lit fluidisé, le mélange du plastique est mis à l'intérieur d'une chambre de fluidisation avec des parois transparentes en polyéthylène téréphtalate, où ils subissent un chargement triboélectrique grâce à l'injection d'air par une soufflante (figure III.5), les particules de plastique acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux contacts entre elle à l'intérieur de la chambre.



Figure III.5 : Dispositif de triboélectrisation à lit fluidisé au laboratoire LGEG.

III.3. Procédure expérimentale

La procédure de la séparation électrique comporte deux phases principales : une phase de chargement triboélectrique (I) et une phase de séparation électrostatique (II).

En premier lieu, la charge électrique de mélange granulaire se produit par effet triboélectrique dans un dispositif de chargement à lit fluidisé. Les particules chargées sont versées à l'aide d'un entonnoir en glissant le long d'un plan incliné faisant un angle θ avec l'horizontale (l'angle varie du 10 jusqu'au 90°).

La présence d'un champ électrique intense E permet d'attirer les particules chargées par l'électrode de polarité opposée. Tandis que, les particules faiblement chargées ne sont pas affectées par les forces électrostatiques et tombent sous l'action de la force de la pesanteur vers le collecteur destiné au produit mixte (figure III.6).

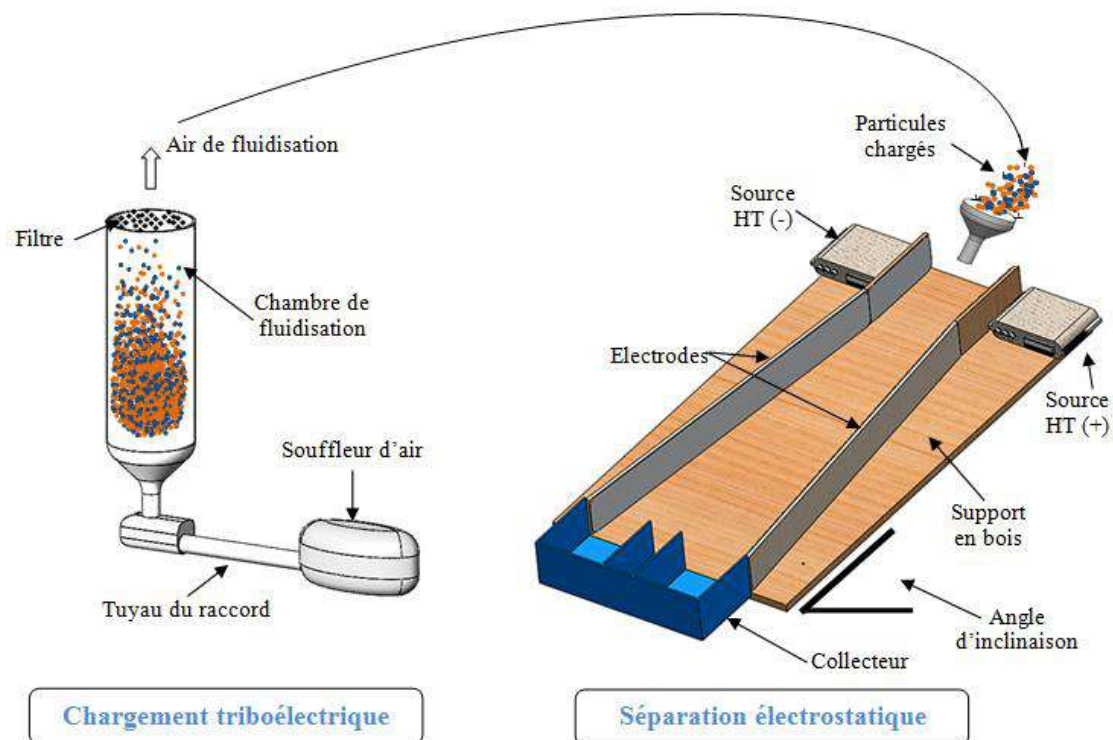


Figure III.6 : Représentation schématique de l'installation expérimentale du processus de séparation électrique

III.3.1. Mesure de la charge triboélectrique

La cage de Faraday est une installation utilisée pour mesurer la charge électrique totale d'un objet en éliminant les nuisances électriques et électromagnétiques extérieures. L'installation est constituée de deux enceintes conductrices concentriques séparées électriquement par un matériau isolant. L'enceinte extérieure est reliée à la terre pour réduire les perturbations extérieures et évacuer les charges électriques indésirables tandis que l'enceinte intérieure dans laquelle le objet est introduit, elle est isolé de la terre et connectée à un électromètre numérique (Keithley ; modèle 6514) qui permet de mesurer la charge électrique.



Figure III.7 : La cage de Faraday reliée avec l'électromètre au laboratoire LGEG

III.3.2. Mesure de la masse granulaire

La mesure de la masse granulaire de chaque échantillon est obligatoire afin d'obtenir des résultats expérimentaux comparables. La figure III.8 illustre la balance électronique qu'on utilise pour peser les échantillons.



Figure III.8 : Balance numérique

III.4. Les matériaux

Le volume des déchets d'équipements électriques, électroniques et informatiques connaît une forte croissance liée à un taux d'équipement de plus en plus élevé et à l'obsolescence due à l'évolution très rapide des performances technologiques. Donc le processus de séparation constitue un objectif majeur des recherches actuelles dans le domaine du recyclage des matériaux plastiques provenant de ce genre des déchets [24].

III.4.1. Acrylonitrile butadiène styrène (ABS)








L'ABS est le plastique le plus utilisé de l'industrie. Il appartient à la famille des thermoplastiques ou plastiques thermiques et possède une base d'élastomères à base du polybutadiène qui le rend plus souple et résistant aux chocs.

La température d'impression d'ABS comprise entre 230°C et 260°C et peut supporter des températures très basses (-20°C) et très élevées (80°C). En plus de sa bonne résistance, ce matériau permet d'obtenir une surface polie, est réutilisable et peut être soudé par procédés chimiques (en utilisant l'acétone). Cependant, il n'est pas biodégradable et rétrécit au contact de l'air, raison pour laquelle le plateau d'impression est chauffé afin d'éviter le décollement des pièces [27].

III.4.2. High Impact Polystyrene (HIPS)

Le High Impact Polystyrene est un polymère thermoplastique basé sur un mélange de polystyrène et de caoutchouc polybutadiène. Le HIPS a des propriétés similaires à celles de l'ABS, mais il est plus dur et plus résistant aux chocs. Le matériau est caractérisé principalement par sa solubilité relativement élevée, ce qui permet une séparation relativement facile lorsqu'il est utilisé comme structure de support. Il est généralement employé comme support pour l'ABS, offrant une stabilité temporaire importante. Sa surface lisse et résistante aux rayures, sa résistance à la chaleur et sa couleur transparente voire blanche (facilitant sa teinture) permettent au HIPS d'être utilisé comme structure de support pour plusieurs applications [28].

Tableau III.2: Taux de présence des matériaux ABS et HIPS dans les équipements électriques et informatiques [24 ,29].

Equipements	Contenus %	
	Plastique	Type de matériaux plastiques
Moniteurs CRT et LCD 	18% CRT 30% LCD	95% ABS ou HIPS
Claviers 	95 %	75% ABS en claviers
Imprimantes jet d'encre 	60 %	90% HIPS en carcasse
Photocopieurs 	30 %	50% ABS 70% HIPS en cartouches
Téléphonie fixe 	70%	L'ABS est la principale résine (90% des plastiques utilisés)
Téléviseurs à tube cathodique 	20%	90% d'HIPS non ignifugé
Téléphonie mobile 	50-60 %	ABS/PC (~30%), le PC et le PMMA (~4% chacun). On trouve des traces d'ABS pur et d'autres plastiques techniques (<< 1%)

III.5. Conclusion

Les séparateurs électrostatique ont toujours besoin de nouvelles technologies, sont plus efficaces et moins coûteux pour obtenir des résultats garantis. Nous avons présenté un nouveau prototype du séparateur à plan incliné avec une distance interelectrode réglable, cette importante amélioration considère comme une solution inévitable pour minimiser la collision entre les particules entre elles ou bien entre les particules et les parois internes latérales des électrodes pendant le processus, ce qui permet d'améliorer de façon importante les résultats de la séparation électrostatique.

Conclusion générale

La grande diversité des constituants des déchets d'équipements électriques et électroniques traités dans les usines de recyclage, impose développement de nouvelles technologies de séparation tribo-électrostatique, aptes à assurer la séparation physique de ceux-ci, dans le but de récupérer de plus pure et la plus rapide.

Ce mémoire évoque un ensemble d'améliorations sur un séparateur électrostatique à plan incliné afin de répondre aux besoins de la recherche scientifique sur le tri des mélanges des matériaux granulaires. Notre contribution consiste à introduire une modification au niveau des électrodes plans en faisant avoir différentes configurations interelectrode dans le but à faciliter le mouvement des particules et réduire les collisions entre elles, ce qui contribue à améliorer le processus de la séparation.

Références bibliographiques

- [1] (<https://eurlex.europa.eu/legalcontent/FR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52018DC0028&from=EN>)
- [2] M. Riess, T. Ernst, R. Popp, B.M Muller, H. Thoma, O. Vierle, M. Wolf, and R. van Eldik, “analysis of flame retarded polymers and recycling materials,” *Chemosphere*, vol. 40, pp. 937-941, May.-Jun. 2000.
- [3] M. Miloudi, L. Dascalescu, L. Jia, K. Medles, and A. Tilmatine, “improved overall performances of a tribo-aero-electrostatic separator for granular plastics from waste electric and electronic equipment”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 4159-4165, 2015.
- [4] W. Aksa, K. Medles, M. Rezoug, R. Ouiddir, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, “modelling and optimization of a separator for granular mixtures of multiple insulating materials.” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 51, pp. 4743-4751. 2015.
- [5] A. Iuga, A. Samuila, R. Morar, M. Bilici, and L. Dascalescu, “tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment,” *Part. Sci. Tech.*, vol. 34, pp. 45-54, 2016.
- [6] Des cours de chimie exclusifs sur www.chimie-sup.fr.
- [7] B. Tabti «Contributions à la caractérisation des filtres à électret par la mesure du déclin de potentiel de surface». Thèse doctorat. Université de Poitiers. Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, décembre 2011.
- [8] S. Jouenne, Thèse de Doctorat ; option chimie et physicochimie des polymères; Université Pierre et Marie Curie, (2005).
- [9] P. Llovera Segovia, « Etude des mécanismes d'injection de charge dans les matériaux isolants au moyen de mesures électrostatiques de déclin et retour de potentiel. Nouveaux outils d'analyse. », Thèse de Doctorat, Université Paris Sud Paris XI, 2001.
- [10] A. SEYNI «Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage » p.15-18 Le 11 Décembre 2008
- [11] F. Moingeon ; « Thèse de Doctorat ; option chimie; Université Louis Pasteur Strasbourg I, (2006) ».
- [12] Z. Xu, L. Zhang, G. Chen, « Measurement and analysis of electric potential decay in corona charged low-density polyethylene films », *International Conference on Solid Dielectrics*, Winchester, UK, July 8-13, 2007.
- [13] Y. Segui « Diélectriques : Courants de conduction », *Techniques de l'Ingénieur*, D 2301, pp.1-12.

- [14] Abdelkader MEKHALEF BENHAFSSA Pour l'obtention du diplôme de :Doctorat 3^{ème} cycle en Électrotechnique Intitulé de thèse : « Etude d'un séparateur tribo-aéroélectrostatique des mélanges des matériaux poudreux »
- [15] C. Dragan, "modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéroélectrostatique des matériaux plastiques granulaires," Thèse Doctorat, Univ. Poitiers, 2010
- [16] L. Calin, and L. Dascalescu, «procédé de séparation électrostatique d'un mélange de granules de matériaux différents et dispositif de mise en œuvre », Brevet FR2943561, Oct.1, 2010.
- [17] M. Miloudi, «application de la charge par effet triboélectrique des matériaux granulaires à la séparation électrostatique», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2012
- [18] L. Calin, L. Caliap, V. Neamtu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila, and L. Dascalescu, "tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation," In: IEEE Transactions on Industries Applications, vol. 44 (4), pp. 1045-1051, 2008.
- [19] W. Akssa, «Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi industriel pour la récupération des particules isolantes», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2014.
- [20] M. Rezoug, «Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électrique dans les particules isolantes», Thèse Doctorat, Univ. SBA, 2015
- [21] A. Tilmatine, A. Benabboun, Y. Brahmi, A. Bendaoud, M. Miloudi, and L. Dascalescu, "experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics," IEEE Trans. Ind. Appl, vol. 50, pp. 4245 – 4250, 2014.
- [22] A. Benabboun, «contribution à l'étude de la séparation des particules fines pour application dans l'industrie de recyclage», Thèse Doctorat, Univ. SBA, juin 2016.
- [23] A. NADJEM "Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques" THÈSE DOCTORAT , Universitaire guelma ,2019.
- [24] M. Remadnia, « Déclin de potentiel sur la surface de matériaux granulaires isolants », Thèse de Doctorat, Université de Guelma, 2012.
- [25] BENSOUILEH Zine eddine, «Etude expérimentale d'un séparateur à plan incliné », Mémoire de Master, Université de Guelma, 2017.
- [26] HANAFI zyneb, ALLEL selam, «Etude expérimentale d'un séparateur incliné à deux étages », Memoire de Master, Université de Guelma, 2019.
- [27] <https://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-abs-pla-polyamides-alumide/>
- [28] <https://www.3dnatives.com/hips-plastique-support-impression-3d-10092020/>
- [29] Rapport final «CHARACTERISATION DES PLASTIQUES CONTENUS DANS LES DEEE ET ETAT DES LIEUX DE LA VALORISATION DE CES PLASTIQUES » Marché ADEME n° 0302C008 , Juillet 2005.

ملخص

غالبا ما يكون تطور التطبيقات الكهروستاتيكية التي تتضمن الشحنات الكهربائية, مثل عملية الفصل الكهروستاتيكي, مصحوبا للحاجة لتطوير المفاصل الكهروستاتيكية من أجل التشغيل السليم لهذه العملية. الهدف من هذه المذكرة هو إنتاج نموذج أولي جديد لفصل المستوى المائل للمساعدة في تحسين عملية الفصل. يتميز التحسين الذي تم إدخاله في الأقطاب الكهربائية بتكوينات مختلفة بين الأقطاب الكهربائية من أجل تسهيل حركة الجسيمات وتقليل الاصطدامات بينها.

Résumé

Le développement d'applications électrostatiques impliquant des charges électriques, comme le processus de séparation électrostatique, s'accompagne souvent de la nécessité de développer des joints électrostatiques pour le bon fonctionnement de ce processus. L'objectif de ce mémoire consiste à réaliser un nouveau prototype du séparateur à plan incliné à fin de contribuer à améliorer le processus de la séparation. L'amélioration introduite au niveau des électrodes comporte différentes configurations interelectrode dans le but à faciliter le mouvement des particules et réduire les collisions entre elles.

Abstract

The development of electrostatic applications involving electrical charges, such as the electrostatic separation process, often comes with the need to develop electrostatic seals for the proper functioning of this process. The objective of this study is to produce a new prototype of the inclined plane separator to help improve the separation process. The improvement introduced in the electrodes features different interelectrode configurations in order to facilitate the movement of particles and reduce collisions between them.