

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 Guelma



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique
Laboratoire de Génie Electrique de Guelma – LGEG

THÈSE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE DOCTORAT

Domaine : **Génie électrique** Filière : **Electrotechnique**
Spécialité : **Techniques de haute tension**

Présentée par

NADJEM Abdelkader

Intitulée

**Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés
électrostatiques**

Soutenue le : 17/12/2018

Devant le Jury composé de :

Mr. LEMZADMI Ahcene	Professeur	Univ. de Guelma	Président
Mr. KACHI Miloud	M.C. classe A	Univ. de Guelma	Encadreur
Mr. DASCALESCU Lucien	Professeur	Univ. de Poitiers	Co-encadreur
Mr. HEROUS Lazhar	Professeur	Univ. d'Annaba	Examineur
Mr. ZOZOU Nouredine	MCF-HDR	Univ. de Poitiers	Examineur
Mr. REMADNIA Mokdad	M.C. classe A	Univ. de Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

-A ma famille-

Remerciements

Tout d'abord louanges et remerciements à **Dieu** pour m'avoir donné le courage et la force de terminer ce modeste travail.

Je tiens à remercier mon directeur de thèse, **M. Miloud KACHI**, pour ses multiples conseils, suggestions et pour toutes les heures qu'il a consacrées à établir cette recherche. J'aimerais également lui dire à quel point j'ai apprécié sa grande générosité, disponibilité et ses qualités d'écoute et de compréhension.

Cela a été un grand privilège pour moi d'avoir coopérer avec Monsieur le Professeur **Lucien DASCALESCU** du laboratoire d'étude aérodynamique IUT d'Angoulême de l'université de Poitier. Je tiens à lui adresser mes chaleureux remerciements pour ses remarques et conseils pertinents.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs **Karim MEDLES** et **Thami ZEGHLOUL** pour toute leur aide, leur précieux conseils et leurs encouragements continus qu'il m'a prodigué durant la réalisation de cette thèse et leur confiance à mon égard.

Je suis reconnaissant à Messieurs: **Marian-Bogdan NEAGOE** et **Gontran RICHARD**, doctorants à l'IUT d'Angoulême, pour leurs aides précieuses à la réalisation des manip.

J'adresse tous mes remerciements à Professeur **Ahcene LEMZADMI** pour avoir accepté de présider mon jury.

Mes remerciements vont également à Messieurs : **Lazhar HEROUS**, **Noureddine ZOZOU** et **Mokdad REMADNIA** qui m'ont fait l'honneur d'examiner, évaluer et juger cette thèse.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres de **l'Institut PPRIME**, de **l'IUT d'Angoulême**, de **l'Université de Sidi-Bel-Abbès** et de **l'Université de Guelma**, qui ont été proches de moi ces trois dernières années.

ملخص

غالباً ما يكون تطور التطبيقات الإلتروستاتيكية التي تتضمن الشحنات الكهربائية، مثل عملية الفصل الإلتروستاتيكي، مصحوباً بالحاجة لتطوير طرق الشحن الكهربائية للتحكم في مستوى الشحنات المتراكمة على أسطح المواد العازلة و تعزيزها من أجل التشغيل السليم لهذه العملية. الهدف من هذا العمل هو المساهمة في تحسين الشحن الكهربائي للمواد الحبيبية البلاستيكية باستخدام تقنية المعالجة السطحية بواسطة تفريغ حاجز العزل في الظروف الجوية. تم تخصيص الجزء الأول من هذا العمل لدراسة تأثير العديد من العوامل الكهربائية والهندسية لتفريغ حاجز العزل على خصائص التفريغ، وبالتالي، على تعديل سطح المواد الحبيبية البلاستيكية وسلوكها التريبولكتريكي. في تجاربنا، حصلت الجسيمات المعالجة بالتفريغ على شحنة كهربائية عالية وحصلنا على نتائج مرضية. كما حددت دراسة عوامل التفريغ القيم المثلى لتحسين الشحنة المكتسبة، ويمكن أن يؤدي تنسيق جميع هذه العوامل إلى نتائج أفضل. كما أظهرت الدراسة التجريبية أهمية استخدام المعالجة السطحية للجسيمات قبل شحنها لتحسين نتائج الفصل الكهربائي لمزيج مركب من نوعين من المواد العازلة من خلال تقييم معدلات الإسترجاع ونقاء المنتجات المنفصلة. قدمنا أيضاً دراسة تجريبية لفواصل كهروستاتيكي من أجل المساهمة في تحسين فاصل سقوط حر وبالتالي لإثبات فعالية النموذج الأولي المقترح. تظهر النتائج فعالية وأهمية إدخال المستوي المائل ودوره في تحسين معدل إسترجاع المنتجات المنفصلة. تم الحصول على معدلات إسترجاع عالية جداً.

Résumé

Le développement des applications électrostatiques impliquant les charges électriques, comme le processus de séparation électrostatique, est souvent accompagné par le besoin de développer les méthodes de chargement triboélectrique afin de contrôler et favoriser le niveau des charges accumulées sur les surfaces des matériaux isolants pour le bon fonctionnement de ce processus. L'objectif de ce travail est de contribuer à améliorer le chargement triboélectrique des matériaux granulaires plastiques en utilisant la technique de traitement de surface par la décharge à barrière diélectrique (DBD) dans des conditions atmosphériques. La première partie de ce travail a été consacrée à l'étude de l'effet de plusieurs facteurs électriques et géométriques de la DBD sur les caractéristiques de décharge et, par conséquent, la modification de surfaces des matériaux granulaires plastiques et leur comportement triboélectrique. Au cours de nos expériences, les particules traitées par la DBD ont acquis une charge électrique élevée et nous avons obtenu des résultats satisfaisants. L'étude de ces facteurs de DBD a également permis de déterminer les valeurs optimales pour améliorer la charge acquise et la coordination de tous ces facteurs peut produire de meilleurs résultats. L'étude expérimentale a également permis de démontrer l'importance de l'utilisation du traitement de surface des particules avant leur chargement pour améliorer les résultats de séparation d'un mélange composite de deux types de matériaux, par l'évaluation des taux de récupération et de pureté des produits séparés. Nous avons aussi présenté l'étude expérimentale d'un séparateur électrostatique dans le but de contribuer à l'amélioration du séparateur à chute libre et ainsi de prouver l'efficacité du prototype proposé. Les résultats montrent l'efficacité et l'importance d'introduire un plan incliné et son rôle à l'amélioration du taux de récupération des produits séparés. Des taux de récupérations très élevés ont été obtenus.

Abstract

The development of electrostatic applications involving electrical charges, such as the electrostatic separation process, is often accompanied by the need to develop triboelectric charging methods to control and promote the level of charges accumulated on the surfaces of insulating materials for the proper functioning of this process. The objective of this work is to contribute in improving the triboelectric charging of plastic granular materials using the surface treatment technique by dielectric barrier discharge (DBD) under atmospheric conditions. The first part of this work was devoted to the study of the effect of several electrical and geometrical factors of DBD on the discharge characteristics and, therefore, the surface modification of plastic granular materials and their triboelectric behavior. During our experiments, the DBD-treated particles acquired a high electrical charge and we obtained satisfactory results. The study of these DBD factors has also determined the optimal values to improve the acquired charge and the coordination of all these factors can produce better results. The experimental study also demonstrated the importance of using surface treatment of particles prior their charging to improve the separation results of a composite mixture of two types of materials by evaluating recovery rates and purity of the separated products. We also presented the experimental study of an electrostatic separator in order to contribute to the improvement of the free-fall separator and thus to prove the effectiveness of the proposed prototype. The results show the effectiveness and the importance of introducing an inclined plane and its role in improving the recovery rate of separated products. Very high recovery rates were obtained.

Liste des publications

Articles parus dans des Revues Internationales

- **A. Nadjem**, M. Kachi, L. Dascalescu, K. Medles, T. Zeghloul, “Influence of the geometrical parameters of a dielectric barrier discharge reactor on the subsequent tribocharging of granular polymers”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 95, pp. 24–31, 2018.
- M. Kachi, **A. Nadjem**, A. Moussaoui, L. Dascalescu, N. Zouzou, “Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode”, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, Issue 2, pp. 390–395, 2018.
- **A. Nadjem**, M. Kachi, F. Bekkara, T. Zeghloul, L. Dascalescu, K. Medles, “Triboelectrification of Granular Insulating Materials as Affected by Dielectric Barrier Discharge (DBD) Treatment”, *Journal of Electrostatics*, Vol. 86, pp. 18–23, 2017.

Communications Internationales

- **A. Nadjem**, M. Kachi, K. Rouagdia, M. Remadnia, “Experimental Study of an Inclined-Plane Electrostatic Separator”, *The 3rd International Symposium on Materials and Sustainable Development (ISMSD)*, University M'hamed Bougara, 07-08 November, Boumerdes, Algeria, 2017.
- M. Remadnia, K. Rouagdia, M. Kachi, **A. Nadjem**, “Electrostatic Characterization of Cereal Grains”, *The 5th International Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, University of Boumerdes, 29-31 October Boumerdes, Algeria, 2017.
- G. Richard, **A. Nadjem**, K. Medles, M. Kachi, T. Zeghloul, L. Dascalescu1, “Tribocharging of PP Granules after exposure to a Dielectric Barrier Discharge (DBD). Effect of Exposure Duration, Voltage Amplitude and Frequency”, *Meeting of the Electrostatics Society of America (ESA)*, University of Ottawa, 13-15 June Ottawa-Canada, 2017.
- M. Kachi, **A. Nadjem**, A. Moussaoui, N. Zouzou, L. Dascalescu, “Corona discharge as affected by the presence of various dielectric materials on the surface of a grounded electrode”, *10^{ème} Conférence de la société française d'électrostatique (SFE)*, Université de Poitiers, 29-31 Août, Poitiers, France, 2016.

Communications Nationales

- M. Kachi, A. Moussaoui, **A. Nadjem**, “Neutralization of Charged Granular Insulating Materials Using DC Corona Discharge”, *10^{ème} Conférence Nationale sur la Haute Tension (CNHT)*, Université de Sciences et Technologies, Houari Boumediene (USTHB), 24-26 May, Alger, Algérie, 2016.

Chapitres de Livres

- **A. Nadjem**, M. Kachi, K. Rouagdia, M. Remadnia, “Experimental Study of an Inclined-Plane Electrostatic Separator”, *The 3rd International Symposium on Materials and Sustainable Development (ISMSD)*, Springer, pp. 439-450, 2018.

Table des matières

Introduction générale	16
Chapitre I État de l'art	21
I.1 Etat de charge des matériaux isolants	21
I.1.1 Chargement par effet couronne.....	22
I.1.1.1 Décharge couronne positive.....	22
I.1.1.2 Décharge couronne négative.....	23
I.1.1.3 Décharge couronne alternative	24
I.1.2 Chargement par effet triboélectrique	25
I.1.2.1 Modèle capacitif de la charge triboélectrique	25
I.1.2.2 Série triboélectrique	26
I.1.2.3 Mécanismes de chargement triboélectrique des isolants	27
I.1.3 Dispositifs de chargement triboélectrique	32
I.1.3.1 Dispositif de charge à cylindre rotatif.....	33
I.1.3.2 Dispositif de charge à lit fluidisé	33
I.1.3.3 Dispositif de chargement statique.....	35
I.1.3.4 Dispositif de chargement par cyclone.....	36
I.1.3.5 Dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique	36
I.1.3.6 Dispositif de chargement à vibration verticale	37
I.1.4 Facteurs influençant le processus de chargement triboélectrique	37
I.1.4.1 La taille et la forme	37
I.1.4.2 La rugosité de surface	38
I.1.4.3 La durée du contact.....	38
I.1.4.4 L'humidité relative	39
I.2 Procédés électrostatiques (la séparation électrostatique et le procédé plasma).....	39
I.2.1 Séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires isolants	39
I.2.1.1 Installations de séparation électrostatique.....	41
I.2.1.2 Performances des séparateurs électrostatiques	45
I.2.2 Décharges à barrières diélectriques	46
I.2.2.1 Un peu d'histoire	46
I.2.2.2 Principe de fonctionnement des DBD.....	47
I.2.2.3 Configurations d'électrodes	49

I.2.2.4 Régimes de décharge et propriétés électriques	50
I.2.3 Procédés plasma pour le traitement de surface des polymères	53
I.2.3.1 Traitement de surface par les plasmas froids	54
I.2.3.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation des plasmas froids	55
I.2.3.3 Interactions plasma-surface et modifications de surface de polymère.....	55
I.3 Conclusions.....	58
Chapitre II Installations et méthodes expérimentales.....	60
II.1 Matériaux granulaires isolants.....	60
II.1.1 Matériaux fournies par la société APR2.....	60
II.1.2 Matériaux fournies par la société RECYMAP	63
II.2 Installations de laboratoire.....	63
II.2.1 Dispositif de traitement de surface par le plasma.....	64
II.2.1.1 Dispositif de décharge couronne	64
II.2.1.2 Dispositif de décharge à barrière diélectrique	65
II.2.2 Dispositifs de charge triboélectrique	65
II.2.2.1 Dispositif de chargement par vibrations.....	66
II.2.2.2 Dispositif de chargement à lit fluidisé.....	67
II.2.3 Séparateurs électrostatiques.....	67
II.2.3.1 Description du séparateur triboélectrostatique à chute libre.....	68
II.2.3.2 Description du séparateur triboélectrostatique à plan incliné.....	69
II.2.4 Instrumentation pour la neutralisation de la charge résiduelle	71
II.3 Techniques de mesure et procédures expérimentales	72
II.3.1 Mesure de la température et de l'humidité relative	72
II.3.2 Mesure de la masse.....	72
II.3.3 Mesure de la charge.....	73
II.4 Reproductibilité des mesures.....	74
II.5 Conclusions.....	74
Chapitre III Action de la décharge à barrière diélectrique sur le chargement triboélectrique ..	76
III.1 Installation de traitement de surface par DBD	76
III.2 Procédure de déroulement des expériences	79
III.3 Effet des paramètres électriques	80
III.3.1 Effet du temps de traitement	81
III.3.2 Effet du type de signal.....	83
III.3.3 Effet de la tension	85

III.3.4 Effet de la fréquence	89
III.4 Effet des paramètres géométriques.....	93
III.4.1 Effet du gap d'air	93
III.4.2 Effet du nombre des couches	95
III.4.3 Effet du type de diélectrique constituant la barrière	98
III.4.4 Effet de la position du diélectrique	101
III.5 Conclusions	105
Chapitre IV Application sur la séparation électrostatique des isolants	108
IV.1 Installation expérimentale	108
IV.2 Procédure expérimentale.....	108
IV.2.1 Chargement triboélectrique des particules traitées par la DBD.....	108
IV.2.2 Séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires traités par la DBD	110
IV.3 Résultats et discussion.....	110
IV.3.1 Influence de la décharge à barrière diélectrique sur le chargement triboélectrique.....	111
IV.3.2 Performances du séparateur avec des particules traitées.....	114
IV.4 Conclusions	118
Chapitre V Etude expérimentale d'un séparateur à plan incliné	120
V.1 Mode de fonctionnement du séparateur à plan incliné	120
V.1.1 Forces exercées sur les particules.....	121
V.2 Application de la séparation électrostatique.....	122
V.2.1 Procédure et configuration expérimentale.....	122
V.2.2 Résultats du séparateur à plan incliné	124
V.2.2.1 Influence de la haute tension.....	126
V.2.2.2 Influence de l'angle d'inclinaison	128
V.3 Conclusions	131
Conclusion générale	133
Bibliographie.....	136

Liste des figures.

<i>Figure I.1 : Décharge couronne dans une configuration pointe plan</i>	22
<i>Figure I.2 : Description de la décharge couronne positive</i>	23
<i>Figure I.3 : Description de la décharge couronne négative</i>	24
<i>Figure I.4 : L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique</i>	25
<i>Figure I.5 : Schéma du modèle de condensateur du chargement par contact</i>	26
<i>Figure I.6 : Modélisation des niveaux superficiels des polymères en triboélectrisation</i>	28
<i>Figure I.7 : Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux polymères de différentes matières par la théorie des niveaux superficiels de haute densité</i>	29
<i>Figure I.8 : Mécanismes possibles de transfert de charge</i>	32
<i>Figure I.9 : Dispositif de tribochargement à cylindre rotatif</i>	33
<i>Figure I.10 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation</i>	34
<i>Figure I.11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique</i>	35
<i>Figure I.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone</i>	36
<i>Figure I.13 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-statique</i>	36
<i>Figure I.14 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par vibration</i>	37
<i>Figure I.15 : Organigramme de la séparation triboélectrostatique pour les déchets plastiques</i>	40
<i>Figure I.16 : Séparateur triboélectrostatique à chute libre</i>	42
<i>Figure I.17 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses</i>	43
<i>Figure I.18 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant</i>	44
<i>Figure I.19 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales</i>	45
<i>Figure I.20 : Tube à décharge d'ozone de W. Siemens, 1857</i>	46
<i>Figure I.21 : Configuration classique d'une DBD de volume</i>	47
<i>Figure I.22 : Principe de fonctionnement d'une décharge à barrière diélectrique (DBD)</i>	48
<i>Figure I.23 : Différentes configurations géométriques propices à la formation des décharges contrôlées par barrières diélectriques (DBD)</i>	49
<i>Figure I.24 : Différents régimes des DBD de volume à pression atmosphérique</i>	50
<i>Figure I.25 : Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale ($V = 13 \text{ kV}$, $f = 10 \text{ kHz}$)</i>	51
<i>Figure I.26 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Glow à 10 kHz</i>	52
<i>Figure I.27 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Townsend</i>	53
<i>Figure I.28 : Schéma montre les différentes interactions plasma-surface</i>	56
<i>Figure II.1 : Aspect des matériaux granulaires fournis par la société APR2</i>	62
<i>Figure II.2 : Aspect des matériaux granulaires fournis par la société RECYMAP</i>	63

Figure II.3 : Dispositif expérimental pour le traitement de surface des matériaux isolants par la décharge couronne: configuration fil – plan.....	64
Figure II.4 : Système de génération du plasma de DBD dans une configuration plan-plan	65
Figure II.5 : Dispositif expérimental de chargement triboélectrique par vibrations « Tamiseuse » ...	66
Figure II.6 : Dispositif expérimental de chargement à lit fluidisé	67
Figure II.7 : Photographie de séparateur triboélectrostatique à chute libre développé au sein du Laboratoire d'Électrostatique Appliquée (IUT d'Angoulême de l'Institut Pprime, Université de Poitiers. France.) pour l'étude de la séparation des matériaux plastiques granulaires	68
Figure II.8 : Représentation schématique du séparateur électrostatique à chute libre	69
Figure II.9 : Schéma de l'installation expérimentale de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants installée au laboratoire LGEG de l'université de Guelma (Algérie)	70
Figure II.10 : Photographie du séparateur à plan incliné	71
Figure II.11 : Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle	71
Figure II.12 : Hygromètre numérique modèle testo 608-H1.....	72
Figure II.13 : Balance numérique	73
Figure II.14 : Le Seau de Faraday.....	73
Figure II.15 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514.....	74
Figure III.1 : Schéma global du montage expérimental utilisé pour le traitement de surfaces des particules isolantes par la DBD.....	77
Figure III.2 : Photographie de l'installation de traitement de surface par la DBD.	78
Figure III.3 : Pilotage de l'amplificateur haute tension	78
Figure III.4 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction du temps de traitement de la DBD alternative : (a) PVC;(b) PP. Conditions expérimentales : $T = 14,9\text{ C}^\circ$; $HR = 36,6\%$	82
Figure III.5 : Le courant de décharge pour différentes formes d'onde du signal, (a) carré, (b) sinusoïdal et (c) signal triangulaire. $U_{app} = 24\text{ kV}$; $f = 400\text{ Hz}$	83
Figure III.6 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées en fonction du type de signal de la DBD: (a) PVC;(b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,4\text{ C}^\circ$; $HR = 38,3\%$	85
Figure III.7 : Les formes d'onde du courant de décharge pour différentes amplitude de tension appliquée variant de 15 kV à 27 kV. Signal carré; $f = 400\text{ Hz}$	86
Figure III.8 : Photographie du gap d'air de DBD pour diverses amplitudes de tension appliquée. Conditions expérimentales : Signal carré; $f = 400\text{ Hz}$	87
Figure III.9 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction de la tension de la DBD alternative : (a) PVC;(b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,2\text{ C}^\circ$; $HR = 39,8\%$	88
Figure III.10 : Les formes d'onde du courant de décharge pour différentes fréquences de tension appliquée variant de 200 Hz à 1000 Hz. Signal carré; $U_{app} = 24\text{ kV}$	90
Figure III.11 : Photographie du gap d'air de DBD pour diverses fréquences. Conditions expérimentales : Signal carré; $V = 24\text{ kV}$	91

Figure III.12 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction de la fréquence de la DBD alternative : (a) PVC ; (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,9\text{ C}^\circ$; $HR = 33,4\%$	92
Figure III.13 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction de la longueur du gap d'air : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 18,5\text{ C}^\circ$; $HR = 45,7\%$	94
Figure III.14 : Les formes d'onde du courant pour différentes nombre de couches granulaires. (a) : monocouche, (b) double couche, (c) triple couche. Gap d'air = 4 mm.	95
Figure III.15 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction du nombre de couches granulaires : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,7\text{ C}^\circ$; $HR = 33,1\%$	96
Figure III.16 : Taux de variation de charge en fonction du nombre de couches.....	98
Figure III.17 : Les formes d'onde de tension et du courant de décharge pour différentes barrières. (a) : Verre, (b) : PVC, (c) : ABS, (d) : PE, (e) : PP.	99
Figure III.18 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction du type de barrière : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,9\text{ C}^\circ$; $HR = 41,8\%$	101
Figure III.19 : Les trois arrangements de barrière : (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre.	101
Figure III.20 : Les formes d'onde du courant pour les trois positions. (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre. (Voir Figure III.19).....	102
Figure III.21 : Photographies d'émission de lumière de DBD dans un entrefer de 4 mm pour différents arrangements de barrières, (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre.	103
Figure III.22 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction de la position des barrières (voir figure III.19) : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 16,2\text{ C}^\circ$; $HR = 45,8\%$	105
Figure IV.1 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires traités par la DBD.....	109
Figure IV.2 : Oscillogramme tension – courant d'une DBD. Conditions : Signal : Carré, Tension = 30 kV, Fréquence = 800 Hz.....	111
Figure IV.3 : Charge triboélectrique des particules traitées et non traitées par la DBD: (a) PVC; (b) PP.	112
Figure IV.4 : Taux de variation de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD. ...	114
Figure IV.5 : Rapport charge/masse des produits séparés.	114
Figure IV.6 : La masse granulaire du PVC, PP et le produit mixte obtenus après la séparation électrostatique à partir de mélanges granulaires traités et non traités pour différents temps.	115
Figure IV.7 : Composition du produit mixte obtenu après la séparation électrostatique à partir de mélanges granulaires non traités et traités pour différents temps.	116

Figure IV.8 : Forme et taille des particules de plastique de PVC et PP.....	117
Figure V.1 : Représentation schématique des forces agissent sur une particule glisse dans un champ électrique.....	121
Figure V.2 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation en utilisant le séparateur à plan incliné.	123
Figure V.3 : Types de collisions à l'intérieur de la chambre de fluidisation.....	124
Figure V.4 : Série triboélectrique de matériaux isolants utilisés.	125
Figure V.5 : Photographie des deux produits séparés et le produit mixte dans les trois compartiments du collecteur.	125
Figure V.6 : Taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de la haute tension appliquée : (a) $\theta= 25^\circ$; (b) $\theta= 90^\circ$	126
Figure V.7 : Taux de pureté des produits obtenus après la séparation en fonction de la haute tension appliquée : (a) $\theta= 25^\circ$; (b) $\theta= 90^\circ$	127
Figure V.8 : Taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.	128
Figure V.9 : Variation du taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.	129
Figure V.10 : Taux de pureté des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.	130

Liste des tableaux.

Tableau I.1 : Différentes séries triboélectriques de plastiques issues de la littérature.....	27
Tableau I.2 : Ordres de grandeurs des caractéristiques d'un canal de décharge filamentaire.....	51
Tableau II.1 : Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés.....	62
Tableau II.2 : Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés.....	63
Tableau III.1 : Caractéristiques des matériaux diélectriques utilisés dans les expériences.....	100
Tableau IV.1 : Taux de récupération des deux produits récupérés (PVC et PP) en fonction de la durée de DBD.....	115
Tableau IV.2 : Taux de pureté des deux produits récupérés (PVC et PP) en fonction de la durée de DBD.....	117

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Le développement rapide de la technologie de l'information est principalement axé sur l'élargissement des fonctionnalités et des capacités des équipements électriques et électroniques (EEE). Ce développement s'est accompagné par une forte consommation et un usage excessif de ces équipements entraînant, en conséquence, une quantité importante de d'équipements usés. Ces dernières décennies, les équipements usés (brisés ou obsolètes), tels que les ordinateurs, les téléphones mobiles, les imprimantes, les télévisions...etc., sont devenus une source de plus en plus importante de déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Ils se composent de substances qui peuvent poser des risques nocifs pour la santé humaine et contribuer à des impacts néfastes sur l'environnement. Au milieu de cette terrible croissance de ces équipements et au regard de tous leurs effets néfastes, le recyclage des DEEE est devenu un enjeu majeur pour soutenir la mise en œuvre des innovations dans une vision globale du développement durable. Actuellement, le recyclage des déchets permet de réduire les opérations d'extraction de matières premières et limiter les risques de pollution de l'air et des sols, en plus des avantages économiques et sociaux qu'il peut procurer.

Les phénomènes électrostatiques liés à la charge triboélectrique jouent souvent un rôle important dans nombreux processus industriels impliquant le transport, le stockage, le tri et l'écoulement des matériaux isolants en forme de granules. Ces phénomènes peuvent causer des problèmes allant d'un simple désagrément causé par un choc électrostatique jusqu'au risque d'incendie. Cependant, la mise à profit de la charge électrostatique a permis le développement d'applications fort intéressantes à l'instar du filtrage de l'air et la séparation électrostatique des matériaux. La séparation électrostatique est considérée comme l'une des techniques appropriées pour le recyclage des matériaux granulaires plastiques. Le principe de fonctionnement de ce type de séparateurs consiste à charger les particules du mélange par effet triboélectrique à l'aide d'un dispositif de chargement qui seront par la suite soumises à un champ intense où, grâce à l'action combinée des forces électriques et mécaniques, les particules chargées positivement sont attirées par une électrode négative et celle chargés

négativement sont attirées par l'électrode positive. Entre les deux électrodes, l'interaction entre le champ électrique et la charge des particules est à l'origine de phénomènes physiques très complexes. En effet, la charge triboélectrique portée par les granules devrait être élevée afin que les forces électrostatiques de Coulomb puissent surmonter les forces mécaniques et gravitationnelles et par conséquent mieux séparer les constituants du mélange.

De ce fait, le contrôle du niveau des charges triboélectriques des particules est l'une des étapes les plus importantes pour améliorer les résultats de cette technique. Les études précédentes réalisées sur les séparateurs électrostatiques ont déjà essayé d'améliorer les dispositifs de chargement triboélectrique et les installations de séparation afin d'optimiser leur fonctionnement. Les solutions proposées consistent en majorité en l'augmentation du temps de chargement et la vitesse de l'air dans le cas de dispositifs à lits fluidisés, et d'appliquer des tensions très élevées aux électrodes du séparateur. Cependant, les possibilités offertes par l'ajustement de ces paramètres sont limitées: un temps de chargement trop long réduirait les quantités horaires des matériaux traités. D'autre part, une vitesse d'air et une tension trop élevées augmenteraient la consommation d'énergie à des niveaux insupportables pour l'application industrielle. De là donc s'est imposé la recherche d'une technique qui permettrait l'amélioration de la charge triboélectrique indépendamment des autres paramètres du séparateur. S'inspirant du traitement de surface par plasma afin d'améliorer le collage des matériaux nous a ouvert la voie vers l'application des décharges pour le contrôle et l'amélioration triboélectrique grâce à ses pouvoirs de modifier l'état de surface de polymères.

La décharge à barrière diélectrique (DBD) dans l'air atmosphérique, utilisée durant notre travail en tant que source de plasma, est considérée comme l'une des méthodes les plus utilisées dans les applications industrielles à grande échelle pour la génération d'ozone mais aussi dans de nombreux processus industriels tels que les applications biomédicales, les écrans plasma et le traitement de surface des polymères.

Le traitement par la DBD à la pression atmosphérique permet de créer des groupements favorisant la mouillabilité et induit probablement un changement de la rugosité de surface suite à l'ablation de certaines espèces. Avec un traitement de surface par le plasma, il est possible de rendre la surface plus inerte chimiquement, d'augmenter l'hydrophobicité ou l'hydrophilicité, d'augmenter l'énergie de surface et de modifier la morphologie de la surface. Donc, les matériaux ayant subi un traitement plasma suite à une décharge DBD peuvent voir leur caractéristique changer et par voie de conséquence affecter le tribochargement de ces matériaux.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'effet du traitement de surface par la DBD sur le comportement triboélectrique des matériaux granulaires isolants. Les conséquences du traitement ont été testées directement sur la séparation électrostatique des matériaux plastiques. Durant les travaux de cette thèse, l'effet des paramètres électriques et géométriques de la DBD sur la charge triboélectrique et l'efficacité du séparateur a été étudié. Au cours de ces études une configuration inclinée d'un séparateur à chute libre a été également étudiée.

Cette thèse est répartie en cinq chapitres présentés comme suit :

Le **premier chapitre** est tout d'abord consacré à la présentation de quelques notions sur la technique de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants et les différents mécanismes de transfert de charge, de même que les différentes techniques et installations de séparation électrostatique. Par ailleurs, quelques éléments théoriques généraux sur les plasmas et les décharges électriques dans les gaz sont également présentés concernant, notamment, l'efficacité de la DBD sur la modification des propriétés de surface des polymères.

Les différents matériaux et les dispositifs qui font l'objet de l'étude, ainsi que les méthodes expérimentales et les techniques de mesures employées, sont décrits dans le **deuxième chapitre**. Il s'agit des matériaux granulaires isolants provenant de la société *APR2* (PVC, PP, PA et PC) et des déchets fournis par la société française *RECYMAP* (PVC et PP).

À l'aide du traitement de surface de particules isolantes par la DBD, il a été possible d'évaluer dans le **troisième chapitre** les effets de plusieurs facteurs électriques et géométriques de DBD qui pourraient influencer l'efficacité du processus de chargement triboélectrique. Les résultats des études montrent que le traitement de surface par la DBD peut être utilisé pour améliorer la charge produite par effet triboélectrique d'une manière optimale.

Dans le **quatrième chapitre** nous avons présenté une étude expérimentale sur la séparation électrostatique d'un mélange granulaire isolant traité par la DBD. Les résultats expérimentaux montrent un effet prononcé du temps de traitement sur le taux de récupération des deux produits séparés.

Le **cinquième chapitre** est consacré à la réalisation et l'étude d'un nouveau prototype de séparation électrostatique d'un mélange composé de deux produits différents, conçu au laboratoire LGEG de l'Université 8 mai 1945 – Guelma, et inspiré du séparateur à chute libre standard.

La technique de traitement de surface par la DBD est une solution viable pour améliorer le processus de chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants, aussi bien pour

améliorer leur tri dans les usines de traitement des plastiques provenant des déchets d'équipements électriques et électroniques. La **conclusion générale** fournit des principales contributions de cette thèse et précise les **perspectives** ouvertes.

CHAPITRE I
ÉTAT DE L'ART

Chapitre I État de l'art

Les procédés se basant sur l'électrostatique trouvent de plus en plus d'applications industrielles en raison, notamment, de leur simplicité, faible coût et la faible consommation en énergie. En effet, d'importantes applications utilisent actuellement les charges électriques comme principe de fonctionnement telles que par exemple : l'appareillage de l'électrophotographie, la fabrication de produits pharmaceutiques, l'aéronautique, le filtrage des gaz, le recyclage et la récupération des matériaux...etc.

La présence des charges électriques est naturellement liée aux milieux diélectriques. L'apparition des charges à la surface des matériaux diélectriques peut être due à un simple contact ou par un frottement d'un matériau contre l'autre. Ceci rend l'apparition des charges difficile à contrôler et le plus souvent indésirable. En effet, un chargement excessif et involontaire peut mener à des conséquences très graves allant jusqu'aux incendies et explosions. Si ces charges se trouvent dans un milieu inflammable ou à haut risque, les étincelles dues aux décharges électriques qu'elles peuvent entraîner est la raison ou le mécanisme par lequel les dégâts auront lieu. De plus, ces décharges, de petites tailles, dues aux charges qu'on qualifie d'indésirables, peuvent entraîner des conséquences moins graves, mais qui restent non souhaitables, telles que la perturbation des équipements électroniques (voire même leur défaillance), malaise aux individus entre autres.

En réalité, l'intérêt porté à la charge électrique, et en conséquence aux phénomènes de chargement, n'est pas dû seulement aux risques qu'elles procurent mais aussi aux applications électrostatiques durant lesquelles le diélectrique est chargé à volonté afin de le soumettre par la suite à un champ électrique, qui sera donc source de force électrique. Ainsi, la charge portée par le matériau joue un rôle clé dans l'efficacité du processus.

I.1 Etat de charge des matériaux isolants

Les matériaux isolants de type polymère sont largement utilisés de nos jours dans les différents secteurs industriels en raison de leurs excellentes caractéristiques électriques, thermiques et mécaniques. Un matériau en équilibre est électriquement neutre. Dans le cadre des applications, le matériau est chargé en surface à travers plusieurs techniques de chargement. Généralement deux de ces techniques sont le plus souvent utilisées : la décharge

couronne [1] et l'effet triboélectrique [2]. L'effet couronne est un phénomène assurant le chargement par bombardement ionique sous forme d'ions positifs ou négatifs, et l'effet triboélectrique se définit comme l'échange de charges électriques de surface entre deux matériaux, qu'ils soient initialement neutres ou non lors de leur mise en contact (frottement).

I.1.1 Chargement par effet couronne

L'effet couronne est une décharge autoentretenu non destructive qui apparaît au voisinage d'une électrode de faible rayon de courbure suite au phénomène d'ionisation de l'air. La différence de potentiel appliquée entre des électrodes, tels que fil – plan ou pointe – plan produit un champ électrique inhomogène dans l'espace inter-électrodes dû à la dissymétrie des électrodes, de sorte qu'il provoque l'ionisation de l'air et les charges qui en résultent sont entraînées vers l'électrode à faible champ où se situe la surface à charger. L'intervalle d'air entre électrodes comporte deux zones : une zone ionisée et une zone de dérive (**Figure I.1**).

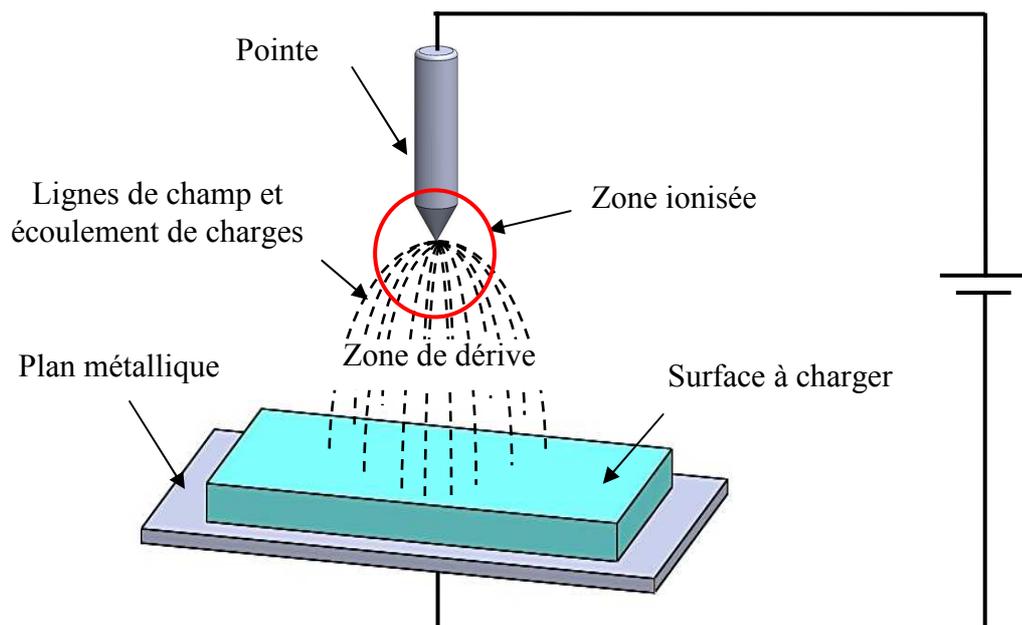


Figure I.1 : Décharge couronne dans une configuration pointe plan.

I.1.1.1 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel positif et la plaque reliée à la terre (**Figure I.2**). Dans ce cas, des électrons sont produits par photo-ionisation autour de la pointe où le champ est intense et sont accélérés vers l'anode (l'électrode de petit rayon de courbure). Autour de celle-ci, se développe alors une

région de forte ionisation. Les ions positifs ainsi créés sont repoussés par l'anode, sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance de la pointe (inférieure au millimètre) au-delà de laquelle le champ électrique trop faible ne permet plus la création d'ions positifs. Les ions positifs migrent donc vers la cathode (la plaque).

Il existe différents régimes pour la décharge couronne [3]. En augmentant la tension, la décharge couronne positive devient une décharge luminescente continue, cette décharge se transforme en claquage si la tension est très élevée. Lorsque le champ électrique est augmenté, une fine couche d'air ionisé entre les deux électrodes peut être observée. Ce régime s'appelle la décharge de type « streamer ».

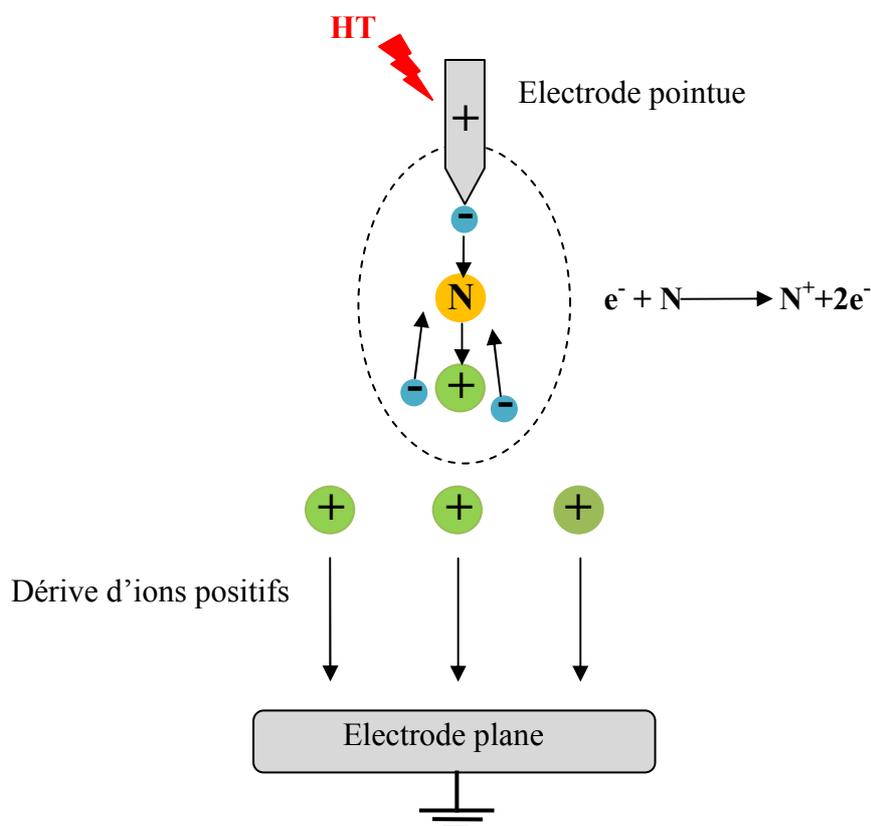


Figure I.2 : Description de la décharge couronne positive.

I.1.1.2 Décharge couronne négative

La décharge couronne négative se produit quand l'électrode pointue est portée à un potentiel négatif. Quelle que soit la polarité, il y a toujours création d'électrons. Dans ce cas, les ions positifs créés (dans la zone d'ionisation autour de la pointe) reviennent rapidement à la cathode (**Figure I.3**). Tandis que, les ions négatifs sont repoussés par l'électrode sous tension vers la zone où le champ est plus faible (zone de dérive) et peuvent migrer vers la plaque reliée à la masse. En augmentant la tension, la décharge couronne négative atteint le

régime d'impulsions de *Trichel* à une fréquence qui dépend du courant moyen [4]. Ces impulsions sont régulières et sont dues au champ électrique qui s'affaiblit au voisinage de la cathode. Les ions négatifs empêchent en effet la multiplication des avalanches électroniques.

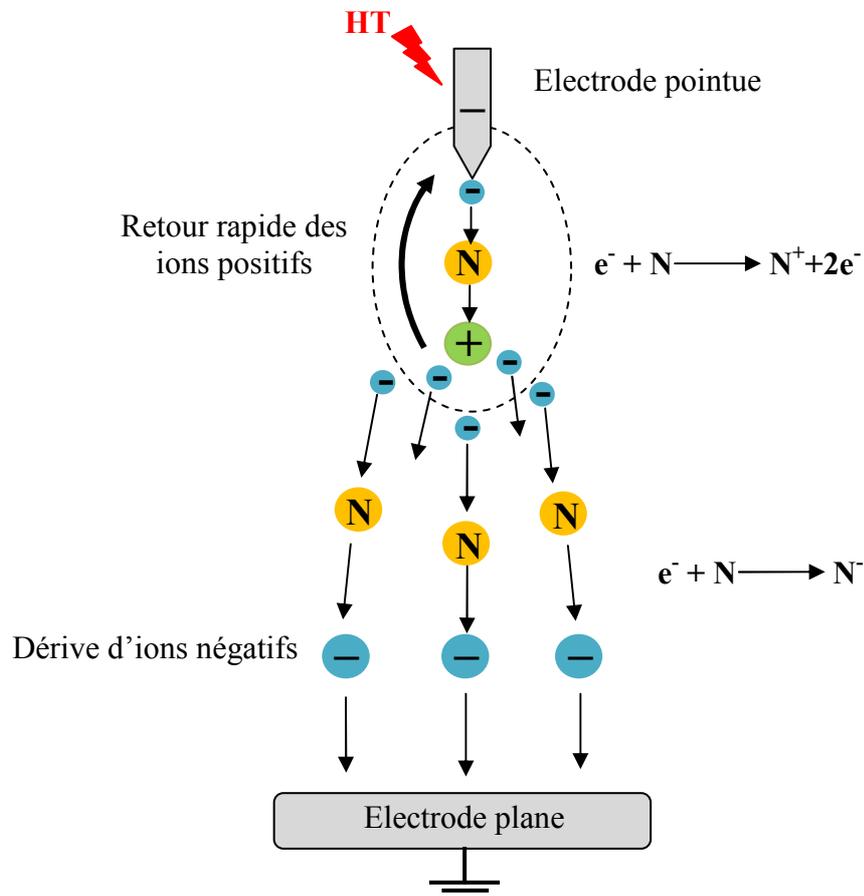


Figure I.3 : Description de la décharge couronne négative.

I.1.1.3 Décharge couronne alternative

En plus des décharges en régime continu, on peut également créer une décharge en régime alternatif en appliquant une tension sinusoïdale à la pointe. Dans ce cas, les processus de la décharge soumise à une excitation alternative sont identiques à ceux décrits pour une excitation continue, dans la mesure où l'intervalle de temps entre les inversions de polarité est suffisamment long pour que toutes les charges résiduelles de l'alternance précédente soient écoulées. Ceci implique l'existence d'une fréquence f et d'une distance inter-électrodes d limites reliées par l'expression suivante [5] :

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

Avec μ la mobilité des ions et E l'amplitude du champ électrique.

Si l'excitation est supérieure à cette fréquence f_{max} , la charge d'espace va osciller et augmenter à chaque période entre les électrodes. Par contre, si la fréquence est inférieure à f_{max} la décharge couronne alternative se comporte comme en continu. Cet effet cumulatif aura pour conséquence des passages à l'arc pour des potentiels plus faibles qu'en continu.

I.1.2 Chargement par effet triboélectrique

Le chargement par effet triboélectrique, ou par frottement, est un phénomène caractérisé par le transfert de charges entre deux corps électriquement neutres suite à leur séparation après un contact intime (**Figure I.4**). Ce transfert de charges entraîne le chargement d'un matériau positivement et l'autre négativement. Si l'un des matériaux présente une conductivité faible, les charges ainsi générées resteront après séparation et de nouveaux contacts auront pour effet de produire de nouveaux transferts de charges. Ce phénomène est influencé par plusieurs facteurs internes et externes dont l'influence aura une conséquence directe sur l'efficacité du transfert de charge.

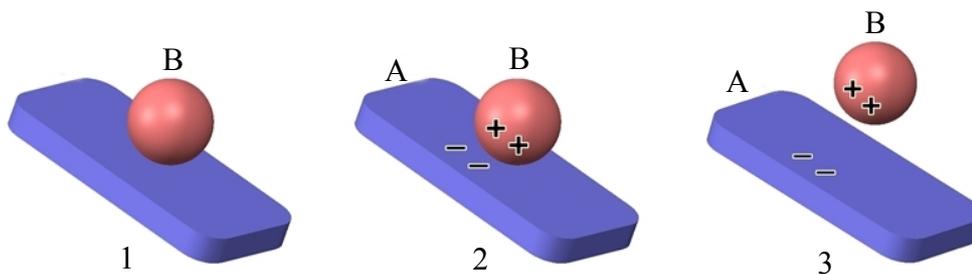


Figure I.4 : L'échange de la charge électrique entre deux surfaces par effet triboélectrique: 1. Surface "A" et la particule "B" sont neutres; 2. La surface A et la particule "B" sont en contact; 3. Après la séparation, la surface "A" a la tendance de se charger négativement, et la particule "B" positivement [6].

I.1.2.1 Modèle capacitif de la charge triboélectrique

Le contact de deux matériaux et l'apparition de charges sur leurs surfaces peut être représenté par un condensateur. Une illustration schématique d'une particule chargée par contact avec un mur (modèle de condensateur) est montrée dans la **Figure I.5** [7]. La variation de la charge transférée (Δq) est proportionnelle à l'efficacité de chargement (k_c), à la capacité (C) et à la différence de potentiel totale (V_t) entre les deux corps en contact.

$$\Delta q = K_c C V_t \quad (I.2)$$

La capacité (C) dépend de la constante diélectrique absolue du gaz (ϵ_0), de la surface de contact (S) et de la distance de contact, appelée 'l'espace critique' (Z_0) comprenant des facteurs géométriques entre les deux corps en contact.

$$C = \epsilon_0 S / Z_0 \quad (\text{I.3})$$

À la séparation au-dessous de l'espace critique, le transport de charge peut avoir lieu entre les deux corps.

La différence de potentiel totale (V_t) se relie au contact entre la particule et le mur et aussi à la différence de potentiel résultant d'autres particules et les champs électriques externes. Ceci peut être exprimé comme :

$$V_t = V_c - V_e - V_b + V_{ex} \quad (\text{I.4})$$

Où :

V_c : différence de potentiel obtenue basée sur le travail de sortie.

V_e : différence de potentiel résultant de la charge d'image.

V_b : différence de potentiel résultant de la charge d'espace induite par les particules chargées environnantes, négligeable dans des conditions diluées.

V_{ex} : différence de potentiel résultant d'autres champs électriques externes.

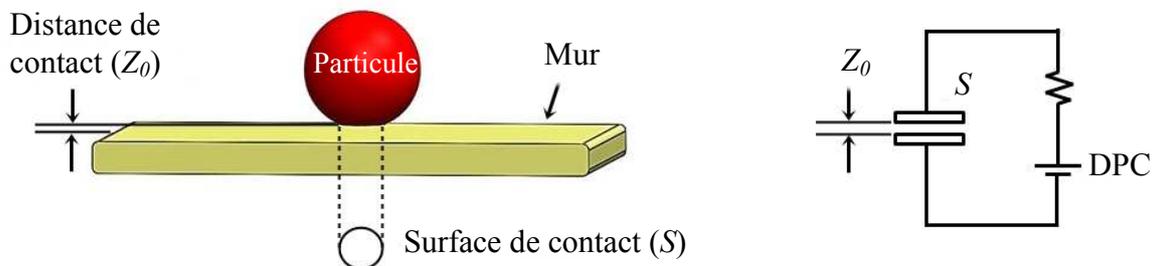


Figure I.5 : Schéma du modèle de condensateur du chargement par contact [7].

I.1.2.2 Série triboélectrique

Afin de prédire la polarité des matériaux chargés par contact, un classement des matériaux, appelé « série triboélectrique » a été établi sur la base des expériences. Selon les observations, il était évident que la polarité de la charge était tributaire des propriétés du matériau [8]. *Shaw* a déterminé expérimentalement la première série triboélectrique en 1917. Il a mesuré la charge sur les surfaces des divers matériaux chargés par le frottement en utilisant un électroscope [9]. Ce classement a permis de ranger les matériaux ayant la charge la plus positive jusqu'aux matériaux les plus négatifs. Plus les deux matériaux dont il s'agit

sont éloignés l'un de l'autre dans la liste triboélectrique, plus la charge qu'ils vont engendrer sera élevée.

A travers les années, plusieurs séries triboélectriques ont été établies. Le **Tableau I.1** montre des séries triboélectriques étudiées par des différentes méthodes. Il apparaît du tableau qu'il n'y a aucune série triboélectrique universelle. Ceci est dû au fait que les conditions expérimentales varient d'une expérience à l'autre. En plus, les additifs en plastiques commerciaux peuvent influencer les résultats de chargement et, en conséquence, sur le classement des matériaux dans la série [10].

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

Réf. [10].	Réf. [11].	Réf. [12].	Réf. [13].	Réf. [14].
↑ (+) Charge positive				
PS	Nylon 6.6	Al	PMMA	PMMA
PE	PV OH	PMMA	ABS	GPPS
PP	PV Ac	PE	PET	ABS
PVC	PMMA	PET	Cu	Calibre
	PC	PP	HDPE	HIPS
	PS	PVC	PP	Rubber
	PI		PVC	PET
	PP		PTFE	HDPE
	PET			LDPE
	PVC			HOMOPP
				COPP
				PVC doux
				PVC dur
Charge positive ↓ (-)				

I.1.2.3 Mécanismes de chargement triboélectrique des isolants

La génération de charge électrostatique par contact est un phénomène basé sur la physique de surface des polymères [15, 16]. Dans un solide, les niveaux d'énergie permis sont

confinés dans une bande dont la largeur, de l'ordre de l'électronvolt, dépend du cristal et du recouvrement des orbitales atomiques. Les solides ont une structure de bandes; on distingue les bandes d'énergie permises, et les bandes d'énergie interdites (**Figure I.6**). Les bandes d'énergie se remplissent selon la loi statistique de Fermi, les électrons occupent tous les niveaux d'énergie inférieure à l'énergie de Fermi, ou niveau de Fermi, sa valeur est caractéristique du cristal considéré. On met alors en évidence la bande de valence et la bande de conduction.

La modélisation des niveaux superficiels, qui explique le processus de triboélectrisation, est basée sur le transfert de charge entre les surfaces de contact et la présence des niveaux d'énergie dans la bande interdite des polymères. Les bandes noires situées au-dessous des niveaux Fermi représentent des niveaux d'énergie occupés tandis que les bandes grises, des niveaux d'énergie libres. E_F^A , E_F^B sont les niveaux Fermi superficiels et W_A , W_B représentent le travail d'extraction superficiel de deux matériaux polymères [17].

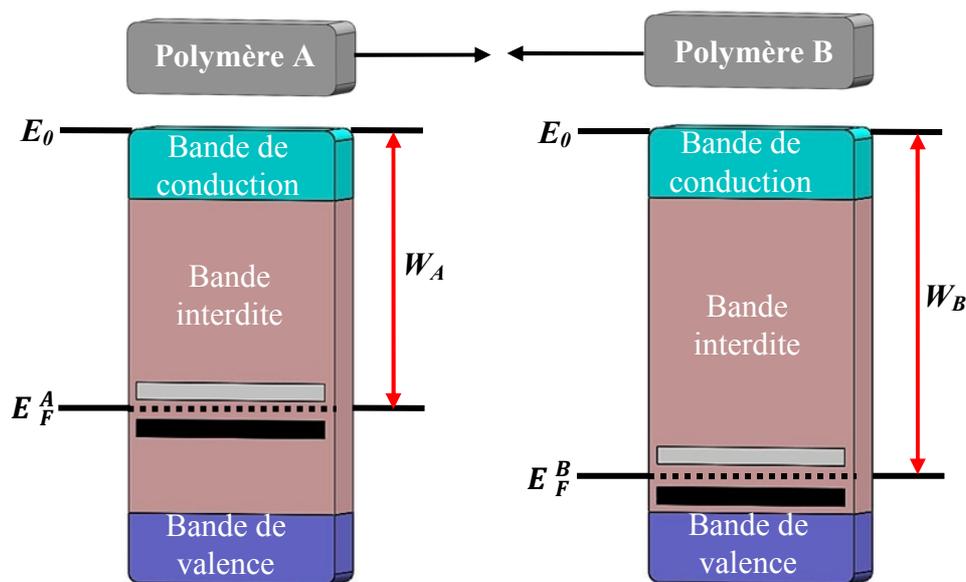


Figure I.6 : Modélisation des niveaux superficiels des polymères en triboélectrisation [17].

Quand deux matériaux isolants entrent en contact, des échanges d'électrons se produisent entre les différents niveaux d'énergie libres localisés à la surface des deux matériaux. Dans le même matériau, la théorie suppose que les électrons dans un état d'énergie élevée (les états occupés) ne sont pas capables de redescendre seuls, par transition, vers des niveaux plus bas en énergie (les états vides), même si cela est favorisé thermodynamiquement, en raison de la grande différence entre les énergies de deux niveaux qui sont très localisés à la surface du matériau. Ainsi, si deux matériaux isolants sont frottés

l'un contre l'autre, il se produira un transfert d'électron à l'interface par effet tunnel d'un isolant à l'autre où des états occupés de haute énergie rencontrent des états vides de basse énergie. Cet échange d'électrons permet aux deux matériaux de se rapprocher de l'équilibre thermodynamique [18].

La **Figure I.7** montre le transfert d'électrons entre deux polymères isolants en contact jusqu'au moment où les niveaux Fermi s'égalisent (ils sont séparés ici pour plus de clarté). Le polymère A est caractérisé par un travail d'extraction faible W_A se charge positivement par rapport au polymère B qui est caractérisé par un travail d'extraction W_B . Le processus de triboélectrisation prend fin par l'accumulation de la charge « q » à l'interface et par renforcement du champ électrique de contact E_C dans l'intervalle x , jusqu'à l'équilibre thermodynamique (les niveaux Fermi E_F^A , E_F^B sont égaux).

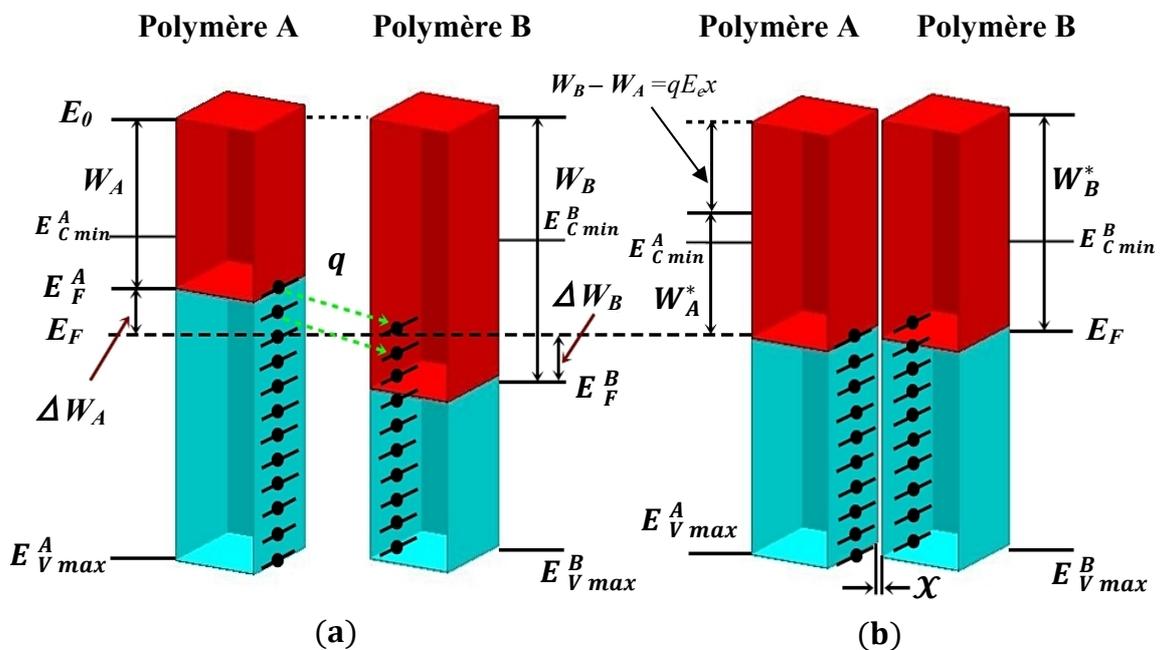


Figure I.7 : Diagrammes des niveaux d'énergie qui expliquent la triboélectrisation de deux polymères de différentes matières par la théorie des niveaux superficiels de haute densité : (a) avant le contact ; (b) durant le contact [17].

Dans la nature, la matière est électriquement neutre. C'est-à-dire, les charges positives (des protons) sont égales aux charges négatives (des électrons). Du point de vue de la structure de matière, le processus de triboélectrification est généralement le responsable du transfert de charge entre les mêmes ou les différents matériaux [19].

L'électrification ou le chargement par contact est un phénomène mal compris, caractérisé par le transfert de charge à partir d'un matériau à l'autre quand ces deux matériaux sont mis en contact puis séparés. Pratiquement, il n'est pas habituellement facile de distinguer les procédés de chargement, et donc le terme "chargement triboélectrique" est employé dans un large sens [20]. La compréhension des mécanismes physiques de génération de charges par contact n'est pas totale, ils sont assez bien connus pour les interfaces métal/métal et métal/isolant [21, 22], mais ils restent généralement méconnus et complexe pour les interfaces isolant/isolant [23, 24].

Le transfert de charge peut se produire par des électrons, des ions ou par le transfert de matière [16, 20, 25]. Il n'est pas encore clair lequel de ces mécanismes de transfert de charge est le plus dominant.

- **Transfert d'électrons**

Le mécanisme de transfert d'électron convient à l'explication du transfert de charge pour le cas du contact métal-métal, où une différence dans le travail de sortie est la force d'entraînement principale. Quand deux métaux entrent en contact, il se produit un transfert des électrons libres du métal dont le travail de sortie est le plus faible vers le métal avec un travail de sortie plus élevé, ce qui permet l'alignement des niveaux de Fermi.

Ce mécanisme peut être prolongé pour le tribochargement entre les isolants. La structure électronique d'un isolant énergétiquement se compose de la bande de valence, la bande de conduction (après avoir été rempli entièrement d'électrons), et la bande interdite séparant la bande de valence et la bande de conduction. Dans le meilleur des cas il n'y a aucun espace libre pour que les électrons soient remplis, les électrons libres ne peuvent pas spontanément passer à partir de la bande de conduction vers la bande valence sans avoir assez d'énergie. Cependant, presque tous les matériaux ne sont pas dans l'état idéal, là pourraient présenter des électrons emprisonnés dans la bande interdite [26]. La théorie des bandes suppose que l'échange d'électron sur les surfaces de deux isolats en contact se produit entre les électrons emprisonnés dans l'état de grande énergie sur une surface d'un isolant et les électrons de l'état à énergie réduite sur la surface de l'autre, résultant de la différence de travail de sortie entre les deux matériaux. Le transfert de charge pour le contact isolant-métal peut être expliqué par un concept simulé du transfert d'électrons pour le cas métal-métal. Cela suppose qu'un travail effectif soit attribué à l'isolant. La quantité de charge transférée est déterminée de manière à égaliser les niveaux d'énergie des deux matériaux. Lorsque deux isolants entrent en contact, les électrons se déplacent des états de surface remplis de l'isolant 1

aux états de surface vides de l'isolant 2. La force motrice du transfert de charge entre les deux surfaces est la différence entre les travaux de sortie des deux matériaux. Le transfert de charge cessera lorsque les niveaux de Fermi des deux matériaux coïncideront.

- **Transfert d'ions**

Une autre possibilité de transfert de charge entre les matériaux isolants implique uniquement des ions. En général, le rôle des ions pendant le processus de chargement triboélectrique des isolants est complexe. Le résultat de la triboélectrification dépend du type et de la concentration des ions sur la surface et de leur mobilité. En outre, la présence de l'eau sur la surface a une influence significative sur le chargement par contact. Selon son épaisseur, les couches de l'eau peuvent faciliter le processus de chargement et déchargement des matériaux isolants.

De plus, le transport d'ion peut également être activé thermiquement en augmentant la dissipation d'ion [16]. Par exemple, la concentration des ions de H^+ et OH dans la couche adsorbée de l'eau augmente pour des températures élevées [27].

- **Transfert de matière**

Le frottement étant l'équivalent de contacts suivi de séparations, mais, s'accompagnant de génération de chaleur et parfois de transfert de masse. Le transfert de masse a été également considéré comme un autre mécanisme qui joue un rôle principal dans la triboélectrification. Quand deux matériaux isolants entrent en contact, le transfert de charge peut également se produire quand les quantités de matériaux microscopiques chargés détachent de leur surface originale et s'attachent sur l'autre surface de contact [28]. Le transfert de masse comme un mécanisme de chargement est semblable aux processus de transfert d'ion. La différence principale se situe dans le type des porteurs de charge. Dans le cas du transfert d'ion, le chargement se produit par l'échange des adsorbants extérieurs ionisés, tandis que, dans le cas de transfert de masse, des atomes extérieurs d'un corps sont transférés sur la surface du corps associé par la suite du contact [29].

Les expériences de *Baytekin et al* [30] ont prouvé que le transfert de masse dépend des propriétés mécaniques des matériaux, tels que la dureté et l'énergie cohésive. Des matériaux plus durs enlèvent des morceaux d'une surface plus molle, et les matériaux avec une énergie cohésive plus élevée sont moins susceptibles de faire déchirer des morceaux. En outre, la rugosité de surface du matériau peut influencer le transfert de masse. Une surface rugueuse

d'un matériau solide arrache plus au moins facilement de la matière d'une autre surface d'un matériau doux [30, 31].

En conséquence, pour le processus de chargement des isolants par contact, la charge transférée pourrait être électron, ion ou simplement transfert de morceaux de matière nanométrique, selon les conditions de chargement. La **Figure I.8** montre les trois mécanismes possibles de transfert de charge.

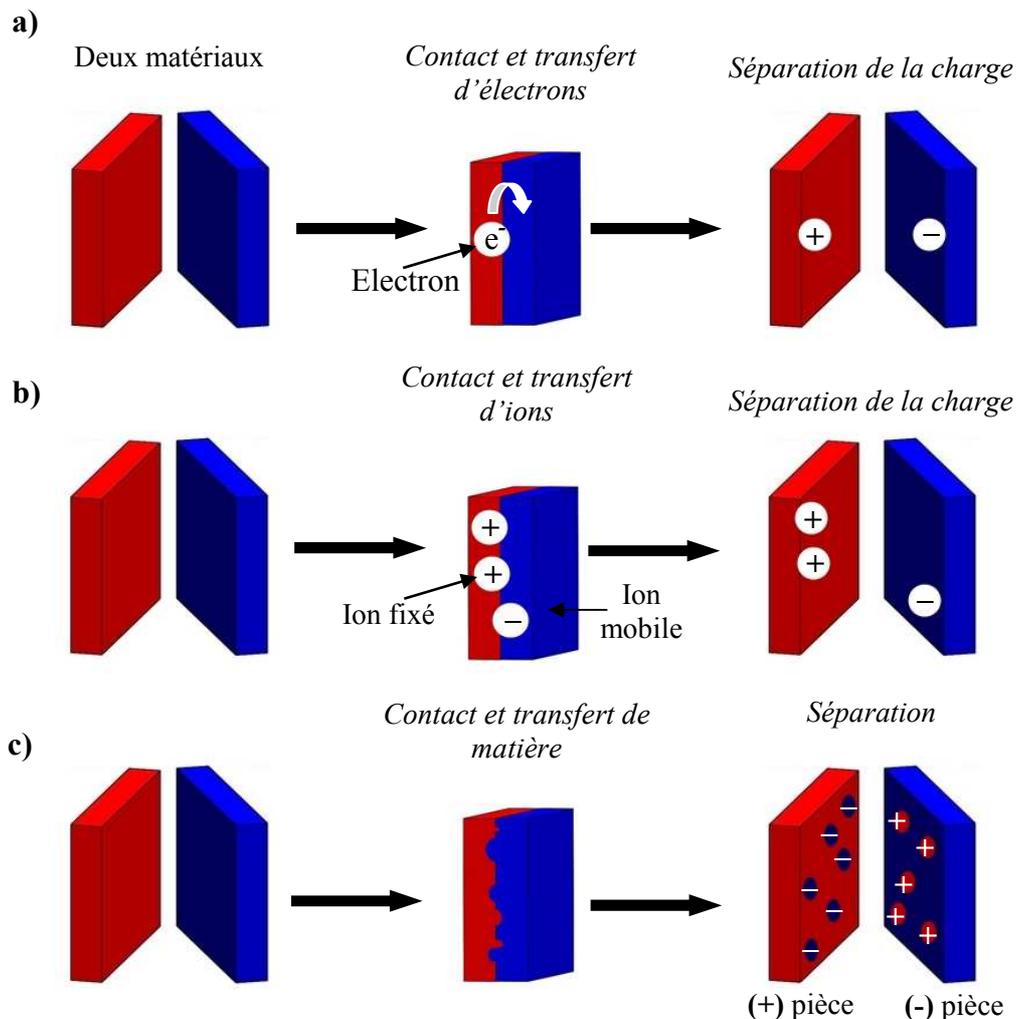


Figure I.8 : Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électron ; b) Transfert d'ion ; c) : Transfert de matériel [19].

I.1.3 Dispositifs de chargement triboélectrique

Le tri des matériaux granulaires isolants dans un champ électrique intense (la séparation triboélectrostatique) est une technique dépendant principalement du niveau de la charge statique acquise par effet triboélectrique. Cette charge se produit dans des systèmes de tribochargement, ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés.

Nombreux travaux ont été publiés sur les procédés de chargement triboélectrique des matériaux granulaires en utilisant des dispositifs variés : cylindre rotatif, lit fluidisé, chargeur statique, cyclone et vibreur [12, 10, 32, 33]. Ces dispositifs de tribochargement constituent la première étape de processus de séparation électrostatique des mélanges granulaires.

I.1.3.1 Dispositif de charge à cylindre rotatif

Le dispositif de chargement à cylindre rotatif est un tube isolant utilisé comme installation de chargement triboélectrique. Le mélange granulaire est mis en mouvement à l'intérieur du cylindre, qui tourne autour d'un axe horizontal ou légèrement incliné (**Figure I.9**), les particules peuvent passer à travers le tube par la force de la pesanteur. Afin de créer l'agitation du mélange granulaire, dans le tube il y a des nervures faites de la même matière que le tube lui-même. Ils se prolongent radialement vers l'intérieur du mur du tube. L'accumulation de la charge par les particules est due aux deux mécanismes : collisions entre particules (mécanisme principal) et entre particules et la paroi du cylindre (mécanisme secondaire) [6].

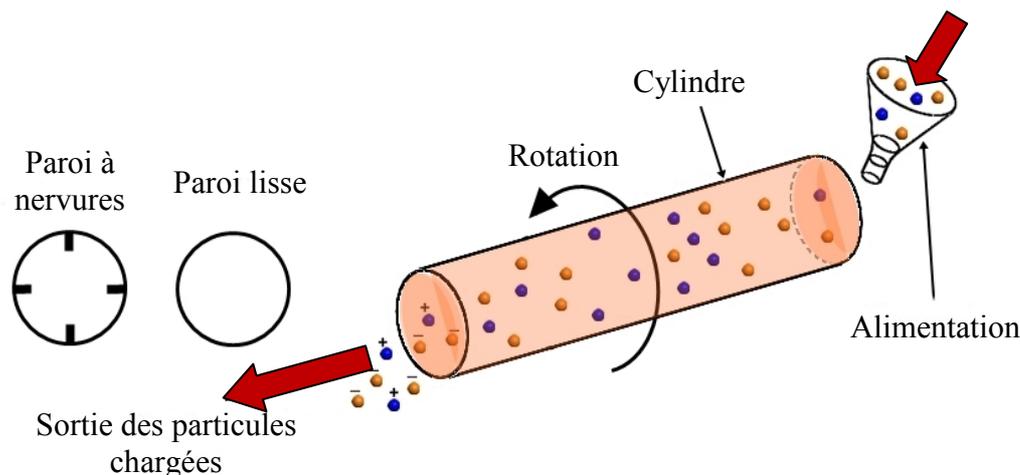


Figure I.9 : Dispositif de tribochargement à cylindre rotatif [6].

I.1.3.2 Dispositif de charge à lit fluidisé

Le procédé de chargement triboélectrique des matériaux granulaires ou pulvérulents d'une haute efficacité peut être obtenu en utilisant le dispositif à lit fluidisé. Il est le procédé le plus utilisé avec la séparation électrostatique des matériaux. A l'intérieur d'un tube cylindrique isolant (parois transparentes pour visualiser le processus de chargement), le mélange granulaire est déposé sur un support. Les particules sont fluidisées sous l'effet de l'air obtenu à l'aide d'une soufflante au bas du cylindre. Les particules acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux contacts entre elles.

La **Figure I.10** montre le principe de fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs et le comportement des particules en fonction de la vitesse de l'air donnant lieu aux six phénomènes :

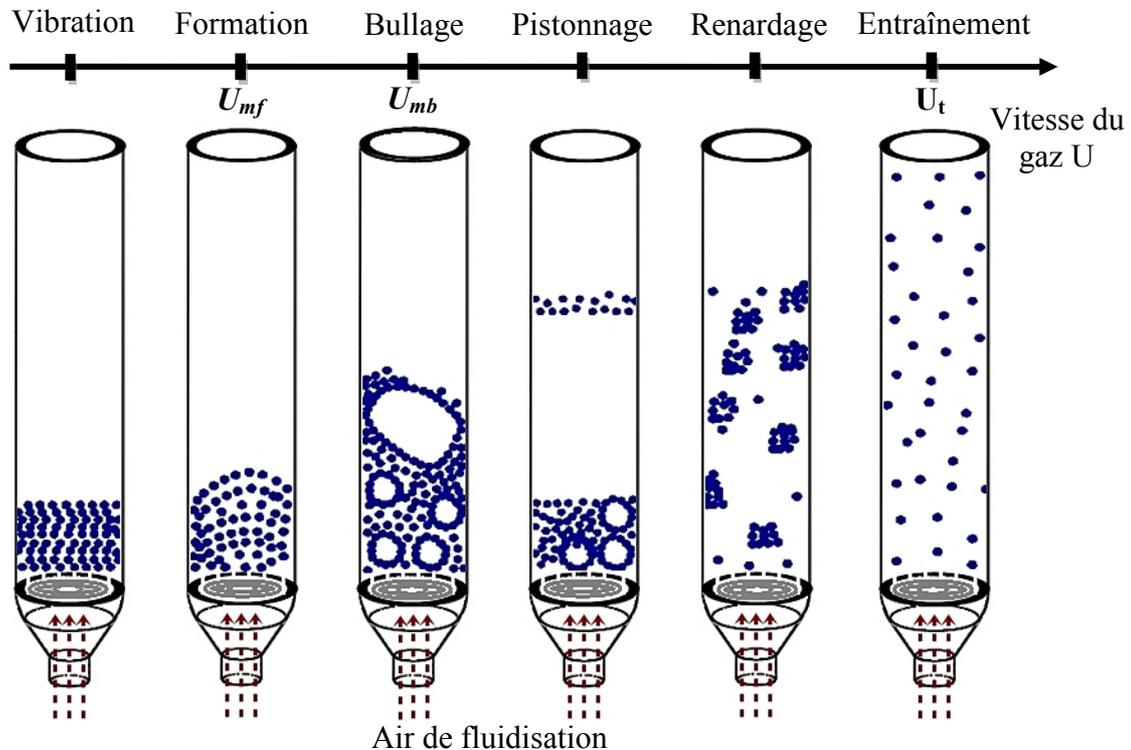


Figure I.10 : Les régimes de lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation; U_{mf} - vitesse minimale de fluidisation; U_{mb} - vitesse minimale d'apparition des boules; U_t - vitesse de transport pneumatique [34].

- La vibration (état fixe): est le début du processus de triboélectrisation dans les dispositifs à lit fluidisé, en cette étape la couche des particules reste sur la plaque poreuse sans mouvements visibles due aux faibles vitesses de l'air, la vibration de particules devient efficace avec l'augmentation de la vitesse.
- La formation : le lit fixe de couche granulaire commence à être fluidisé (avoir des caractéristiques des fluides : ondes, petites bulles, viscosité ...), il est transformé en état de fluidisation (on atteint ainsi la transition entre l'état fixe et l'état fluidisé du lit de particules) par une vitesse superficielle d'air qui dépasse la vitesse minimale de fluidisation U_{mf} , le lit montre une certaine expansion de la couche.
- Le bullage : la fluidisation dans la phase « lit bouillonnant » est accompagnée par la présence des bulles qui se forment dans la région de la plaque poreuse de distribution

de gaz au bas du cylindre (des bulles peuvent se réunir pour former courants gazeux voir zone sans particules), le lit devient efficace et caractérisé par des impacts forts.

- Le pistonage : en excès au-delà de U_{mb} , le diamètre des bulles atteint cette fois des dimensions identiques 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 : le phénomène d'entraînement explique l'expulsion des particules hors de la chambre de fluidisation, en cette dernière étape, la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t [15].

I.1.3.3 Dispositif de chargement statique

Le dispositif de chargement statique est une enceinte parallélépipédique isolante (**Figure I.11**), y compris des parois inclinées et détachables. Les particules tombent en chute verticale et glissent dans ce dispositif par gravitation (frottement avec des plaques isolantes inclinées). La charge acquise par les particules dans ce dispositif est faible en raison de la difficulté de contrôler la durée de chargement [35].

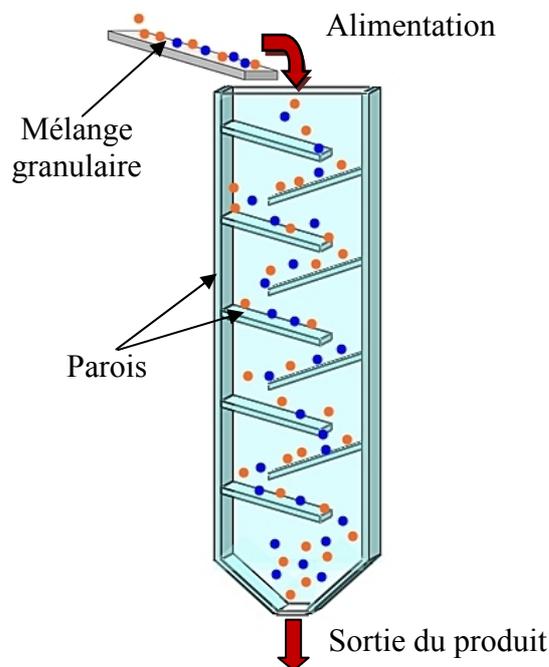


Figure I.11 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement statique.

I.1.3.4 Dispositif de chargement par cyclone

Le dispositif est constitué d'un cylindre isolant et un ventilateur dont la vitesse de rotation peut être modifiée (**Figure I.12**). Il permet de souffler les particules à charger par frottement avec les parois internes du dispositif [32].

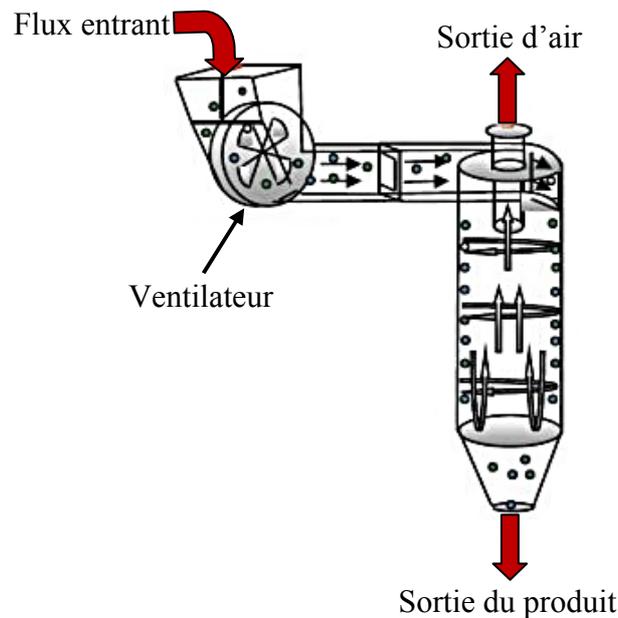


Figure I.12 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.

I.1.3.5 Dispositif de chargement tribo-aéro-électrostatique

Le chargement tribo-aéro-électrostatique est une combinaison de deux parties en cascade (**Figure I.13**).

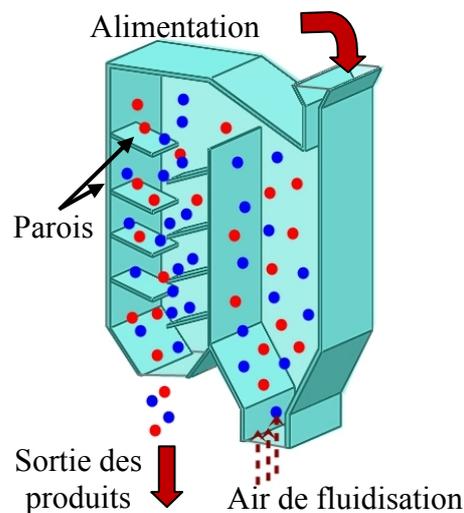


Figure I.13 : Représentation schématique d'un dispositif de chargement tribo-aéro-statique.

La première pour le chargement aéro-triboélectrique (à lit fluidisé), les particules chargées dans le lit fluidisé par l'agitation de l'air sont guidées vers la deuxième partie (chargement statique) afin de permettre de les charger encore une fois par frottement avec les parois inclinées pour contrôler le niveau de la charge acquise [35].

I.1.3.6 Dispositif de chargement à vibration verticale

Le dispositif à vibrations (Retsch AS200 basic) représente une autre solution pour charger les matériaux granulaires (**Figure I.14**). Le produit à charger mis en mouvements vibratoires à l'intérieur d'une boîte en inox fixée sur le plat de vibration du dispositif. La charge triboélectrique dépend au niveau d'oscillations du dispositif et du temps de chargement (paramètres contrôlables) [33].

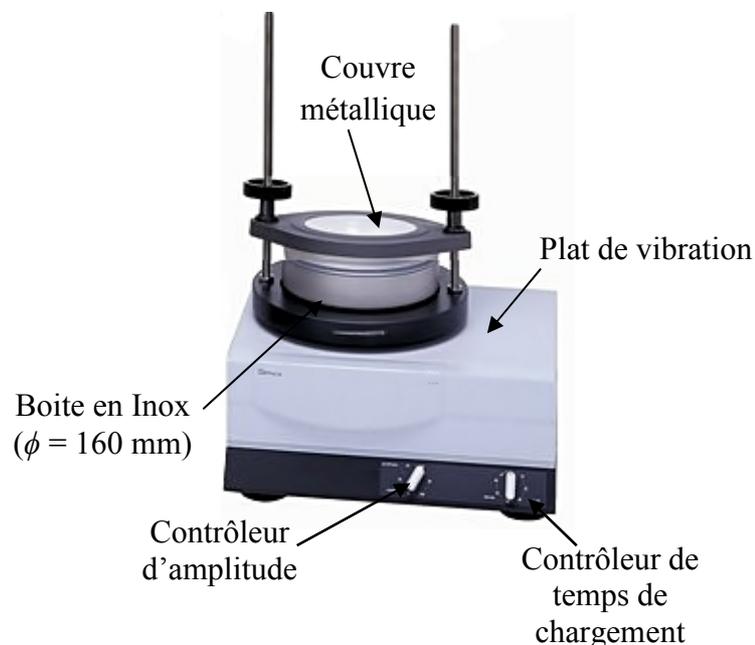


Figure I.14 : Dispositif de chargement par vibration.

I.1.4 Facteurs influençant le processus de chargement triboélectrique

Le tribochargement des matériaux isolants est un phénomène complexe influencé par de nombreux facteurs internes et externes. Leur rôle a un grand impact sur le processus de génération des charges par voie de frottement.

I.1.4.1 La taille et la forme

La différence entre la capacité de tribochargement de deux matériaux isolants peut être attribuée à leurs propriétés (la conductivité et la permittivité), structure chimique mais aussi à

leurs tailles et formes. En effet, les matériaux caractérisés par des différentes formes et tailles ont des différentes surfaces de contact, de sorte qu'ils se chargent différemment. *Wu, Guiqing et al* [36] ont étudié l'effet de la taille des particules en plastiques générées par le broyage des déchets d'équipements électriques et électroniques sur l'évolution de la charge triboélectrique, ils ont indiqué que les petites particules se chargent plus vite que les grosses particules. Cependant, ils ont signalé que la relation inverse entre la taille des particules et la charge non parfaite due à la distribution non uniforme de la taille des particules de même échantillon (les formes de particules ne sont pas une sphère parfaite) et l'impact de l'humidité relative peut changer le processus de chargement.

I.1.4.2 La rugosité de surface

L'état de surface est associé à l'ensemble des défauts micro- et macro-géométriques, tandis que la rugosité quantifie uniquement les défauts micro-géométriques. Cette dernière est formée par des fluctuations caractérisées par des pics et des vallées de l'ordre du micron, d'amplitudes et d'un espacement variable.

La rugosité de surface est un paramètre qui a une grande influence sur les zones des polymères en contact. L'importance de la rugosité de surface microscopique et son influence sur la charge triboélectrique a été soulignée par *Coste et Pechery* [37]. Les expériences ont été effectuées sur une série d'échantillons de film de PET ayant diverses microrugosités en contact avec un métal. Les résultats ont été expliqués en termes d'évaluations précises de la zone de contact (le pourcentage des zones de contact d'une surface lisse par rapport à une surface rugueuse), ils ont indiqué que la densité de charge augmente avec la diminution de la rugosité de surface du polymère.

I.1.4.3 La durée du contact

La durée du contact ou le temps de chargement est un paramètre qui permet de déterminer la charge accumulée sur la surface des isolants. L'amplitude et la polarité de la charge acquise est une fonction non linéaire du temps. La charge augmente avec l'augmentation du temps de chargement et devient saturée à des durées plus longues [38]. Cependant, lorsque le temps de chargement est assez long et la charge saturée, les deux isolants peuvent être avoir un renversement de la polarité de la charge à cause de l'élimination de charges par neutralisation ou du transfert de la matière chargée d'un matériau à l'autre, de sorte que, la charge finale des deux matériaux va diminuer.

I.1.4.4 L'humidité relative

Les différentes références signalent l'importance de l'humidité relative sur le processus de chargement triboélectrique des isolants. La plupart des travaux publiés indiquent que la polarité de la charge ne change pas, mais le niveau de la charge diminue avec l'augmentation de l'humidité relative. Le comportement de chargement et déchargement des plastiques pourrait être expliqué par la formation des films de l'eau sur la surface du matériau [39]. Une grande valeur d'humidité atmosphérique offre un nombre élevé de molécules d'eau qui peuvent être introduites dans ces polymères et forment de l'eau contenant des couches gonflées, ce qui peut introduire plus d'ions dans les systèmes et diminuer la résistivité de surface. Par conséquent, plus de fuites se produisent et la charge ne peut être accumulée avec l'augmentation de l'humidité relative [21]. Quelques littératures indiquent également qu'une humidité plus élevée empêcherait l'efficacité du chargement.

I.2 Procédés électrostatiques (la séparation électrostatique et le procédé plasma)

L'électrostatique industrielle est aujourd'hui une branche bien établie de l'ingénierie, englobant non seulement des applications importantes telles que l'électro-photographie, le tri des déchets en plastiques, la précipitation et le revêtement, mais aussi le domaine varié et imprévisible des risques statiques. Les environnements industriels particulièrement sensibles à la séparation de charges statiques incluent l'industrie pétrochimique, les opérations aéronautiques et aérospatiales, les applications chirurgicales, la fabrication de produits pharmaceutiques et de fibres synthétiques. Comme dans la plupart des situations de risques statiques, la séparation des charges conduisant à une étincelle incendiaire illustre bien le caractère incontrôlable des phénomènes électrostatiques. D'autre part, l'application des phénomènes électrostatiques et le contrôle des processus électrostatiques ont été développés en une science extrêmement élégante. On décrira dans ce qui suit, les deux procédés électrostatiques que nous s'intéressent dans notre étude : la séparation électrostatique et la décharge à barrière diélectrique (DBD).

I.2.1 Séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires isolants

La séparation triboélectrostatique est une technique écologique peu coûteuse, qui a le potentiel de prendre une plus grande importance dans le recyclage des polymères. La **Figure I.15** montre un organigramme qui représente les trois étapes nécessaires au processus de séparation des plastiques : *Prétraitement*, *Chargement* et *Séparation* [36]. Pour être séparés, les déchets plastiques sont généralement écrasés et criblés à la taille appropriée, les particules

du mélange sont chargées par effet triboélectrique, qui est la génération de charges sur la surface des matériaux granulaires isolants en contact les uns avec les autres et les parois du dispositif de chargement. Les granules, chargées différemment lors du contact, sont introduits et séparés dans un champ électrique dépendamment le signe et le niveau de la charge qu'elles portent, et puis collectés.

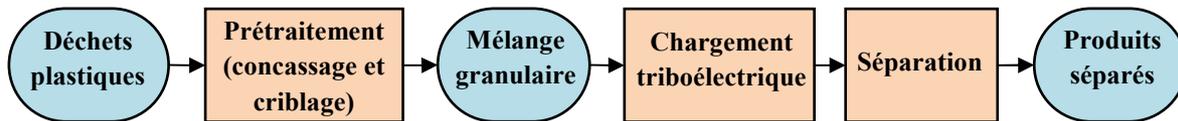


Figure I.15 : Organigramme de la séparation triboélectrostatique pour les déchets plastiques [36].

a) Prétraitement

La taille des particules d'un mélange approprié pour la séparation triboélectrostatique varie d'un dispositif de tribochargement à un autre. Il a été rapporté que la méthode de séparation triboélectrostatique est efficace pour les particules de taille dans une gamme de 1-13 mm. Il est également rapporté que le séparateur à cyclone peut être efficace pour des particules plastiques de taille dans une gamme autour de 150 μm [40]. Il est bien connu que le tribochargement des matériaux isolants se produit uniquement sur les surfaces des particules. Par conséquent, une trop grande taille diminue la surface spécifique, conduisant à la diminution de la force du champ électrique, qui est le facteur principal du processus de séparation. En outre, avec l'augmentation de la taille des particules, la force de champ électrique nécessaire pour la déflexion électrostatique des particules augmente. D'autre part, la petite taille n'est pas favorable au processus de séparation électrostatique, car cela coûtera plus d'énergie dans l'étape de fraisage, et peut provoquer l'augmentation de la collision entre le même genre de particules de plastique et conduit à la diminution de l'efficacité de séparation. La petite taille des particules peut également causer certains problèmes tels que l'adhérence sur la paroi du dispositif de chargement, le blocage et la diminution du taux de récupération des produits séparés. La taille des particules est sans aucun doute un facteur important qui influence l'efficacité finale de la séparation. Étant donné que les déchets plastiques sont généralement de différentes tailles lorsqu'ils sont collectés, afin de contrôler la taille des particules pour l'opération suivante, le concassage et le criblage sont absolument essentiels. Les matériaux peuvent être chargés dans l'étape de concassage et de tamisage, ce qui empêcherait probablement l'efficacité de chargement et influencerait la pureté et la

récupération de l'ensemble du processus. Pour le but de recherche aussi bien que la reproductibilité élevée, la neutralisation des particules est nécessaire.

b) Chargement triboélectrique

Après l'étape de concassage et de tamisage, les déchets de plastiques sont censés se trouver dans une gamme de taille de particules appropriée pour le chargement triboélectrique. Le frottement peut être utilisé pour augmenter le transfert de charge entre les granules à plusieurs ordres de grandeur plus grand que dans un simple contact touchant [41]. Certains chercheurs apportent la preuve que le transfert de charge augmente avec la pression de frottement [42]. Parce que les plastiques sont des isolants, la charge électrique s'accumulera avec des frottements répétés. Pour agréger la pression de frottement et la fréquence, de nombreux dispositifs ont été étudiés ces dernières années pour le chargement de particules plastiques dans la séparation triboélectrostatique [35, 43- 45].

Selon le mécanisme de chargement, ces dispositifs sont classés en «monophasé solide» ou «biphasé solide-gaz». Le mécanisme de charge «monophasé solide» signifie que les interactions n'existent qu'entre les particules solides au cours du processus de chargement. Alors que le mécanisme de chargement «biphasé solide-gaz» utilise les interactions entre le gaz et le solide pour charger les particules solides du mélange. Les dispositifs de «monophasé solide» contiennent le cylindre rotatif, les bandes rotatives et les dispositifs vibrants. Les dispositifs «biphasé solide-gaz» contiennent le cyclone et le lit fluidisé.

c) Séparation électrostatique

Les particules de mélange tribo-chargées sont généralement introduites dans un séparateur de champ électrique et dévient vers des électrodes à haute tension en fonction des forces de Coulomb agissant sur elles. La configuration d'électrode du champ électrique joue un rôle important dans le processus de séparation.

I.2.1.1 Installations de séparation électrostatique

Multiples installations de séparation électrostatique destinées au tri des matériaux plastiques ont été réalisées. Leur principe de fonctionnement consiste au chargement des matériaux puis les soumettre à un champ intense afin d'exploiter la force électrique pour leur séparation. Donc, ce processus nécessite souvent deux étapes : le chargement par le frottement et la séparation dans un champ électrique intense. On distingue les prototypes suivants.

- **Séparateur à chute libre**

Les séparateur triboélectrostatique à chute libre (*Free-fall TriboElectroStatic Separator*) présenté sur la **Figure I.16** a été conçu pour la recherche fondamentale et applicative dans le domaine de la séparation des matériaux granulaires plastiques [12]. Les deux produits composant le mélange granulaire sont chargés par la triboélectricité dans des différents dispositifs de chargement triboélectrique, l'un avec une charge négative et l'autre avec une charge positive. Le mélange 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 ayant la polarité de signe opposé à leur charge. Le type du séparateur à chute libre dû au mode de chargement, sinon la deuxième partie de l'installation (la séparation) est la même.

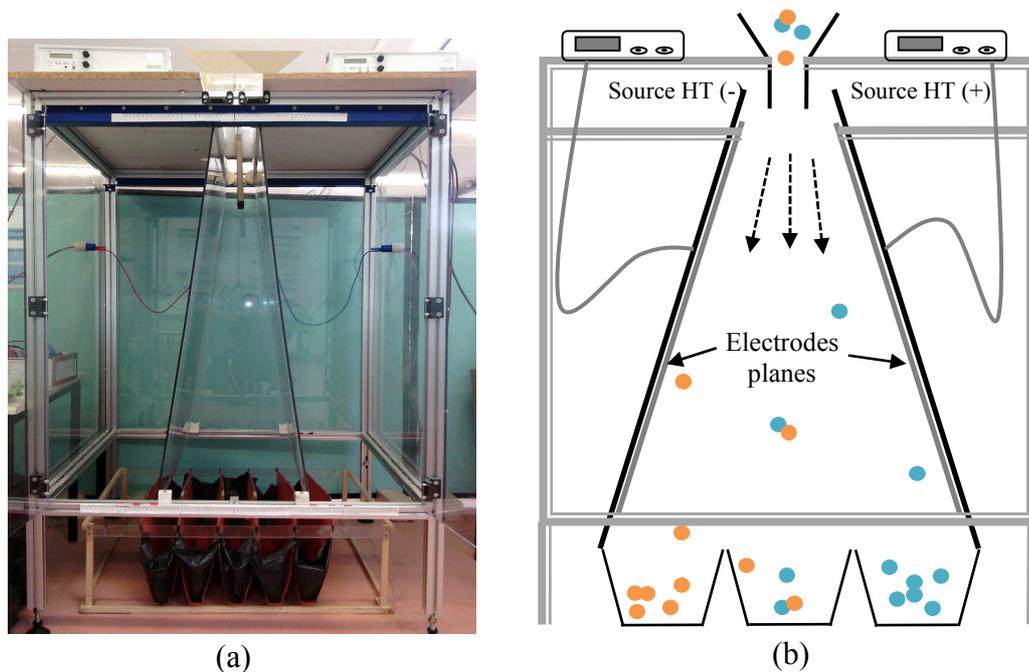


Figure I.16 : Séparateur triboélectrostatique à chute libre. (a) : Photographie du dispositif ; (b) : Schéma du dispositif.

- **Séparateur tribo-aéro-électrostatique**

Le principe de fonctionnement de ce procédé est basé sur l'effet triboélectrique, la force de Coulomb et la force image électrique. Les séparateurs tribo-aéro-électrostatique sont des dispositifs ayant le même mode de chargement (lit fluidisé), mais différent par leur technique de séparation, contrairement aux séparateurs électrostatiques à chute libre.

L'avantage de ces dispositifs est la simultanéité des deux opérations : Le chargement par effet triboélectrique et la séparation dans un champ électrique. La charge électrique est produite sur les matériaux granulaires isolants lors des collisions dans le lit fluidisé en ébullition (générée par un souffleur en direction verticale). La chambre de séparation est située proche de la zone de fluidisation de sorte que les électrodes attirent déjà les particules suffisamment chargées [46].

Deux parties sont nécessaires pour la construction et la mise en marche d'un dispositif tribo-aéro-électrostatique:

- Une chambre d'air liée à la soufflante : son rôle est d'assurer la bonne diffusion, l'uniformisation et la quantité d'air injecté à l'aide d'un diffuseur placé à sa partie supérieure.
- Une chambre de fluidisation et de séparation où les particules simultanément : se chargent tribo électriquement et se séparent dans un champ électrique intense sous l'action des forces d'attraction électriques.

A) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses

Les électrodes qui vont attirer la matière granulaire fluidisée sont constituées de deux bandes transporteuses du tapis roulant (**Figure I.17**).

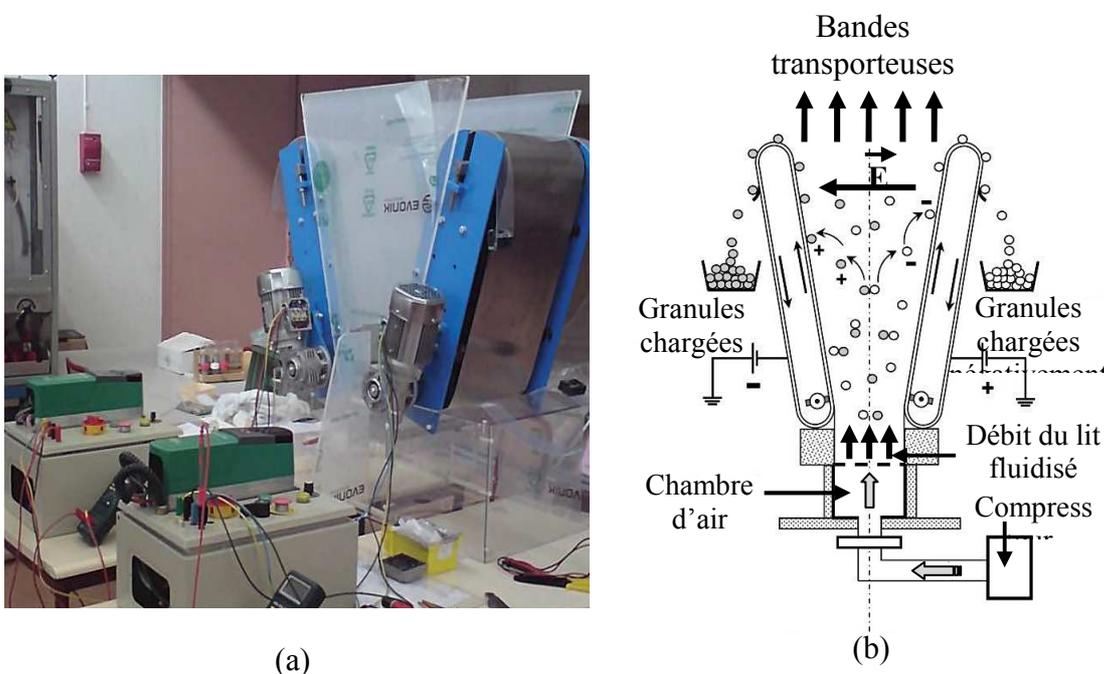


Figure I.17 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à bandes transporteuses. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif.

Les bandes transporteuses sont dans ce cas à base d'une matière conductrice, elles s'appuient sur des tambours isolants, leur entraînement est assuré par des moteurs triphasés alternatifs, commandés par des variateurs de fréquence. Soumis à l'action de la force d'image électrique, les granules chargés adhèrent à la surface des bandes de polarités opposées, qui les entraînent vers le collecteur de récupération des produits.

B) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournants

C'est une installation spécialement adaptée à la séparation des particules de plastique fines [47]. Deux disques métalliques sont montés sur un même arbre (**Figure I.18**), entraînés par un moteur électrique, afin de les tourner dans un mélange de particules plastiques fluidisé. Les deux disques qui sont alimentés à deux sources de haute tension et de polarités opposées, soulèvent les particules chargées. Des balais sont utilisés pour récupérer les particules collées aux disques.

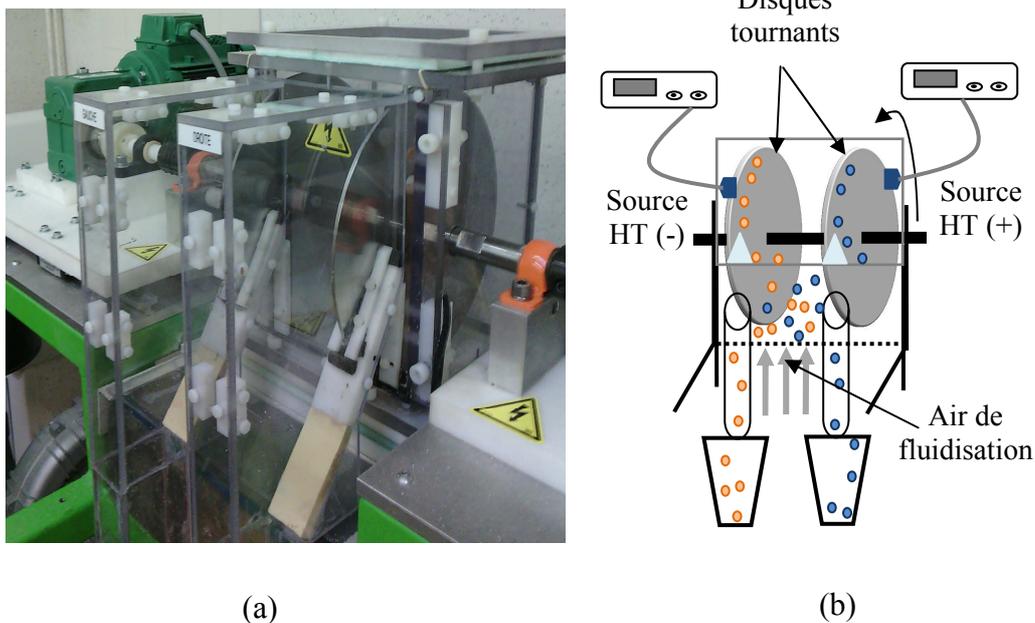


Figure I.18 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à disques tournant. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif.

C) Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales

Deux électrodes verticales collées à l'intérieur d'une enceinte parallélépipédique isolante équipée de parois transparentes pour visualiser le processus de séparation (**Figure I.19**), attirent les particules chargées de signe opposé et repoussent celles de même signe, pour les dévier vers les collecteurs [48].

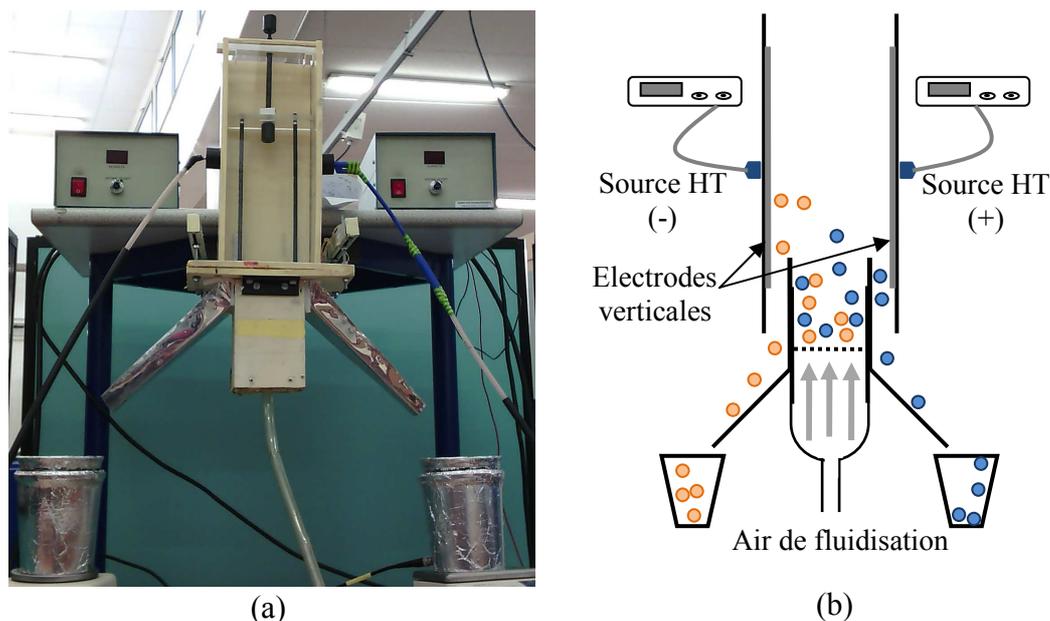


Figure I.19 : Séparateur tribo-aéro-électrostatique à électrodes verticales. (a) : Photographie du dispositif, (b) : Schéma du dispositif.

I.2.1.2 Performances des séparateurs électrostatiques

La séparation triboélectrostatique est absolument un procédé mécanique économiquement satisfaisant pour sa simplicité, appropriée pour le recyclage des déchets plastiques grâce à des forces électriques agissant sur des particules chargées. C'est une technique multifactorielle difficilement contrôlable. Le résultat final de cette technologie est donc fortement lié aux plusieurs paramètres, y compris les caractéristiques des mélanges isolants à séparer, comme : la taille, la forme, la masse et la rugosité de surface ...etc [49, 33], l'efficacité du dispositif de chargement [35, 43- 45], les paramètres du séparateur lui-même [35, 47, 50], et l'humidité relative [49, 51]. Malgré que des efforts apparents de recherches qui visaient à l'optimisation des performances des divers types de séparateurs électrostatiques. L'application industrielle d'une telle technologie a toujours des difficultés en raison de la multitude des paramètres de contrôles, et le mauvais ajustement de ces paramètres pourrait avoir des conséquences indésirables pour ce processus. La majorité des travaux (considérations théoriques, investigations expérimentales et modélisations numériques) ont été menés afin de trouver des solutions techniques et ajuster les divers paramètres contrôlables permettant l'amélioration des performances globales des séparateurs électrostatiques en termes de récupération et pureté des produits séparés. Les conceptions utilisées dans la séparation triboélectrostatique des déchets plastiques peuvent être grossièrement divisées en

trois types: champ électrique à chute libre, champ électrique à tapis roulant et champ électrique vertical pour les particules fluidisées ascendantes.

I.2.2 Décharges à barrières diélectriques

I.2.2.1 Un peu d'histoire

Les décharges à barrière diélectrique sont connues depuis plus d'un siècle. Les premières investigations expérimentales de ce type de décharge, qui se sont concentrés sur la production d'ozone, ont été signalées en 1857 par le physicien *Werner Von Siemens* [52]. Il a soumis un flux d'oxygène, ou d'air, à l'influence d'une décharge à barrière diélectrique (DBD) maintenue dans un espace annulaire étroit entre deux tubes de verre coaxiaux où un champ électrique alternatif a été appliqué. Ce dispositif présentait la nouveauté d'avoir des électrodes installées à l'extérieur de la chambre où se produit la décharge et donc sans aucun contact avec le plasma (**Figure I.20**). *Werner Von Siemens* a considéré sa configuration de décharge pour la génération de l'ozone comme l'une de ses inventions les plus importantes. En 1860, *Thomas Andrews* et *Peter Tait* [53], ont proposé le nom de « décharge silencieuse », qui est encore fréquemment utilisé dans la littérature scientifique. La formation d'ozone et d'azote dans les décharges à barrière diélectrique est devenue un problème de recherche important pendant de nombreuses décennies [54]. Au début du 20^{ème} siècle, *Emil Warburg* en 1904 a mené de nombreuses études de laboratoire sur la nature de la décharge silencieuse [55]. Une des caractéristiques importantes des décharges était découverte par l'ingénieur électricien *K. Buss* [56] qui a met en évidence la nature filamentaire des décharges lorsque l'air sous pression atmosphérique est injecté entre des électrodes planaires parallèles recouvertes par des diélectriques.

Jusqu'à nos jours, la génération d'ozone pour le traitement de l'eau constitue la principale application industrielle des décharges à barrière diélectrique. Cependant, les applications de cette décharge continuent à s'élargir. En effet, elles ont été proposées pour le contrôle de l'écoulement des flux [57], l'élimination de charge [58, 59], la dépollution [60] et le traitement de surface [61], etc.

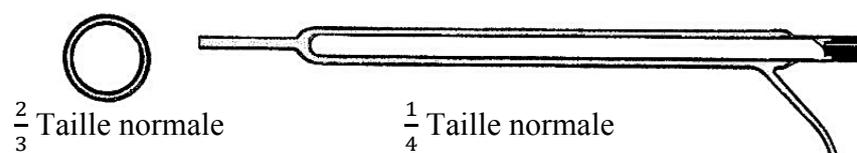


Figure I.20 : Tube à décharge d'ozone de *W. Siemens*, 1857 [52].

I.2.2.2 Principe de fonctionnement des DBD

Dans une décharge dans l'air de type couronne par exemple, la formation des charges d'espace peut conduire à des arcs électriques, ce qui limite l'augmentation en tension dans ce cas. Les arcs électriques peuvent présenter un problème pour le matériau qui les subit, mais aussi dans le cas où ceux-ci sont indésirables, comme par exemple dans un environnement à risque. Ainsi, une solution simple consiste à disposer au moins un matériau diélectrique solide entre les deux électrodes métalliques afin de limiter l'énergie qui passe dans chaque canal de décharge et ainsi d'éviter le passage à l'arc. La configuration qui permet de générer cette décharge s'appelle « Décharge à Barrière Diélectrique » est montrée sur la **Figure I.21**.

Avec ce type de décharge, la tension alternative est souvent utilisée de façon à annihiler l'accumulation des charges présentes à la surface du diélectrique au début de chaque alternance. Lorsque l'on utilise une alimentation alternative, ou continue, la montée en tension se fait progressivement jusqu'à atteindre le potentiel d'ionisation ce qui conduit à la décharge. Si la tension suffisamment élevée est appliquée dans un temps court (typiquement inférieure à la microseconde), seuls les électrons auront le temps d'être accélérés dans la zone de décharge, à l'inverse des ions qui ont une mobilité électrique plus faible due à leurs poids [62].

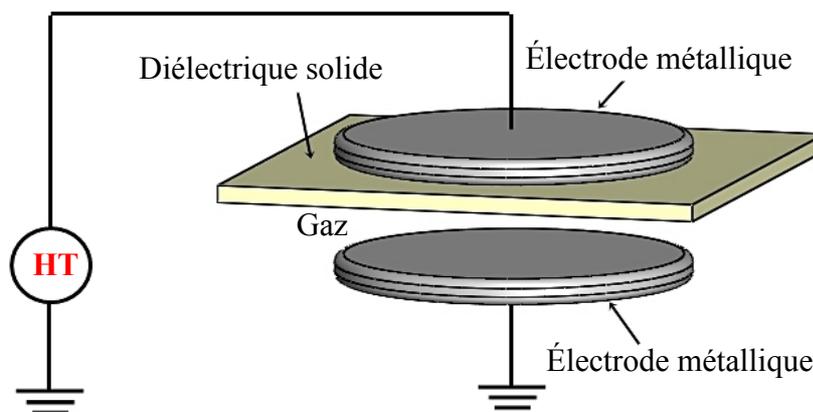


Figure I.21 : Configuration classique d'une DBD de volume.

Lors de l'application d'une tension suffisamment élevée entre les électrodes du système de DBD, le claquage du gaz conduit à la formation d'un canal conducteur appelé micro-décharge (**Figure I.22(a)**). Cette micro-décharge peut être représentée par le schéma équivalent de la **Figure I.22(d)**, le matériau diélectrique placé entre les deux électrodes métalliques se comporte comme un isolant d'un condensateur C_d . Sur la **Figure I.22(d)**, on note que V_{app} : la tension appliquée sur la cellule de décharge, V_d : la tension aux bornes du

matériau diélectrique solide et enfin V_g : la tension aux bornes du gaz. Le passage du courant induit une accumulation des charges sur la surface du diélectrique en vis-à-vis du canal de décharge ce qui conduit à l'augmentation de la tension V_d . Si cette augmentation, au fur et à mesure du développement de la décharge, est plus rapide que l'augmentation de la tension V_a , elle cause une chute de la tension appliquée sur le gaz V_g , ce qui conduit à l'extinction de la décharge. Ainsi, la micro-décharge est bloquée bien avant d'avoir atteint un degré d'ionisation suffisant pour transiter en régime d'arc. Pendant que la tension appliquée augmente, des micros décharges s'initient à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique appliqué sur le gaz aux positions où des micro-décharges se sont déjà développées (**figure I.22(b)**). A l'inversion de la polarité appliquée aux électrodes (**Figure I.22(c)**), les charges précédemment déposées à la surface du diélectrique permettent un claquage du gaz sous un champ plus faible que lors de la première phase : $V_g = V_a - V_d$ (avec V_a et V_d de signes contraires lors du changement de polarité) [63].

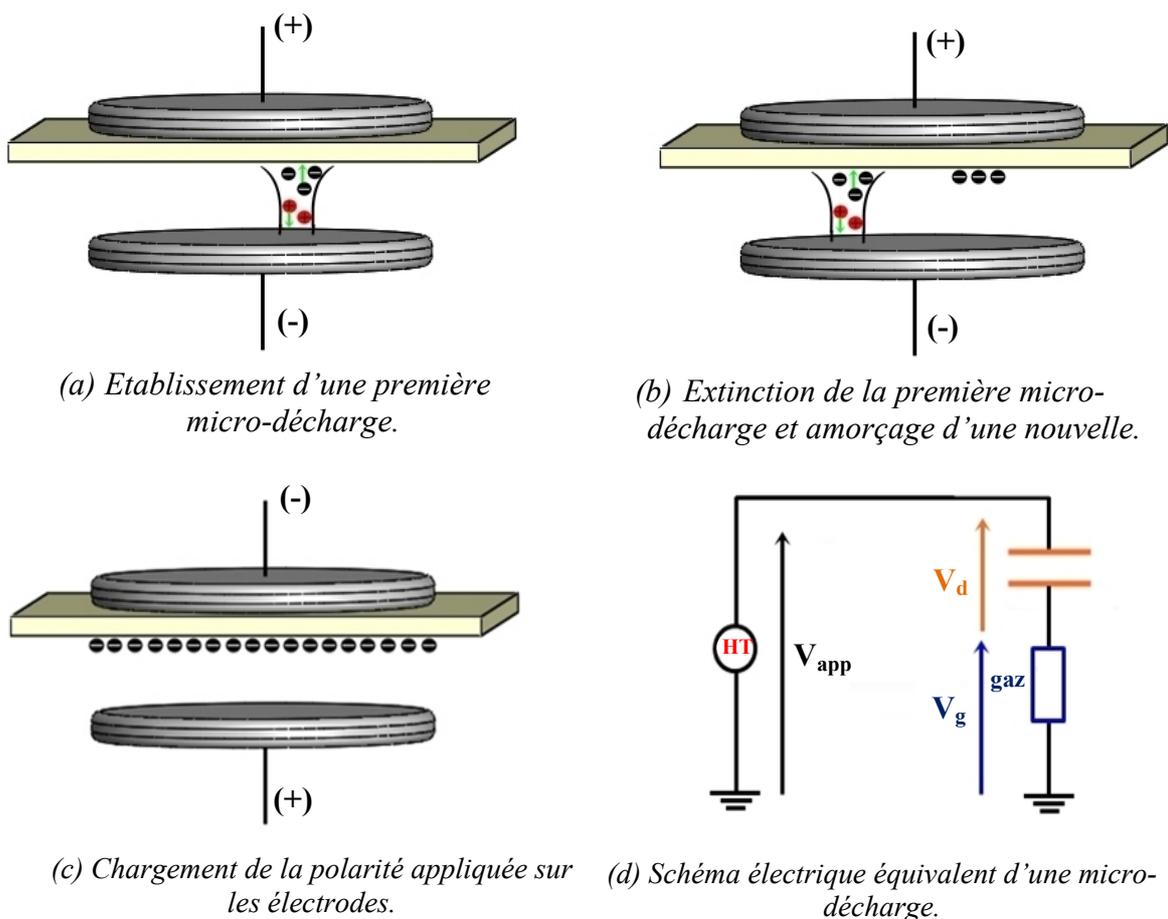


Figure I.22 : Principe de fonctionnement d'une décharge à barrière diélectrique (DBD).

I.2.2.3 Configurations d'électrodes

La configuration classique de DBD est présentée sur la **Figure I.21**. En plus, il existe différentes configurations de DBD de volume habituellement utilisées. Les configurations des électrodes coplanaires et cylindriques typiques sont illustrées sur la **Figure I.23**.

Le choix de configuration dépend de type de matériau à traiter (solide ou gaz), les configurations co-planaires (**Figure I.23(a)** et **Figure I.23(b)**) sont généralement utilisées pour le traitement de surfaces des matériaux solides, tandis que les cylindriques (**Figure I.23(c)** et **Figure I.23(d)**) sont plus adaptées aux traitements de gaz. L'arrangement plan-plan de la **Figure I.23(a)** présente l'avantage d'éviter tout contact entre le plasma et les électrodes métalliques, conditions parfois utiles de l'usage de plasma corrosif par exemple. La configuration de la **Figure I.23(b)** permet l'obtention simultanée d'une décharge de part et d'autre du diélectrique, propriété intéressante lorsque la barrière diélectrique constitue le matériau à traiter.

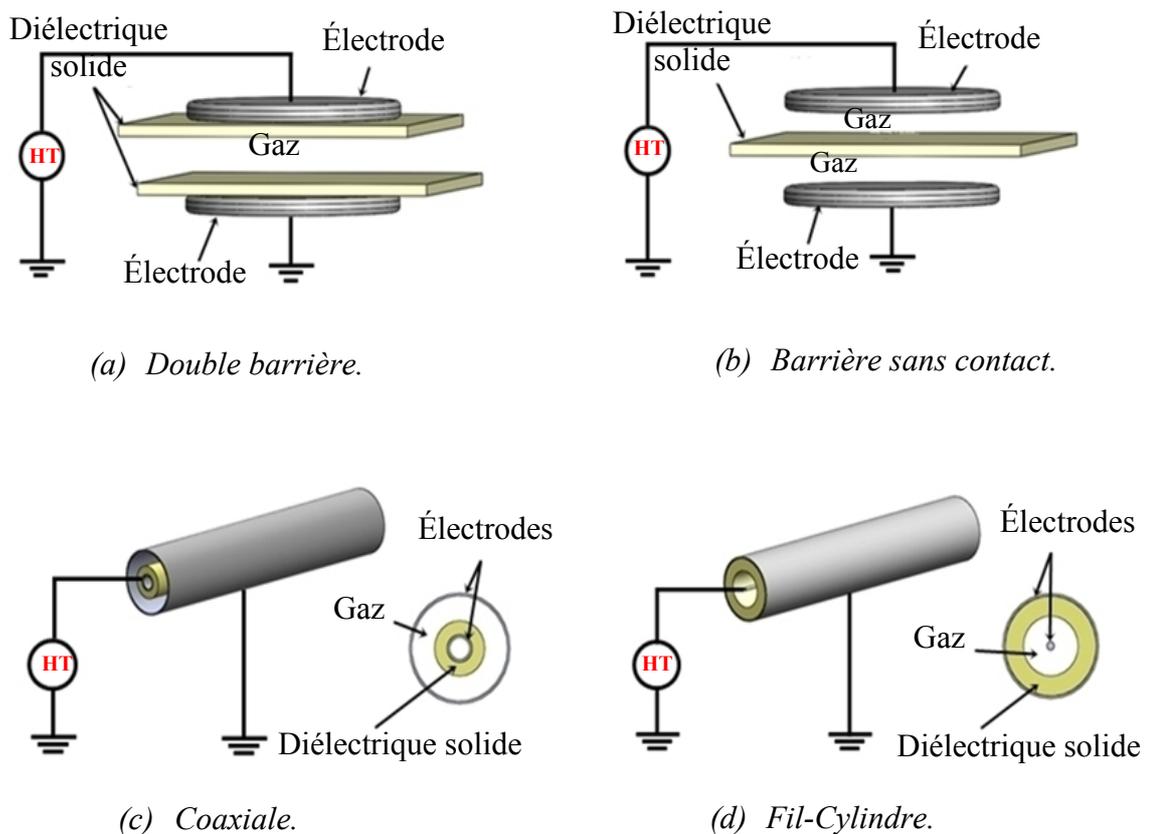


Figure I.23 : Différentes configurations géométriques propices à la formation des décharges contrôlées par barrières diélectriques (DBD).

I.2.2.4 Régimes de décharge et propriétés électriques

Suivant les différentes configurations géométriques, le type d'excitation électrique et les gaz utilisés, les régimes de décharge observés à pression atmosphérique sont essentiellement le régime filamentaire de type *Streamer* et le régime homogène (de *Townsend* ou *luminescente*). La **Figure I.24** représente des photographies rapides de l'espace inter-électrode d'une DBD de volume à pression atmosphérique avec une excitation AC.

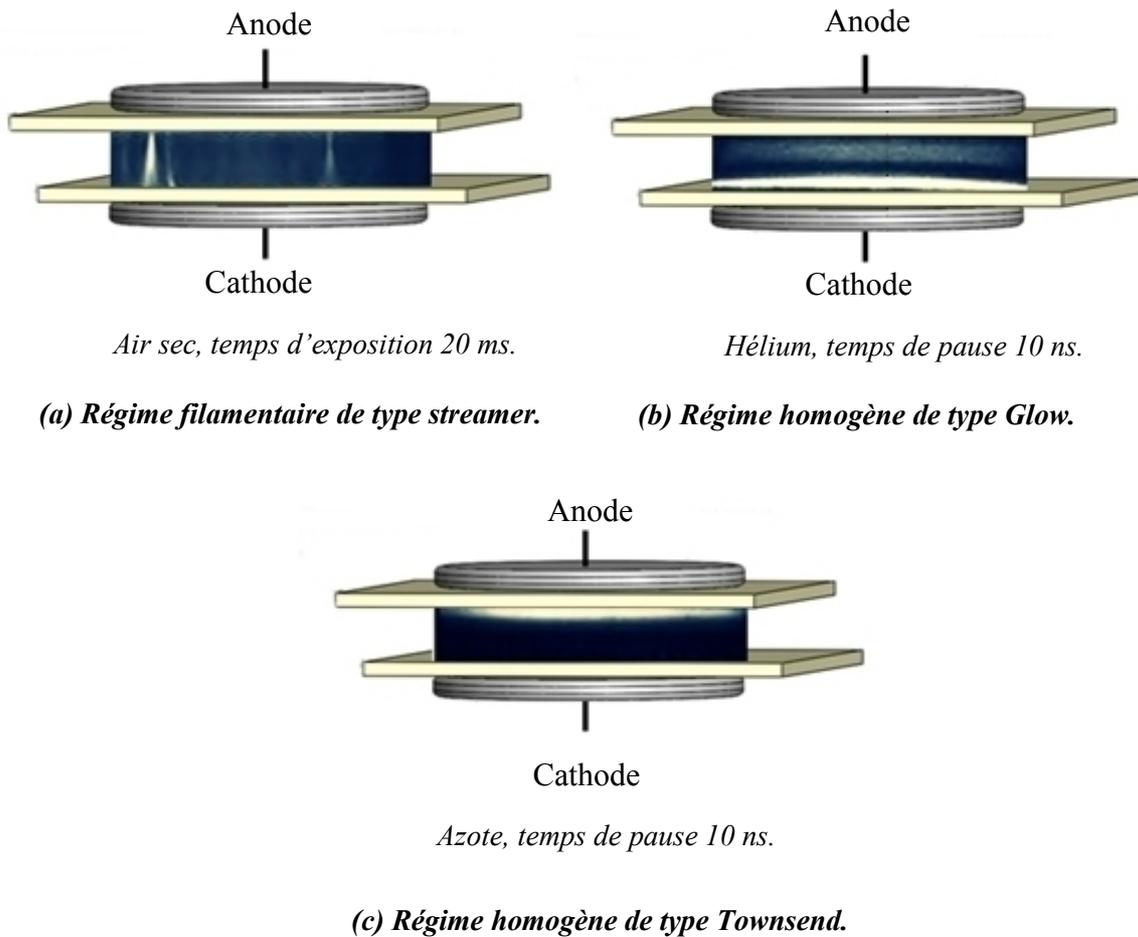


Figure I.24 : Différents régimes des DBD de volume à pression atmosphérique [64].

A - Régime filamentaire

Généralement, le régime de décharge observé dans le cas des DBD à pression atmosphérique est le régime filamentaire. Ce régime se traduit par une multitude de micro-décharges, qui se répartissent aléatoirement sur la surface des électrodes, initiés par un claquage de type streamer (**Figure I.24(a)**). Le régime filamentaire est caractérisé par la

création d'une multitude de streamers qui se développent indépendamment les uns des autres, et conduit à la formation de micro-décharges.

La **Figure I.25** montre un exemple de la forme d'onde du courant et de la tension dans le cas d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale. Chaque micro-décharge induit une impulsion de courant d'une durée moyenne de quelques dizaines de nanosecondes visibles sur l'oscillogramme du courant.

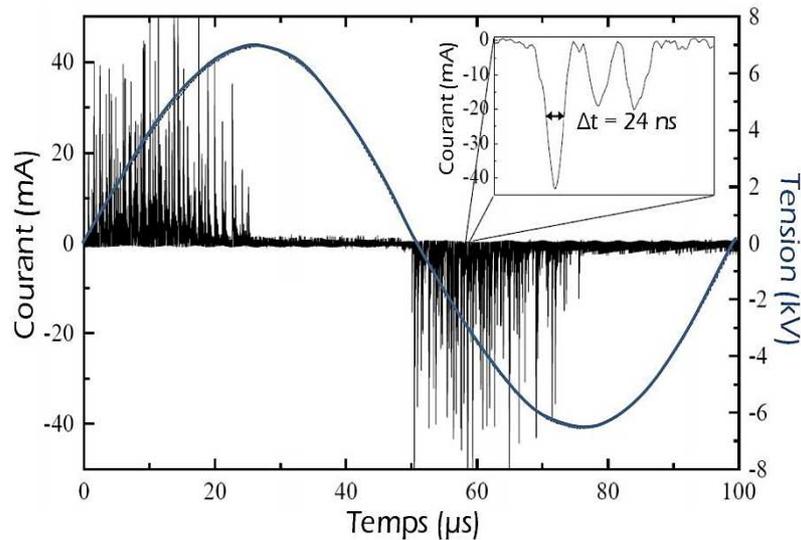


Figure I.25 : Formes d'ondes électriques d'une décharge filamentaire sous excitation AC sinusoïdale ($V = 13 \text{ kV}$, $f = 10 \text{ kHz}$) [65].

Les principales caractéristiques des micro-décharges observées généralement dans le cas d'une DBD à pression atmosphérique sont récapitulées dans le tableau suivant [66].

Tableau I.2 : Ordres de grandeurs des caractéristiques d'un canal de décharge filamentaire.

Durée (ns)	1 - 10
Vitesse de propagation (cm.s^{-1})	10^8
Rayon d'un filament (mm)	0.1
Densité de courant (A.cm^{-2})	100 – 1000
Densité électronique (cm^{-3})	$10^{14} - 10^{15}$
Energie électronique moyenne (eV)	1 – 10

B - DBD homogène de type Glow

Bien que le régime de décharge d'une DBD à la pression atmosphérique soit normalement de type filamentaire, il est possible sous certaines conditions d'obtenir une décharge homogène de grand rayon. En 1969, *R. Bartnikas* a utilisé l'hélium comme un gaz entre les électrodes de la décharge, il observait un régime différent du régime filamentaire classique [67]. Cette décharge est caractérisée par un seul pic de courant par demi-période en tension AC. Ceci suggère un développement unique de la décharge dans tout l'espace inter-électrodes (**Figure I.24(b)**).

La **Figure I.26** montre la forme d'onde de la tension et du courant d'une décharge homogène de type Glow (luminescente) sous excitation AC sinusoïdale. L'allure des formes d'ondes permet de constater qu'une fois la décharge amorcée, la tension appliquée sur le gaz diminue alors que le courant continue à augmenter.

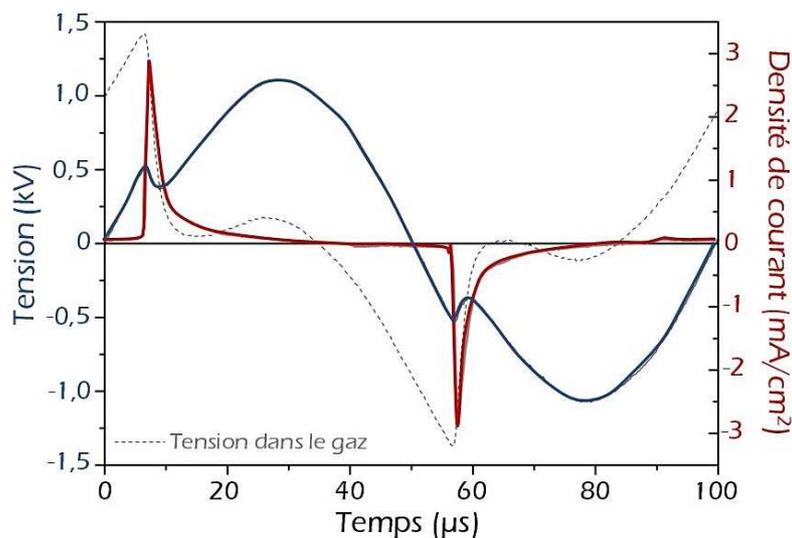


Figure I.26 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Glow à 10 kHz [68].

C - DBD homogène de type Townsend

En 1992, *Roth et al* ont démontré l'existence d'un régime homogène à la pression atmosphérique de type Townsend [69, 70]. Cette décharge (**Figure I.24(c)**) est aussi caractérisée par un seul pic de courant par demi-période en AC, mais ce pic de courant dans ce régime de décharge est plus étendu (**Figure I.27**).

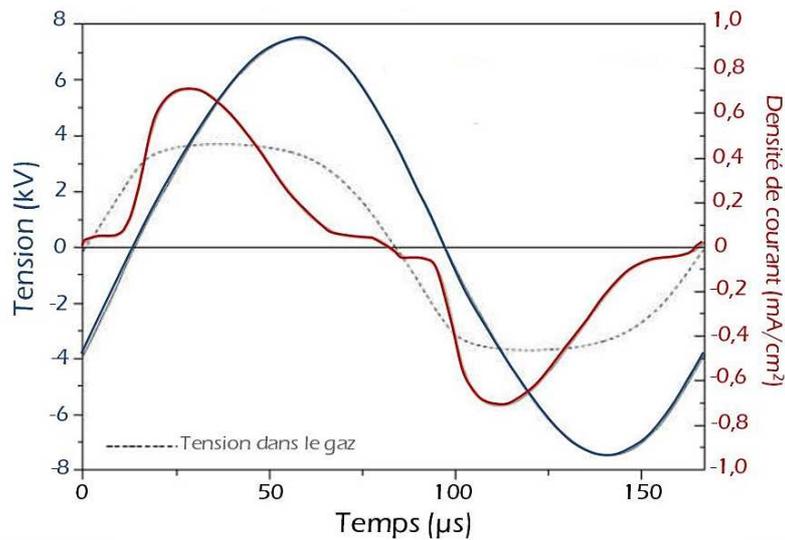


Figure I.27 : Formes d'ondes électriques d'une décharge homogène de type Townsend [68].

I.2.3 Procédés plasma pour le traitement de surface des polymères

Les décharges à barrière diélectrique ont un grand potentiel dans les applications industrielles telles que le traitement par le plasma, la génération de l'ozone, la modification de surfaces des matériaux et le dépôt de film. Malgré le fait que les matériaux polymères aient de nombreuses excellentes caractéristiques, cependant certains polymères ont des surfaces chimiquement inertes, non poreuses, en plus de leurs faibles énergies de surface (hydrophobie). Ces inconvénients peuvent provoquer des problèmes pour plusieurs applications industrielles telles que la peinture, l'impression et la métallisation...etc, qui nécessitent une bonne propriété d'adhésion des polymères [71]. Le traitement de surface des polymères est une technique qui permet de palier à ces inconvénients, ce qui rend les surfaces réceptives au collage avec des encres d'imprimerie, des adhésifs, ou des enduits. Le traitement de surface a plusieurs rôles [72] :

- Création de fonctions chimiques pour favoriser les interactions chimiques à l'interface.
- Modification de l'énergie de surface afin d'augmenter ou de diminuer l'hydrophilicité.
- Modification de la morphologie de surface (création de rugosité afin d'augmenter la surface de contact à l'interface).
- Amélioration de l'inertie chimique.
- Augmentation de la conductivité électrique de surface.
- Modification de la réticulation de la surface.
- Augmentation de la lubricité de surface.
- Diminution du coefficient de frottement.

- Elimination des contaminants (revêtements provenant de la mise en forme, pollution organique...).

I.2.3.1 Traitement de surface par les plasmas froids

Un traitement de surface se définit par la modification des propriétés de surface d'un matériau en conservant les propriétés volumiques du matériau de base. Les plasmas froids présentent un fort potentiel pour cette application. Le traitement de surface des matériaux polymères par les espèces énergétiques, créées au sein du plasma (photons, ions, molécules ou atomes excités), présente un fort potentiel qui conduit à la rupture des liaisons covalentes à la surface (coupure des chaînes macromoléculaires) et à la formation de radicaux libres. Ces espèces n'ont pas suffisamment d'énergie pour pénétrer dans le matériau, elles réagissent avec les espèces actives du plasma d'où il résulte à la surface des matériaux la formation de groupements chimiques fonctionnels dépendant de la nature de la phase gazeuse.

Depuis la fin des années 1960, les applications des procédés plasma sur les matériaux ont été principalement poussées et améliorées par l'industrie de la microélectronique, particulièrement au niveau du *décapage/gravure* par plasma de métaux et semi-conducteurs, appelée « *ablation légère* » pour les polymères tels que des résines photosensibles [73, 74] et du *dépôt* de couches minces de matériaux [75]. En plus, la *modification* ou *l'activation* de surface est considérée comme un troisième type de procédé plasma de traitement de surface, en fait, seules la composition et la structure de quelques couches moléculaires de la surface sont modifiées par le plasma.

Les technologies de plasma sont utilisées dans de nombreux domaines des polymères, de l'imprimerie afin de permettre une meilleure adhésion de l'encre aux biomatériaux pour améliorer leurs « biocompatibilités » ou l'augmentation de la mouillabilité. Pour ces applications, la densité des groupements chimiques sur la propriété voulue est évidemment importante. Quand le groupement spécifique est visé (COOH, NH₂, etc.), le type de procédé plasma de traitement de surface est appelé *fonctionnalisation* de surface [76, 77].

De nos jours, plusieurs applications industrielles telles que les agro-alimentaires, les micro-électroniques et les aérospatiales imposent fortement les procédés de plasma, la plupart de ces applications nécessitent l'emploi d'un système de pompage (un gaz spécifique) souvent coûteux et peu adapté à la réalisation du traitement. Le traitement de surface par plasmas froids peut être facilement généré dans l'air atmosphérique, en utilisant des systèmes d'électrodes simples.

I.2.3.2 Avantages et inconvénients de l'utilisation des plasmas froids

L'utilisation des plasmas froids offre plusieurs avantages mais présentes aussi quelques inconvénients [78, 79].

- **Les avantages**

- ✓ Il est possible de choisir le type de modification chimique à apporter à la surface du polymère traité par le choix du gaz utilisé.
- ✓ Le traitement par le plasma froid permet de modifier la surface sans affecter les propriétés intrinsèques en volume du matériau traité. Typiquement, la profondeur de pénétration est de quelques centaines d'Angströms, selon le temps de traitement, le niveau de puissance et la nature du matériau.
- ✓ Le traitement par le plasma froid permet de nettoyer la surface, de changer la topographie, de déposer une couche mince dans un temps court (de quelques secondes à quelques minutes).
- ✓ On peut contrôler la composition et la structure du film déposé.
- ✓ Il est possible de traiter un matériau et de déposer une couche mince successivement, sans avoir à le remettre en contact avec l'air, ce qui évite toute recontamination et réoxydation.

- **Les inconvénients**

- ✓ Les paramètres du traitement sont très dépendants du système utilisé (chaque système a ses propres paramètres optimum).
- ✓ Les mécanismes physiques qui régissent les plasmas sont très complexes, la compréhension des phénomènes présents aussi bien dans la décharge gazeuse qu'à l'interface matériau-plasma, est encore limitée.

I.2.3.3 Interactions plasma-surface et modifications de surface de polymère

Durant la technique du traitement de surface des matériaux polymères par le plasma, des réactions élémentaires à la surface ont été étudiées par plusieurs groupes de recherches. Généralement, les ions, les photons et les radicaux jouent un rôle dans le transfert d'énergie du plasma à la surface du matériau traité [80, 81].

On distingue quatre types d'interactions avec la surface : Interactions des ions positifs, des radicaux et des neutres, des ions négatifs et des électrons et des photons avec la surface du matériau (**Figure I.28**).

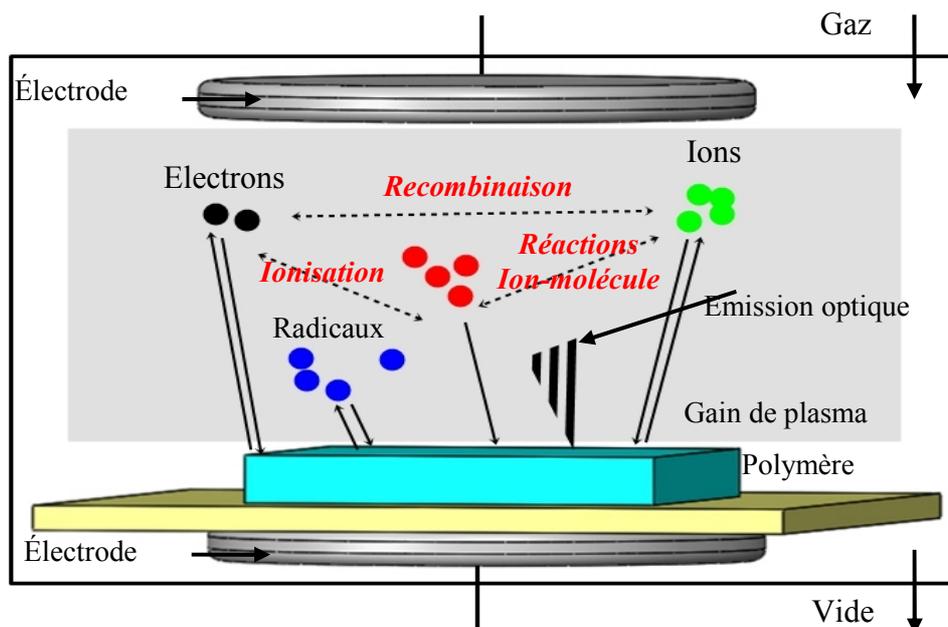


Figure I.28 : Schéma indiquant les différentes interactions plasma-surface [82].

- **Interactions des ions positifs avec la surface**

À l'intérieur du plasma, les ions ont plutôt des énergies moyennes proches de la température ambiante du gaz, lors de leur collision avec la surface d'un matériau solide. Ils peuvent causer des changements importants des propriétés de l'état de surface. L'énergie de l'ion crée une cascade de mouvement des atomes dans le réseau. Ces atomes qui acquièrent de l'énergie pour surpasser l'énergie de surface sont éjectés de celle-ci. Plusieurs méthodes utilisées pour le traitement de surface mettent à profit le bombardement d'ions positifs très énergétiques qui peuvent atteindre des énergies de l'ordre de 10 et 1000 eV sur la surface [83].

- **Interactions des ions négatifs et électrons avec la surface**

Dans la discussion des traitements de surface des matériaux par plasma, l'impact de l'interaction des ions négatifs et les électrons avec la surface est souvent négligé car le potentiel de la décharge est souvent plus positif que le potentiel des surfaces en contact avec la décharge. Les ions négatifs et les électrons sont incapables d'atteindre la surface traitée due aux forces électrostatiques. L'effet des ions négatifs et des électrons n'est pas totalement négligeable [83], puisqu'il est possible d'observer l'impact des ions négatifs dans certaines décharges à basse fréquence dans des gaz électronégatifs.

- **Interactions des radicaux et des neutres avec la surface**

En plus du processus de génération des ions positifs, négatifs et les électrons par le plasma, ce dernier permet aussi de produire des flux uniformes assez importants de neutres et de radicaux sur la surface [84]. Cet aspect des plasmas est tout aussi important pour le traitement de surface que le bombardement ionique. Puisque ces interactions peuvent être clairement sélectives chimiquement, il est possible de modifier les propriétés de la surface d'une façon contrôlée en fonction des gaz utilisés.

- **Interactions des photons avec la surface**

Les photons sont générés par les différentes collisions dans le plasma. Ils jouent aussi un rôle important dans le transfert d'énergie du plasma à la surface du matériau traité. Par la couleur de la décharge on peut même parfois distinguer le type du gaz utilisé.

Les photons ont des énergies allant de l'ultraviolet de très haute énergie (vacuum UV ou VUV, $\lambda < 180$ nm) à l'infrarouge lointain [85]. Pour les matériaux polymères, les photons de cette gamme d'énergie interagissent significativement avec leurs surfaces et donc leurs impacts sont importants. Par exemple, les radiations infrarouges ne changent pas l'état de surface du polymère mais peuvent être absorbées et dissipées sous forme de chaleur dans le polymère. Par contre, les radiations VUV peuvent être fortement absorbées par les polymères et provoquent la rupture de leurs liaisons chimiques [86].

I.3 Conclusions

1. La génération de charges par effet triboélectrique est un phénomène extrêmement complexe et mal expliqué, et est influencée par plusieurs facteurs externes et internes.
2. Il existe plusieurs dispositifs de chargement triboélectrique dont l'efficacité a déjà été prouvée pour des applications particulières.
3. L'approche expérimentale qui utilise l'effet triboélectrique, comme technique de chargement électrostatique des polymères, est nécessaire et irremplaçable pour l'étude de la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants en utilisant les forces des champs électriques.
4. Des efforts importants de recherche ont visé l'optimisation des performances des divers types de séparateurs électrostatiques des matériaux granulaires isolants (à chute libre, à tapis roulant, à lit fluidisé) en raison de la multitude des paramètres de contrôles.
5. La DBD à pression atmosphérique est un type de plasma froid qui est à l'état hors équilibre thermodynamique, elle a un grand potentiel dans les applications industrielles.
6. Certaines études réalisées sur le traitement de surface des polymères par la DBD montrent que cette technique pourrait modifier l'état de surface de ces matériaux et ainsi le comportement du chargement triboélectrique des matériaux plastiques granulaires. C'est dans cette optique que s'inscrit cette thèse dont l'objectif est d'étudier le tribochargement des matériaux traités d'une part et les conséquences sur le processus de séparation électrostatique d'autre part.

CHAPITRE II
INSTALLATIONS ET METHODES
EXPERIMENTALES

Chapitre II Installations et méthodes expérimentales

Les expériences menées durant cette thèse sur le traitement de surface par le plasma, le chargement triboélectrique ainsi que la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants ont été réalisées sur plusieurs types de produits : des matériaux granulaires isolants de taille millimétrique fournis par la société APR2 (*Atelier Pro Réseaux Recyclage*), spécialisée dans le recyclage des équipements obsolètes et des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE). Des matériaux issus du recyclage de déchets ont été fournis par la société française RECYMAP (*Recyclage de Matières Plastiques*); une société spécialisée dans la production de matières premières secondaires par recyclage des déchets en matière plastique dure collectés en déchèteries. Les caractéristiques des matériaux granulaires ayant fait l'objet de nos études sont présentées dans § II.1.

Les dispositifs expérimentaux présentés dans § II.2 ont été conçus et réalisés à l'institut PPRIME - France et au sein de Laboratoire de Génie Electrique de Guelma - LGEG - Algérie. Par ailleurs, les divers techniques de mesure utilisées et les procédures expérimentales qui ont permis d'évaluer l'efficacité du traitement par le plasma ainsi que la mesure de la charge sont exposées dans § II.3.

II.1 Matériaux granulaires isolants

Nous avons réalisé nos expériences sur plusieurs mélanges de matériaux granulaires isolant-isolant, traités par la société APR2 (§ II.1.1), issus essentiellement du broyage de déchets fournies par la société RECYMAP (§ II.1.2).

II.1.1 Matériaux fournies par la société APR2

Ces matériaux sont : le Polychlorure-de-polyvinyle, le Polypropylène, le Polyamide et le Polycarbonate.

- **Chlorure de polyvinyle (PVC)**

Le Chlorure de polyvinyle est un polymère thermoplastique polyvalent et très résistant aux produits chimiques [87], comme l'acides, les solvants, l'hydrocarbures aliphatiques.

Sa composition est répartie : 57 % de sel et 43 % de pétrole. Ce matériau possède une grande stabilité dimensionnelle due à une absorption d'eau minime. Il est recyclable et peut se fabriquer dans de multiples finitions et couleurs. Le PVC est l'un des matériaux plastique le plus utilisés dans des divers secteurs industriels, tels que, la fabrication des tuyaux de canalisation, les carcasses de produits électriques, électroniques et informatiques, l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil.

- **Polypropylène (PP)**

Le Polypropylène est un thermoplastique de grande diffusion, il offre de bonnes qualités de résistance chimique, thermique et électrique et une rigidité diélectrique élevée. Il a une reprise d'humidité très faible [87]. Le PP est l'un des plastiques les plus utilisés dans de nombreux secteurs en particulier dans l'emballage, l'industrie automobile (batteries, vases d'expansion), l'électroménager, le sanitaire et le textile. Sa production représente plus du cinquième des plastiques produits dans le monde.

- **Polyamide (PA)**

Le polyamide est un polymère thermoplastique représente approximativement 4% de la consommation totale des polymères [88]. Il se caractérise par une haute résistance mécanique, rigidité, une faible reprise d'humidité, des bonnes propriétés mécaniques et une excellente résistance à l'usure. Ses bonnes caractéristiques permettent de l'utiliser dans des domaines industriels de plus en plus variés, tels que l'électronique, l'automobile, l'industrie des sports et des loisirs.

- **Polycarbonate (PC)**

Le polycarbonate est une matière plastique caractérisé par une surface lisse, une excellente résistance aux vibrations et chocs, une grande rigidité dans une large plage de température, des excellentes propriétés électriques et diélectriques, à l'exception du cheminement de l'arc, mais la perte diélectrique dépend beaucoup de la fréquence [87]. Le PC est généralement utilisé dans la fabrication de certains composants extérieurs des automobiles, l'électromécanique et l'électroménager. Son large utilisation dans l'industrie n'est pas due seulement à ses excellentes caractéristiques, mais aussi parce que son traitement est écologique et peut être recyclé.

L'aspect des particules de PA, de PC, de PVC et de PP faisant l'objet de l'étude peuvent être examinées sur la **Figure II.1**.

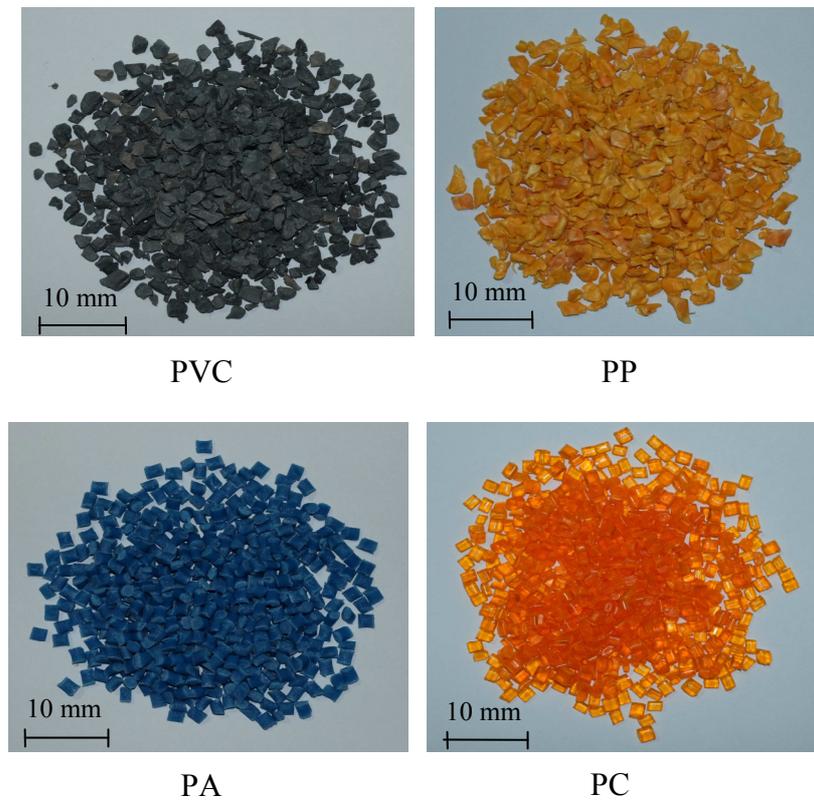


Figure II.1 : Aspect des matériaux granulaires fournis par la société APR2.

Le **Tableau II.1** représente les principales caractéristiques de matériaux granulaires utilisés dans les expériences [89, 90, 91].

Tableau II.1 : Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés.

Matériau	PVC	PP	PA	PC
Densité [g/cm ³]	1.42	0.91	1.14	1.2
Couleur	Gris	Jaune	Bleu	Orange
Forme	Aléatoire	Aléatoire	Cylindrique	Cylindrique
Taille [mm]	Ø 2 x 4	Ø 2 x 6	Ø 2.5 x 3.4	Ø 3 x 3.6
Masse [mg]	25	20	20	25
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 % [%]	0.2	0.01	3	0.15
Résistance à la traction [N/mm ³]	45	50	70	70
Rigidité diélectrique [kV/mm]	40-50	35 - 40	28-30	28
Résistivité transversale [Ω/cm]	10 ¹⁶	10 ¹⁶	10 ¹⁵	10 ¹⁵
Constante diélectrique	2.1	2.2	3.7	3

II.1.2 Matériaux fournis par la société RECYMAP

Les expériences de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique des matériaux traités par la DBD plasma ont été effectuées sur deux matériaux granulaires isolants fournis par la société française de Recyclage de Matières Plastiques (RECYMAP) : polychlorure de vinyle et Polypropylène.

L'aspect et les caractéristiques des particules de PVC et de PP faisant l'objet de l'étude sont respectivement montré sur la **Figure II.2** et le **Tableau II.2**.

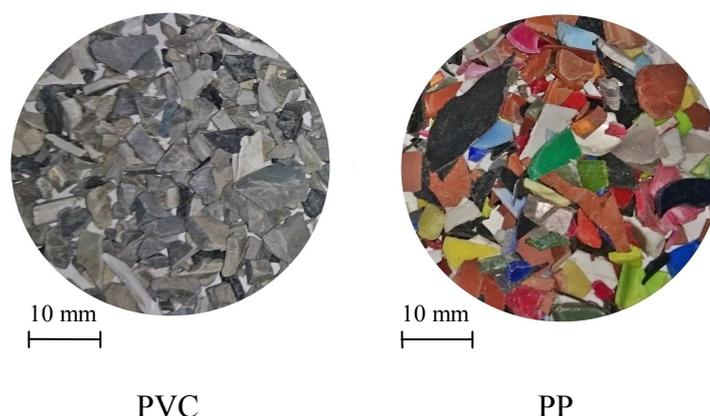


Figure II.2 : Aspect des matériaux granulaires fournis par la société RECYMAP.

Le **Tableau II.3** représente les principales caractéristiques de matériaux granulaires utilisés dans les expériences.

Tableau II.2 : Caractéristique principales des matériaux granulaires utilisés.

Matériau	PVC	PP
Couleur	Gris	Multi couleurs
Forme	Sphérique	Petite plaque
Taille [mm]	Ø 4 x 10	Ø 7 x 14
Masse [mg]	80	60

II.2 Installations de laboratoire

La séparation électrostatique est une technique qui se révèle efficace dans le tri de matériaux granulaires isolants selon leurs caractéristiques physiques, en faisant appel aux forces qui s'exercent sur les particules chargées ou polarisées, en champ électrique intense. La plupart des séparateurs utilisent l'effet tribo-électrique comme mécanisme de charge. En

outre, la décharge couronne et la décharge à barrière diélectrique, sont utilisées dans notre étude comme des techniques de traitement de surface des granules avant leur chargement par effet triboélectrique. Nous présentons dans cette section les installations de traitement de surface par le plasma et les instruments qui ont été mises en œuvre pour étudier les processus de tribochargement et la séparation des matériaux traité par le plasma.

II.2.1 Dispositif de traitement de surface par le plasma

II.2.1.1 Dispositif de décharge couronne

La décharge par effet couronne est générée par un système d'électrode fil-plan alimenté par des alimentations haute tension continue ou alternative. Le matériau granulaire est déposé sur une plaque métallique (aluminium, dimensions: 120 mm x 90 mm) reliée à la terre. L'électrode « dual » utilisée dans toutes les expériences est positionnée au-dessus du diélectrique; il consiste en un fil de cuivre (0,2 mm de diamètre) attaché à un cylindre en cuivre (25 mm de diamètre) et placé à 34 mm de son axe. L'électrode double est alimentée soit par un amplificateur haute tension (modèle Trek 30/20A), délivrant une tension alternative, soit par une alimentation haute tension continue positive ou négative. La **Figure II.3** illustre le système d'électrode « dual » fil-plan employé pour le traitement des matériaux isolants.

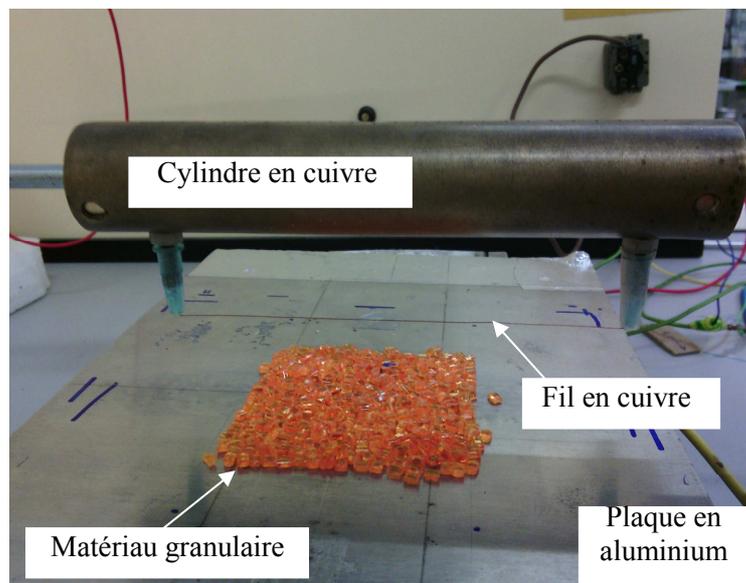


Figure II.3 : Dispositif expérimental pour le traitement de surface des matériaux isolants par la décharge couronne: configuration fil – plan.

II.2.1.2 Dispositif de décharge à barrière diélectrique

Le traitement de surface des matériaux est réalisé dans une cellule de DBD (**Figure II.4**). La cellule est composée de deux électrodes en aluminium arrondi de diamètre de 70 mm et d'une épaisseur égale à 10 mm chacune. La distance qui les sépare peut-être variée manuellement à l'aide d'un système coulissant en isolant, l'électrode supérieure (active) est mobile tandis que l'électrode inférieure reliée à la masse est fixe. Ces électrodes sont séparées par deux barrières diélectriques en verre de forme carrée d'épaisseur 3 mm et de dimension 150×150 mm. Les dimensions de ces barrières diélectriques ont des dimensions plus grandes que celles des électrodes afin d'éviter tout risque de contournement. La première barrière a été mise sur l'électrode reliée à la masse. Des particules à traiter ont été placées sur cette barrière à l'aide d'un support cylindrique en plastique (diamètre:75 mm, taille :5 mm) qui les contient. La deuxième barrière a été placée entre l'électrode active et le support cylindrique. Le plasma est ainsi créé au même endroit où les particules étaient placées. La configuration plan-plan de la DBD utilisée dans cette étude présente l'avantage de traiter les surfaces des particules isolantes de manière uniforme tout en évitant tout contact entre le plasma et les électrodes.

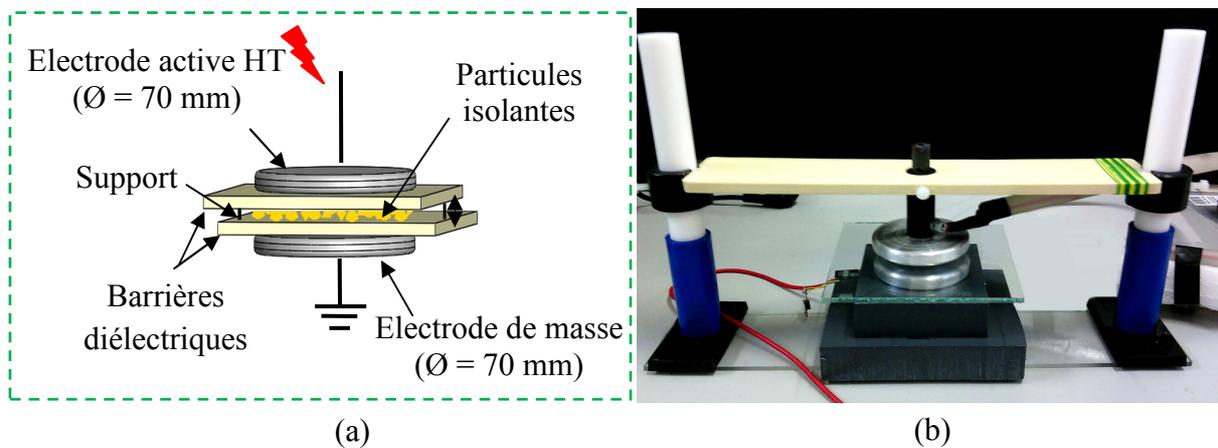


Figure II.4 : *Système de génération du plasma de DBD dans une configuration plan-plan.
(a): Schéma du dispositif expérimental, (b): Photographie du dispositif.*

II.2.2 Dispositifs de charge triboélectrique

Nombreux études de recherche ont été publiées par des chercheurs afin d'analyser les diverses possibilités d'utilisation la triboélectricité pour le chargement de mélanges de matériaux granulaires isolants. La charge statique acquise par l'effet triboélectrique se produit en utilisant plusieurs dispositifs [12, 10, 32, 33], ce qui permet de produire des charges à des niveaux élevés.

En s'appuyant sur ces études, le chargement triboélectrique des matériaux granulaires isolants ont été réalisées à l'aide de deux dispositifs. Le premier dispositif est un chargeur à vibrations basé sur les oscillations des particules (§ II.2.1), tandis que le deuxième dispositif est un chargeur à lit fluidisé basé sur la fluidisation des particules sous l'effet de l'air (§ II.2.1). Ces deux dispositifs sont capables de charger des mélanges granulaires isolants grâce à l'utilisation de trois types de collisions :

- (1) Collision des particules de même matière.
- (2) Collision des particules de matière différente.
- (3) Collision entre les particules et les parois interne de la chambre de fluidisation.

II.2.2.1 Dispositif de chargement par vibrations

Le premier dispositif est un chargeur à vibrations, modèle Retsch AS200 basic, (**Figure II.5**). Le produit à charger mis en mouvements vibratoires à l'intérieur d'une boîte métallique (en inox). La charge triboélectrique dans ce cas dépend de l'amplitude des oscillations du dispositif et du temps de chargement (paramètres contrôlables). Les matériaux métalliques sont plus préférés pour la chambre de chargement, d'autant plus que les matériaux métalliques sont capables de se décharger à la masse et évitent ainsi l'accumulation des charges sur la surface des parois du dispositif de sorte que la quantité de charge acquise par les particules de plastique peut être augmentée [92].

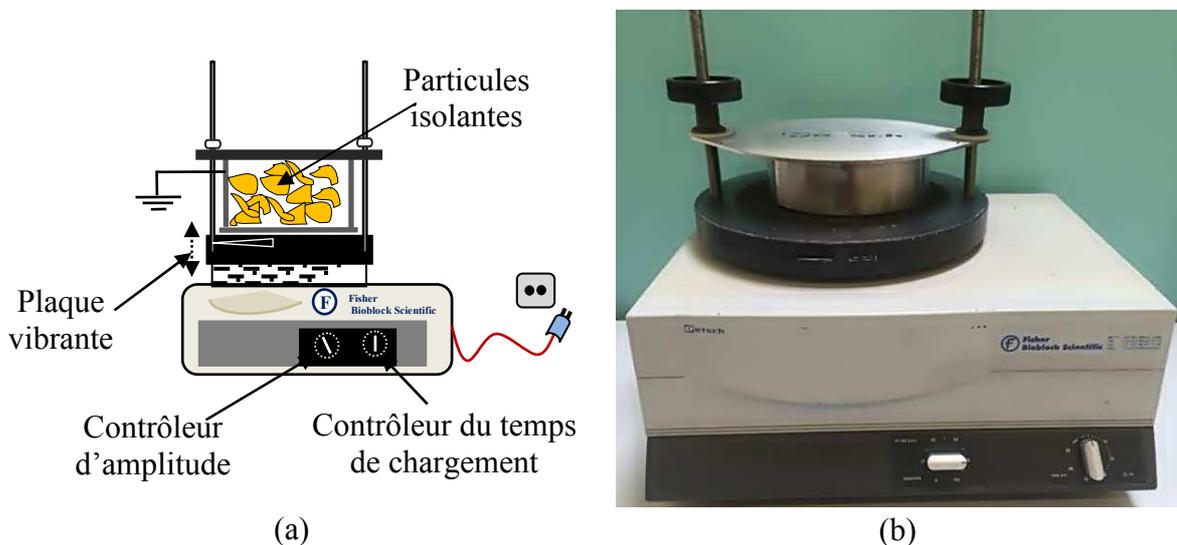


Figure II.5 : Dispositif expérimental de chargement triboélectrique par vibrations « Tamiseuse ». (a): Schéma du dispositif expérimental; (b): Photographie du dispositif.

II.2.2.2 Dispositif de chargement à lit fluidisé

Le deuxième dispositif de chargement à lit fluidisé est présenté sur la **Figure II.6**. Ce dispositif est utilisé pour le chargement des mélanges granulaires isolants de tailles millimétriques.

L'air de fluidisation est fourni par une soufflante à vitesse variable. Un diffuseur d'air assure l'uniformité de fluidisation de particules, qui est une plaque en plastique perforée située au fond de la chambre. À l'extrémité supérieure, la chambre est équipée d'un filtre qui empêche les granules de s'échapper. Les particules sont fluidisées sous l'effet de l'air, elles acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux contacts entre elles dans une chambre cylindrique en polyéthylène téréphtalate-PET (diamètre : 100 mm, longueur: 450 mm). La vibration de particules devient efficace avec l'augmentation de la vitesse de l'air. La chambre a des parois transparentes afin de permettre la visualisation du processus de tribochargement.

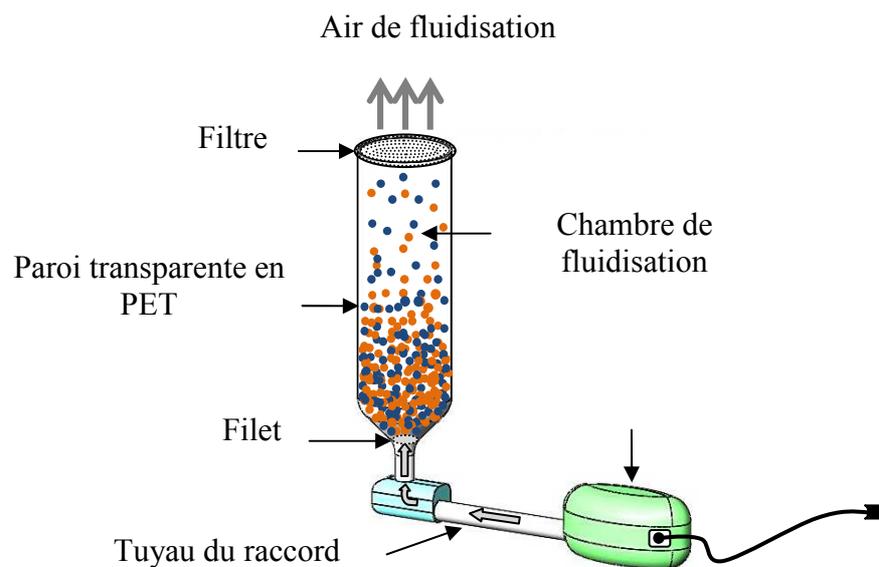


Figure II.6 : Dispositif expérimental de chargement à lit fluidisé.

II.2.3 Séparateurs électrostatiques

Deux installations ont été utilisées durant les études de séparation électrostatique. La première installation est un séparateur électrostatique à chute libre (§ II.2.3.1), tandis que la deuxième installation est un séparateur à plan incliné, dont le principe est inspiré du séparateur à chute libre standard (§ II.2.3.2). Ces deux installations se basent sur l'utilisation

des forces électriques et mécaniques pour séparer les particules des mélanges granulaires chargés par effet triboélectrique.

II.2.3.1 Description du séparateur triboélectrostatique à chute libre

Le séparateur à chute libre est conçu pour la séparation des mélanges granulaires plastiques [93]. De part son principe, l'installation est constituée de trois éléments essentiels suivants (Figure II.7) :

- Deux électrodes verticales planes ;
- Deux alimentations de haute tension ;
- Bac collecteur.

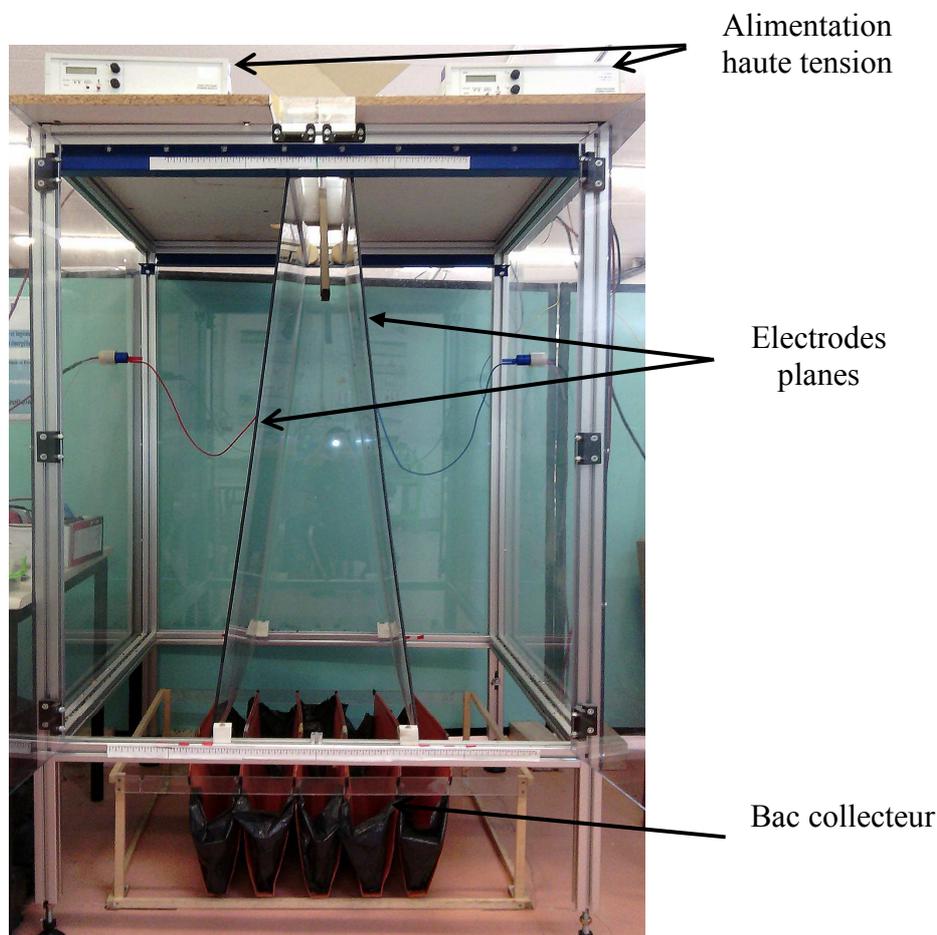


Figure II.7 : Photographie de séparateur triboélectrostatique à chute libre utilisé pour l'étude de la séparation des matériaux plastiques granulaires (IUT d'Angoulême de l'Institut Pprime, Université de Poitiers. France.) [94].

À l'aide d'un dispositif de chargement triboélectrique (cylindre rotatif, vibreur ou lit fluidisé ...), les particules du mélange granulaire acquièrent des charges électrostatiques de

signes opposés. Le mélange tombe ensuite dans une zone inter-électrodes où règne un fort champ électrostatique horizontal produit entre les deux électrodes sous hautes tensions (**Figure II.8**). Les particules chargées sont alors déviées durant leur chute, sous l'action de la force d'attraction électrique F_e et la force gravitationnelle F_g . Les particules seront attirées par l'électrode du signe opposé à leurs charges : celles qui sont chargées négativement sont attirées par l'électrode positive, en revanche, l'électrode négative va attirer les particules qui sont chargées positivement. Les particules mal chargées tomberont ensemble au milieu dans le compartiment du produit mixte.

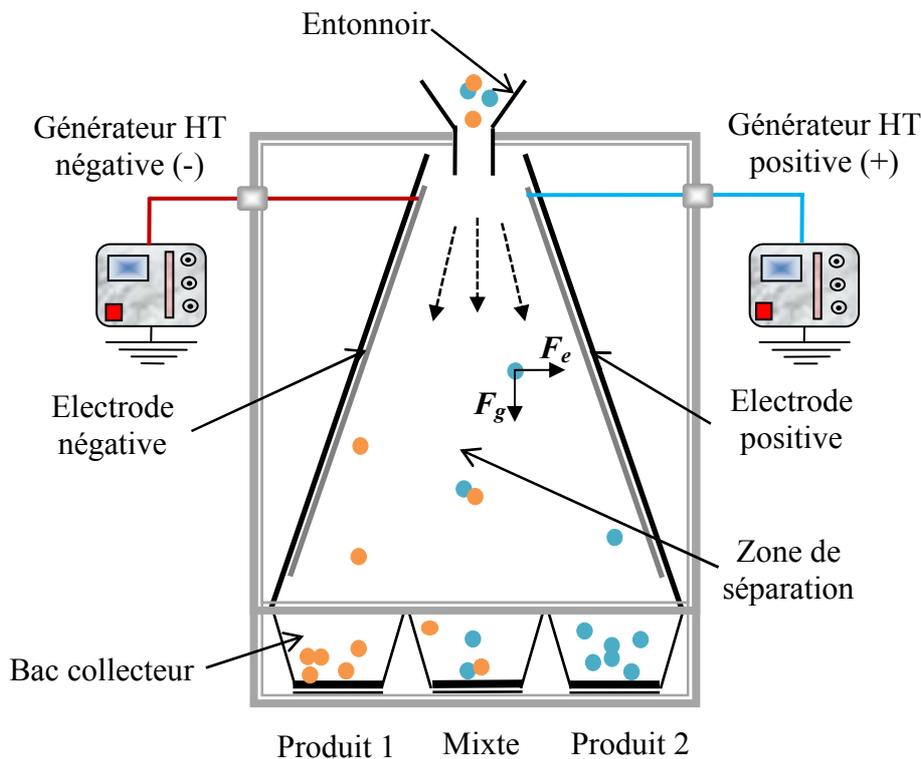


Figure II.8 : Représentation schématique du séparateur électrostatique à chute libre.

II.2.3.2 Description du séparateur triboélectrostatique à plan incliné

Le séparateur triboélectrostatique à plan incliné a le même principe qu'un séparateur à chute libre standard sauf que les particules se déplacent dans ce cas sur la surface d'un plan d'une inclinaison réglable [95]. L'idée de base est d'étudier en premier lieu l'effet de l'angle d'inclinaison, synonyme de variation de la vitesse de passage des particules dans le champ, sur les performances du séparateur. L'objectif étant de trouver des paramètres, autres qu'électriques, qui peuvent aider à améliorer le fonctionnement du dispositif (voir chapitre V).

Le séparateur à plan incliné, montré sur la **Figure II.9** et **Figure II.10**, est composé d'une enceinte parallélépipédique (hauteur : 775 mm ; largeur : 160 mm ; profondeur : 100 mm) placée au-dessus d'un support permettant de varier manuellement l'angle d'inclinaison de l'enceinte de 0° jusqu'à 90° par rapport à l'horizontale. L'enceinte ayant une paroi transparente (la paroi supérieure), afin de permettre la visualisation du processus de séparation et d'observer le mouvement des granules à l'intérieur de l'enceinte. Les deux électrodes du séparateur sont des plans en aluminium (de dimensions 750 mm x 95 mm) collées sur les surfaces internes des parois latérales. Les deux électrodes connectées respectivement à une source positive et négative. La pente du plan est variable avec une inclinaison minimale et maximale choisie respectivement 25° et 90° . Le dernier cas de 90° correspond en effet à la configuration de la chute libre. L'angle minimal, par contre, a été choisi après plusieurs observations de l'écoulement des particules à travers le séparateur. L'angle 25° était alors la valeur minimale qui permettait le mouvement des matériaux, en deçà de laquelle les particules restent figées sur le plan.

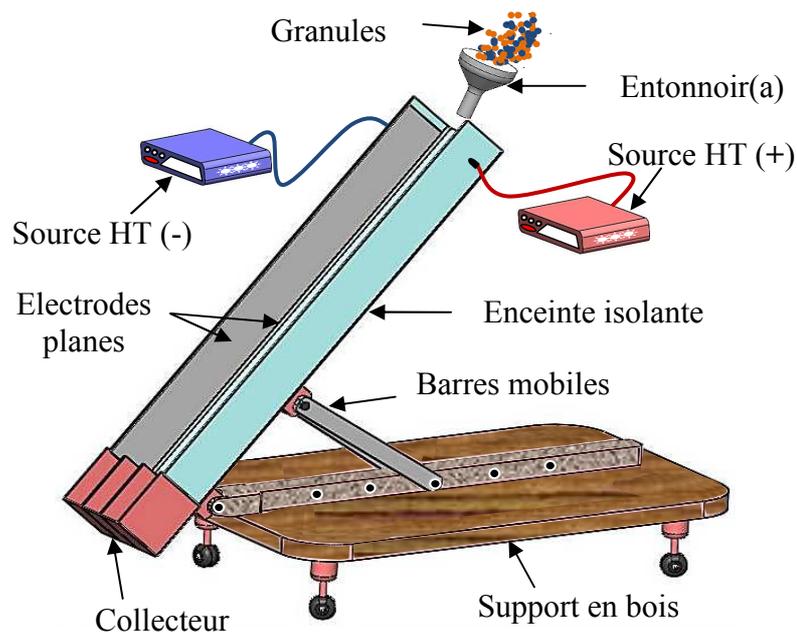


Figure II.9 : Schéma de l'installation expérimentale de séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants installée au laboratoire LGEG de l'université de Guelma (Algérie).

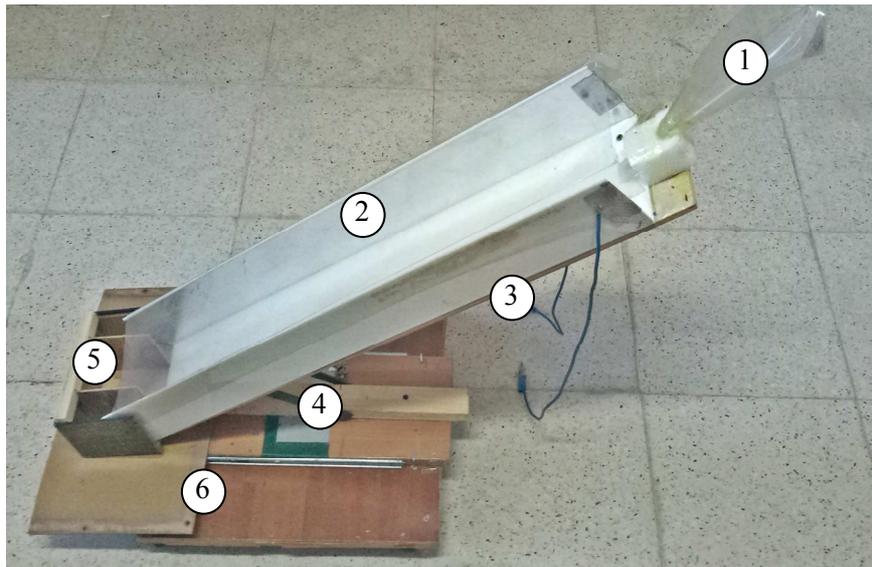


Figure II.10 : Photographie du séparateur à plan incliné : (1) Entonnoir, (2) Electrodes planes, (3) Enceinte isolante, (4) Barres mobiles, (5) Collecteur, (6) Support en bois.

II.2.4 Instrumentation pour la neutralisation de la charge résiduelle

Les matériaux isolants peuvent conserver les charges générées lors du broyage et le transport des déchets plastiques. Les éventuelles charges résiduelles non désirées des particules doivent être réduites et éliminées avant chaque expérimentation. La **Figure II.11** présente le neutralisateur de charge (ELCOWA, model ECA88-BS) équipé d'un générateur à haute tension de 5 kV (ELCOWA model SC04B).

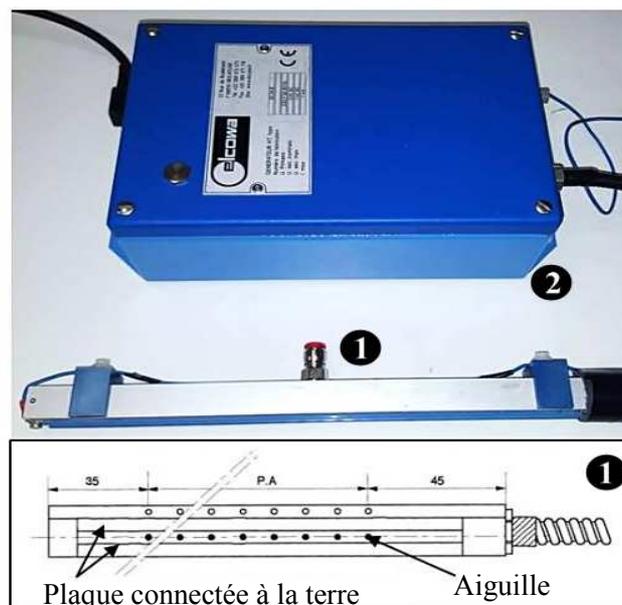


Figure II.11 : Dispositif pour la neutralisation de la charge électrique résiduelle : 1 – Alimentation haute tension, 2 - Générateur d'ions positifs et négatifs.

Ce type de neutralisateur est un ensemble d'électrodes couronne de type « pointes » disposées de manière rectiligne et équidistantes et reliées au générateur de haute tension alternative pour générer des charges positives et négatives.

II.3 Techniques de mesure et procédures expérimentales

L'évaluation des performances des procédés de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique est rendue possible par la mise en œuvre de systèmes de mesure complexes, permettant l'enregistrement des charges et des masses des produits séparés. La température, l'humidité relative et la masse granulaire des produits, sont des paramètres qui peuvent affecter la quantité de la charge produite.

II.3.1 Mesure de la température et de l'humidité relative

La mesure de la température et de l'humidité relative avant chaque série d'expériences de chargement triboélectrique et de séparation électrostatique est l'une des étapes indispensables, puisque ces conditions ambiantes peuvent influencer énormément le processus de mesure de la charge, ainsi que les résultats obtenus. De ce fait, on a utilisé un thermo hygromètre numérique modèle *testo 608-H1* (**Figure II.12**).



Figure II.12 : Hygromètre numérique modèle testo 608-H1.

II.3.2 Mesure de la masse

La masse granulaire influe sur le processus de chargement des matériaux granulaires. Il est nécessaire de mesurer la masse granulaire de chaque échantillon afin d'obtenir des résultats expérimentaux valables et comparables entre eux. La **Figure II.13** illustre la balance électronique utilisée au cours de cette étude.



Figure II.13 : Balance numérique.

II.3.3 Mesure de la charge

La méthode utilisée au laboratoire utilise un capteur « seau de Faraday » relié à un appareil de mesure « électromètre » permettant la mesure de la valeur et le signe de la charge.

Le seau de Faraday (**Figure II.14**) est le dispositif approprié pour mesurer la charge totale des particules tribo-chargées. Cette installation est constituée de deux enceintes conductrices concentriques séparées électriquement par un matériau isolant. L'enceinte intérieure dans laquelle le produit granulaire est introduit de telle sorte que tout le champ créé par la charge sur le produit soit capturé par la surface de l'enceinte. Cette enceinte est isolée de la terre et reliée à un électromètre (**Figure II.15**) pour mesurer et afficher la charge électrostatique. L'enceinte extérieure de protection est reliée à la terre pour éviter le couplage avec le champ créé par les charges extérieures et pour réduire les perturbations électriques extérieures.

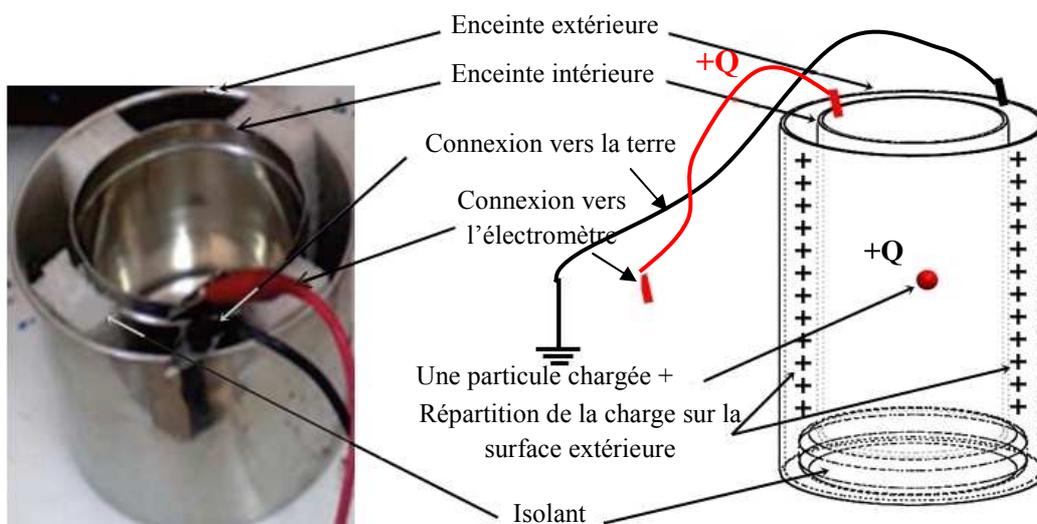


Figure II.14 : Le Seau de Faraday.

Vu que le déclin de la charge des particules varie avec le temps, la mesure de la charge par le biais de cette méthode nous a permis d'obtenir des valeurs instantanées et bien précises.

L'électromètre utilisé durant toutes les expériences est de type Keithley modèle 6514 (**Figure II.15**).



Figure II.15 : Electromètre numérique Keithley modèle 6514.

II.4 Reproductibilité des mesures

Afin d'évaluer la reproductibilité des mesures, nous avons effectué trois essais pour chaque expérience. Cela nous a permis de calculer la valeur moyenne de la charge et l'écart type. Nous avons minimisé le temps entre les essais afin d'éviter l'influence des conditions atmosphériques sur les résultats obtenus. Dans tous les cas, l'écart type a été inférieur à 5 %. Pour des essais réalisés avec la même méthode et dans les mêmes conditions atmosphériques, la dispersion des résultats obtenus a été donc suffisamment faible pour qu'elle n'affecte pas leur interprétation.

II.5 Conclusions

Ce chapitre est consacré à la description des installations et de l'instrumentation nécessaires pour caractériser le comportement de la charge triboélectrique des mélanges granulaires traités et la performance du processus de leur séparation.

1. L'installation de génération du plasma de type DBD à électrodes planes présente l'avantage de traiter sans contact et de manière uniforme la couche de granules.
2. Les séparateurs à chute libre et à plan incliné utilisés dans les essais de séparation des mélanges isolant-isolant présentent l'avantage d'être simple et moins coûteux. Ils sont donc propices aux études d'amélioration.

CHAPITRE III

**ACTION DE LA DECHARGE A
BARRIERE DIELECTRIQUE SUR LE
CHARGEMENT TRIBOELECTRIQUE**

Chapitre III Action de la décharge à barrière diélectrique sur le chargement triboélectrique

Les études sur le traitement d'un matériau polymère par une décharge à barrière diélectrique ont montré le pouvoir de celle-ci à modifier la surface du matériau. Les modifications apportées peuvent être la rugosité de surface [96] et l'amélioration de la mouillabilité (propriétés hydrophiles) [97, 98] qui sont deux caractéristiques importantes pour plusieurs domaines d'applications. Ainsi, joindre ce pouvoir de la DBD au phénomène de triboélectricité, un phénomène surfacique, pourrait construire un moyen efficace pour le contrôle et l'amélioration de ce phénomène de chargement, telle est donc l'idée de base de notre travail. Le contrôle de la charge triboélectrique a toujours été un objectif. Quand cette charge peut causer des problèmes électrostatiques et des nuisances aussi bien aux individus qu'aux équipements, son élimination devient nécessaire. Les moyens pour éliminer ces charges indésirables sont variés : mise à la terre, augmentation de l'humidité, ioniseurs à base de décharge couronne ou même à base de DBD...etc. Cependant, pour le cas contraire, quand la charge doit être favorisée, les moyens sont en réalité limités. Parmi les paramètres permettant l'augmentation de la charge on trouve : la pression de contact, la température, la nature du matériau...etc., qui sont dans la plupart du temps des paramètres difficiles à contrôler notamment pour le cas des matériaux granulaires.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence des paramètres électriques et géométriques de la décharge à barrière diélectrique (DBD), à l'air ambiant, sur la charge triboélectrique des matériaux granulaires isolants traités. Pour cela, des mesures de la charge obtenue ainsi que la caractérisation électrique de la DBD par mesure du courant de décharge ont été réalisées.

III.1 Installation de traitement de surface par DBD

Le banc expérimental utilisé pour le traitement de surface des particules est schématisé sur la **Figure III.1** et **Figure III.2**.

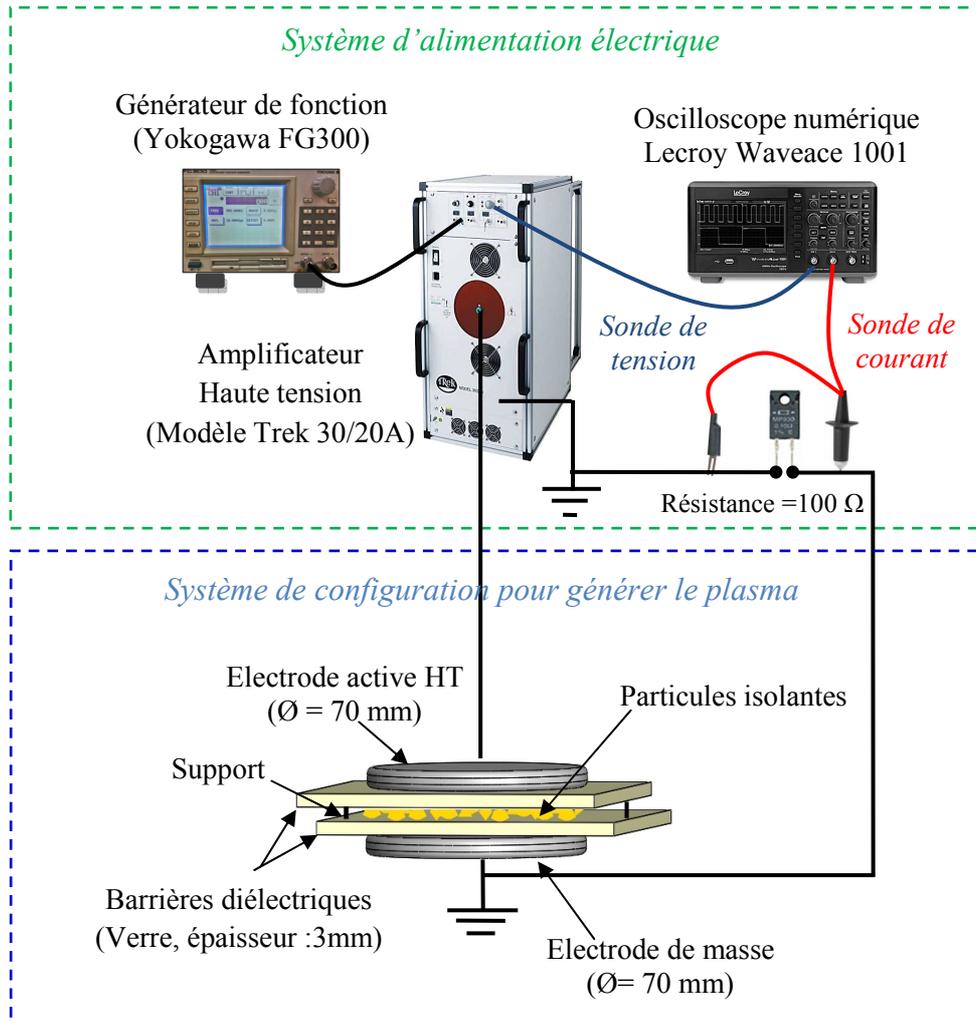


Figure III.1 : Schéma global du montage expérimental utilisé pour le traitement de surfaces des particules isolantes par la DBD.

L'installation est composée de :

- 1- Une cellule DBD : c'est la source du plasma et la cellule de traitement des particules.
- 2- Un amplificateur haute tension (modèle Trek 30/20A): c'est une source de haute tension qui permet d'alimenter la cellule de la DBD avec un signal de haute tension à une fréquence ajustable.
- 3- Un générateur de fonction (modèle Yokogawa FG300): permet de choisir la forme de l'onde générée (sinus, carré et triangle), la tension injectée et la fréquence de répétition du signal.
- 4- Oscilloscope (Lecroy, modèle Waveace 1001): il permet d'enregistrer et visualiser des oscillogrammes Tension / Courant de la décharge, il est connecté à travers la sonde intégrée de l'amplificateur (rapport 1/3000) pour la mesure de la haute tension et une résistance non inductive de 100 Ω pour la mesure du courant électrique.

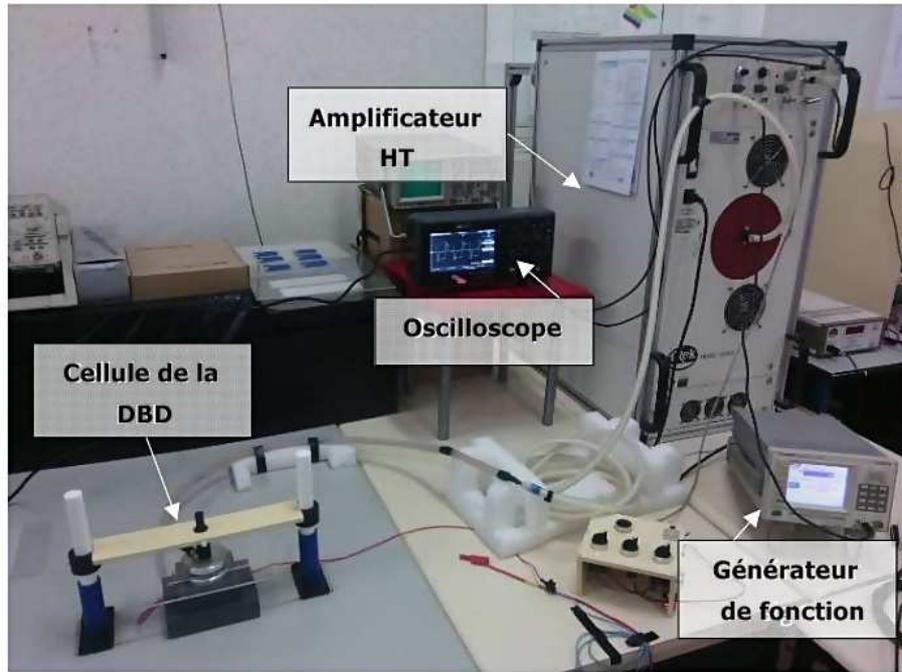


Figure III.2 : Photographie de l'installation de traitement de surface par la DBD.

Le traitement de surface des particules a été effectué par la DBD dans des conditions atmosphériques. Pour créer cette décharge, un signal alternatif a été produit par un générateur de fonction (Yokogawa FG300). L'amplificateur délivre une haute tension de sortie avec un rapport de multiplication de 3 kV/1 V par rapport au signal de pilotage du générateur de signaux. La tension maximale fournie par l'amplificateur est de ± 30 kV avec un courant de ± 20 mA; la vitesse de montée du signal de sortie est de 550 V/ μ s. Un oscilloscope numérique de la marque Lecroy (série Waveace 1001) a été utilisé pour surveiller le signal de sortie de l'amplificateur.

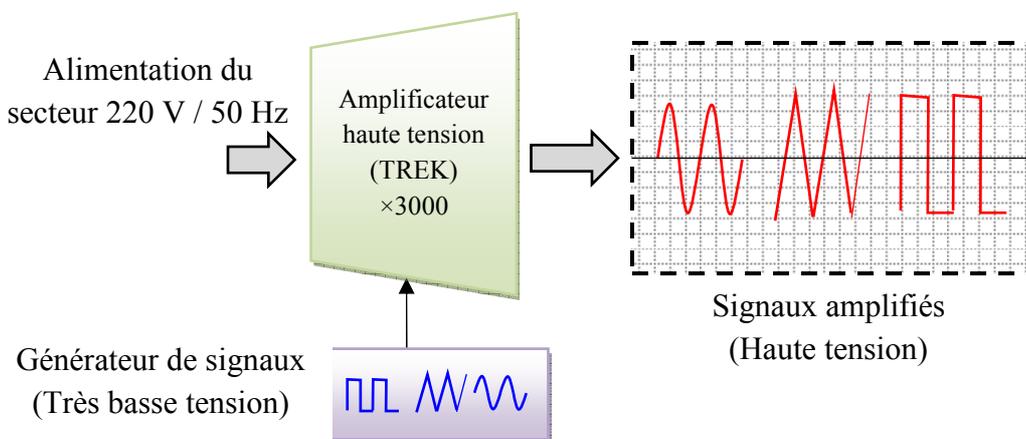


Figure III.3 : Pilotage de l'amplificateur haute tension [99].

- ***Expérience de traitement par décharge couronne :***

Des essais préliminaires ont montré que le traitement par la décharge couronne alternatif n'a aucun effet sur les propriétés de surface des matériaux et leur comportement triboélectrique.

Puisque le volume du plasma est très petit, l'inconvénient principal de la décharge couronne en ce qui concerne les traitements de surfaces des matériaux polymères est la taille mince de la surface traitée. Pour augmenter la taille du traitement de surface, le fil cathodique peut être remplacé par une électrode plane parallèle à la surface traitée: ce système génère des micro-décharges (streamers). Les streamers commencent toujours au même endroit (défaut sur la surface) provoquant un traitement non homogène sur la surface du matériau.

Pour éviter ce problème, une décharge à barrière diélectrique a été développée [100]. La barrière diélectrique joue un rôle important, ce qui peut :

- Limiter le courant de décharge et éviter la transition d'arc qui permet de traiter la surface avec un mode continu ou pulsé.
- fournir une distribution uniforme de la décharge sur la surface de particules et assurer un traitement homogène.

III.2 Procédure de déroulement des expériences

Les essais ont été réalisés sur des échantillons des deux types d'isolants précédemment exposés dans § II.1.1 : PP et PVC. Pour toutes les expériences, la durée et l'amplitude du tribochargement étaient 2 min et 3 mm respectivement. Pour chaque expérience, de nouveaux échantillons de 7 g des particules de PP et de PVC séparément ont été utilisés. Cette étude nous permet d'évaluer la variation de la charge triboélectrique des particules traitées par le plasma DBD. Basant sur les résultats de maintes expériences préliminaires, plusieurs facteurs électriques et géométriques de la décharge ont été considérés. L'étude de l'effet de ces facteurs a été réalisée selon une conception expérimentale d'un facteur à la fois.

La procédure expérimentale se fait en quatre étapes principales :

1. Préparation des échantillons sous forme de monocouche de granule et leur introduction dans le système de traitement de surface ;
2. Traitement de surface des granules ;
3. Chargement triboélectrostatique des granules ;
4. Mesure de la charge.

La première étape : comporte les essais préliminaires de traitement de surface des particules isolantes par le plasma :

- Mesurer les quantités prescrites de chaque type de matériau utilisé ;
- Neutraliser l'échantillon à traiter ;
- Déposer le produit à traiter sur le diélectrique qui couvre l'électrode de terre.

La deuxième étape : comportant les essais de traitement de surface :

- Choisir le type de signal, l'amplitude et la fréquence de décharge ;
- Traiter l'échantillon ;
- Transférer le produit traité dans la boîte du dispositif de tribochargement.

La troisième étape : contient les essais de chargement triboélectrique :

- Lancer et chronométrer la durée de triboélectrisation ;

La quatrième étape : comporte la mesure de la charge des matériaux :

- Retirer le produit traité et tribo-chargé ;
- Mesurer la charge triboélectrique des produits traités de chaque matériau ;

III.3 Effet des paramètres électriques

Dans cette partie, nous allons présenter l'influence de la forme d'onde du signal et les paramètres de la tension appliquée sur les caractéristiques du courant de décharge et le comportement de la charge triboélectrique des granules isolants traités par la DBD. Les effets des trois formes d'ondes, le signal carré, sinusoïdal et triangulaire, ont été étudiés. Le temps de traitement a été varié dans les plages de 1 s - 600 s. L'amplitude et la fréquence de la tension appliquée ont été variées dans les plages de 15 kV - 27 kV et 200 Hz - 1000 Hz, respectivement. Tous les paramètres géométriques étaient fixés lors de cette étude : longueur du gap d'air = 4 mm, nombre de couches : monocouche, type du matériau constituant les barrières : verre (5 mm d'épaisseur), position : les deux électrodes couvertes par le verre.

Le traitement par DBD des particules ne donne aucune charge à l'issue du processus de traitement. Cette observation peut être attribuée à la nature alternative de la DBD; la charge créée dans le demi-cycle positif est éliminée par celle créée dans le demi-cycle négatif suivant et ainsi de suite. Par contre, les deux matériaux sont chargés négativement lors de leur mise en contact avec les parois de la boîte en Inox.

III.3.1 Effet du temps de traitement

La **Figure III.4** présente l'influence du temps de traitement de DBD sur la charge acquise par les matériaux granulaires, allant de $t = 1$ s jusqu'à $t = 600$ s, les autres paramètres sont maintenus constants. La tension efficace de signal carré et la fréquence ont été maintenues constantes à 24 kV et à 400 Hz, respectivement. La durée d'exposition à la DBD a un effet significatif sur la charge triboélectrique des deux matériaux. Sans traitement, le PP et le PVC ont acquis une charge triboélectrique d'environ -130 nC et -140 nC respectivement. Pour un temps de traitement de 3 s, la charge mesurée est de -170 nC pour le PP et de -180 nC pour le PVC soit une augmentation en valeur absolue de 32% pour le PP et de 30% pour le PVC par rapport à la charge triboélectrique des particules non traitées. Quand on augmente le temps de traitement au-delà de 3 s, la charge acquise des deux matériaux diminue pour arriver à la valeur des particules sans traitement pour environ 10 s pour le PP et de 4 s pour le PVC. Elle continue à diminuer avec le temps de traitement pour arriver à des valeurs très faibles pour des temps assez long. Donc, pour des temps de traitement dépassant les 3 s, l'effet de la DBD sur la charge triboélectrique est renversé [101, 102].

Le plasma DBD est utilisé pour créer un plus grand nombre de collisions entre les particules énergétiques et les espèces de l'air. Cela peut conduire à un échauffement de l'air dans l'espace, ce qui entraîne un plasma en équilibre thermique. Cependant, pendant une courte durée de traitement, il y a un peu d'échauffement au gaz; en raison du transport de charge limité et de la dissipation de l'énergie transférée par le plasma à la surface des matériaux isolants [103]. L'espèce de plasma énergétique augmente la rugosité de la surface du matériau et augmente également sa mouillabilité en greffant un groupe polaire [104]; l'augmentation de la rugosité augmente le nombre de pics ou de points à la surface des matériaux et conduit à la création de pièges de charge sur la surface (augmentation de la surface de contact à l'interface). L'importance de la rugosité de surface et leur influence sur le processus triboélectrique pour un contact glissant entre les matériaux polymères ont été soulignées par *Neagoe et al.* [105]; leurs résultats indiquent que le contact entre deux polymères électrisés se produit généralement sur un certain nombre de points liés à la rugosité de surface. Pendant le contact glissant, un point de l'une des surfaces peut effectuer plusieurs contacts avec les points de l'autre surface. Plus les points de contact sont élevés, plus la charge triboélectrique acquise est grande. Par contre, l'augmentation de la mouillabilité conduit à l'augmentation de la conductivité superficielle des matériaux en absorbant l'humidité et par conséquent aura pour effet de diminuer la charge acquise.

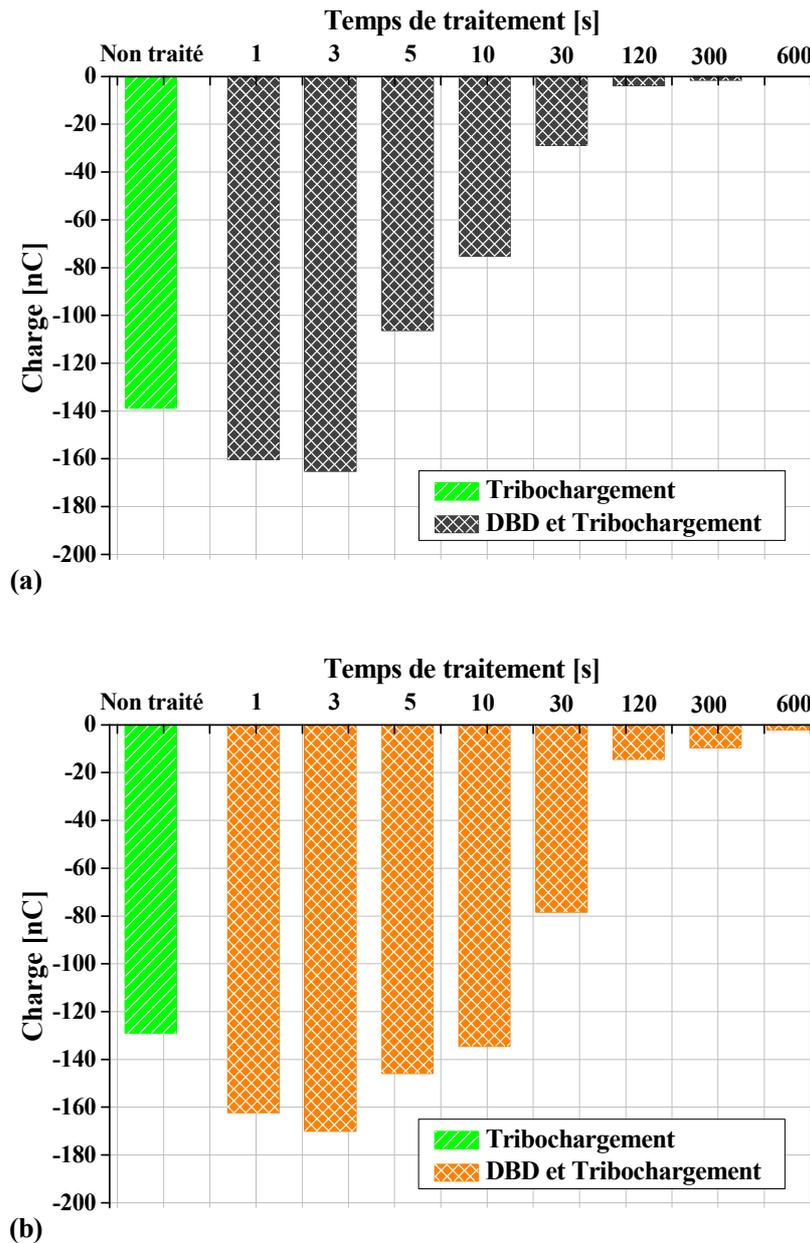


Figure III.4 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction du temps de traitement de la DBD alternative : (a) PVC; (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 14,9 \text{ C}^\circ$; $HR = 36,6\%$.

Ainsi, pour un court temps d'exposition (3 s), la rugosité de surface des particules (PP et PVC) augmente et crée des piègeages de charge sur leurs surfaces tandis que la mouillabilité ne change pas de manière significative. La charge triboélectrique acquise dans ce cas augmente. A l'inverse, pour un temps d'exposition plus long, la mouillabilité augmente et les particules isolantes deviennent conductrices en absorbant l'humidité atmosphérique [97, 98, 106-108]. La présence de l'humidité sur la surface des particules peut diminuer leur résistivité et diminuer la charge triboélectrique des particules.

III.3.2 Effet du type de signal

L'influence de la forme d'onde du signal de la tension appliquée sur la variation du courant de décharge a été étudiée pour trois types de signaux : carré, sinusoïdal et triangulaire. On a pu relever pour chaque cas un oscillogramme courant-tension (**Figure III.5**).

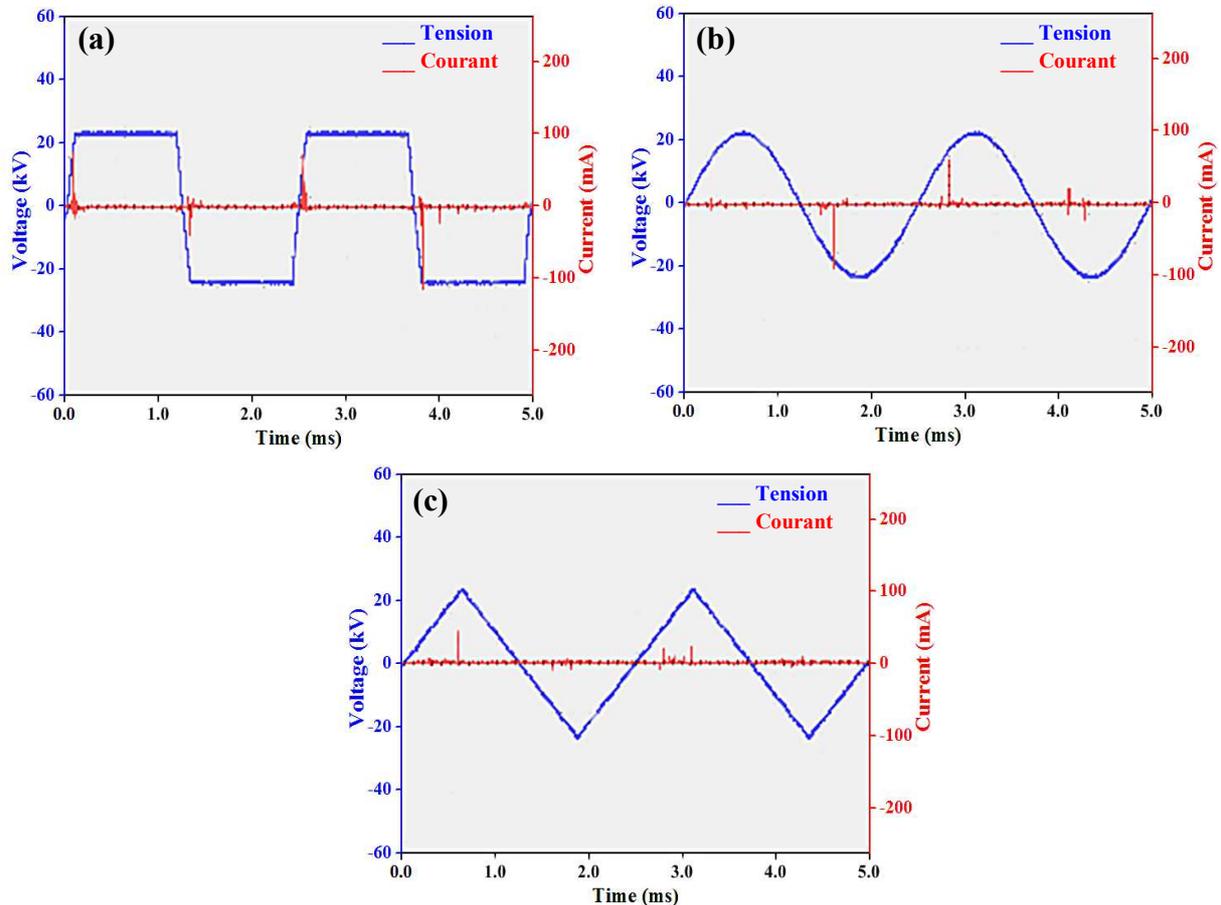


Figure III.5 : Le courant de décharge pour différentes formes d'onde du signal, (a) carré, (b) sinusoïdal et (c) signal triangulaire. $U_{app} = 24 \text{ kV}$; $f = 400 \text{ Hz}$.

Pour toutes les formes d'onde, le courant de décharge est caractérisé par la présence de nombreuses impulsions durant les alternances positives et négatives. Ainsi, la DBD fonctionne dans un mode filamentaire. Les impulsions de courant sont presque inexistantes lors du palier de la tension (cas du signal carré), cela fait référence que la DBD peut fournir la totalité de son énergie lors des phases de transition de la polarité. Il apparaît que l'amplitude et le nombre de pics, ainsi la durée de l'activité de la décharge varient selon le type de signal utilisé. En effet, le courant présente des pics de courte durée sur les deux alternances pour une DBD du signal carré; il y a de nombreux pulses très rapprochés. Tandis que pour une DBD de signal sinusoïdal et triangulaire, on observe que l'activité de la décharge est longue sur les

deux alternances avec des pics éloignés. Cette variation du courant de décharge en fonction de la forme d'onde du signal pourrait être expliquée par la différence d'énergie transmise à la surface des particules. De plus, pour la même tension appliquée, la valeur efficace diffère d'un signal à l'autre. Cette valeur diminue pour le signal sinusoïdal et triangulaire, comme indiqué respectivement dans les formules suivantes:

$$U_{eff} = \frac{U_{app}}{\sqrt{2}} \quad (III.1)$$

$$U_{eff} = \frac{U_{app}}{\sqrt{3}} \quad (III.2)$$

Où :

U_{app} : La tension appliquée ;

U_{eff} : La tension efficace.

En utilisant les formules précédentes, à une tension appliquée de 24 kV, la valeur efficace calculée est 17,02 kV pour le signal sinusoïdal, ce qui représente une diminution de 29%. En ce qui concerne le signal triangulaire, la valeur efficace est 13,87 kV, c'est-à-dire qu'elle a diminué d'environ 43%.

La **Figure III.6** représente la variation de la charge triboélectrique des particules traitées en fonction du type de signal de décharge. Les espèces de plasma énergétique qui interagissent avec les surfaces des particules augmentent la rugosité de ces dernières, ce qui améliore leurs propriétés triboélectriques. Cette modification de surface dépend naturellement de la forme d'onde du signal de la tension appliquée. Il s'en suit alors une dépendance de la charge triboélectrique des particules traitées à la forme du signal appliqué à la DBD.

D'après les résultats de la **Figure III.6**, pour le signal sinusoïdal et triangulaire, l'effet de l'exposition à la DBD était moins important que pour le signal carré. Ainsi, la charge triboélectrique acquise par les échantillons exposés à un signal carré était supérieure à celle des échantillons non traités par DBD. Cela peut s'expliquer par le fait que le courant de décharge diminue avec la diminution de la tension efficace (**Figure III.5**). Des résultats similaires de l'effet de la forme d'onde sur le comportement triboélectrique des particules de PE traitées par la DBD dans des conditions atmosphériques ont été rapportés dans la réf. [109].

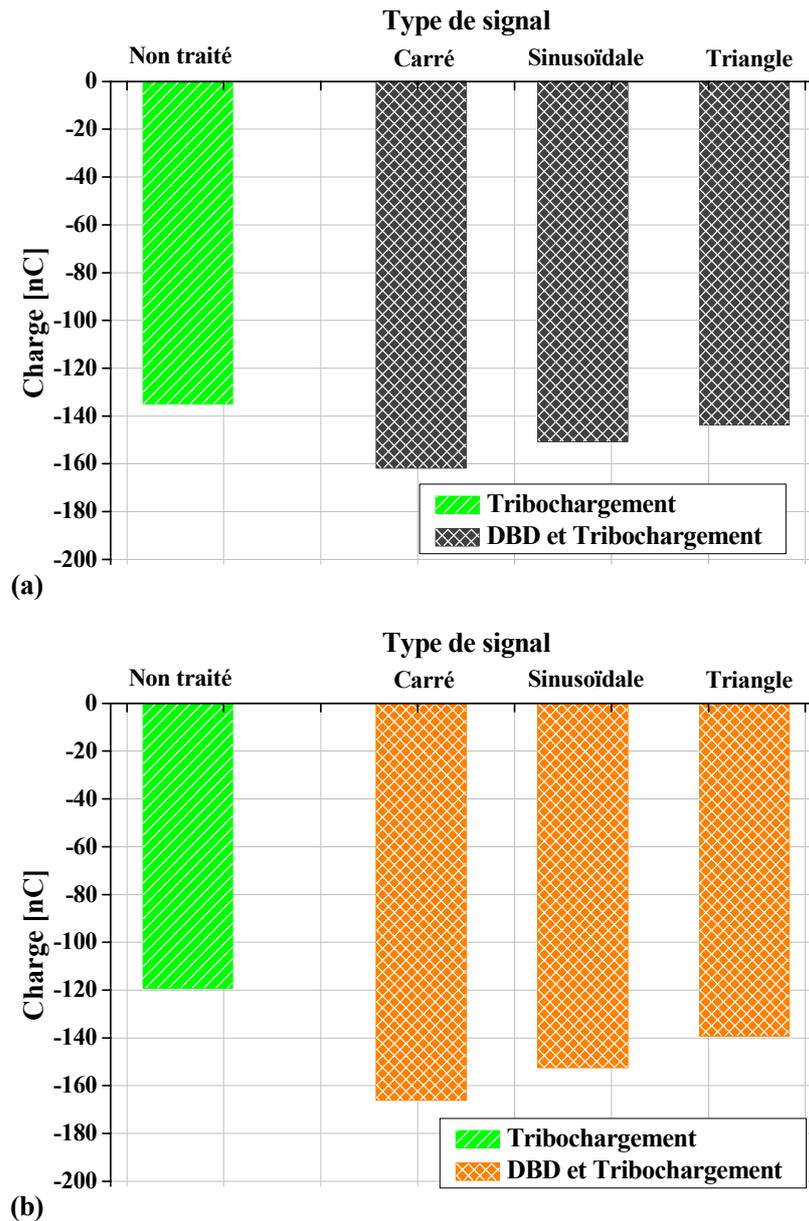


Figure III.6 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées en fonction du type de signal de la DBD: (a) PVC;(b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,4 \text{ C}^\circ$; $HR = 38,3\%$.

III.3.3 Effet de la tension

La **Figure III.7** montre la variation des courants de décharge pour diverses amplitudes de tension appliquée. À partir des formes d'onde de tension et de courant enregistrées sur la **Figure III.7**, on peut voir une nette augmentation du nombre et de l'amplitude des pics du courant de décharge à mesure que l'amplitude de la tension appliquée augmente. En effet, à 15 kV aucun courant de décharge n'est enregistré, synonyme d'une décharge non amorcée encore en raison de la faible tension. En revanche, les pics de courant passent à 50 mA, 70

mA, 80 mA et 110 mA, pour les tensions appliquées de 18 kV, 21 kV, 24 kV et 27 kV, respectivement. Une tension appliquée plus élevée entraîne une augmentation de la chute de tension à travers le vide d'air, ce qui s'accompagne de pics de courant plus élevés. Lorsque la tension appliquée est augmentée, la tension dans chaque demi-cycle augmente en raison de l'accumulation plus élevée de charges sur la surface de la barrière diélectrique. Cela améliore la tension dans le vide d'air et permet de produire plusieurs claquages en un cycle [110].

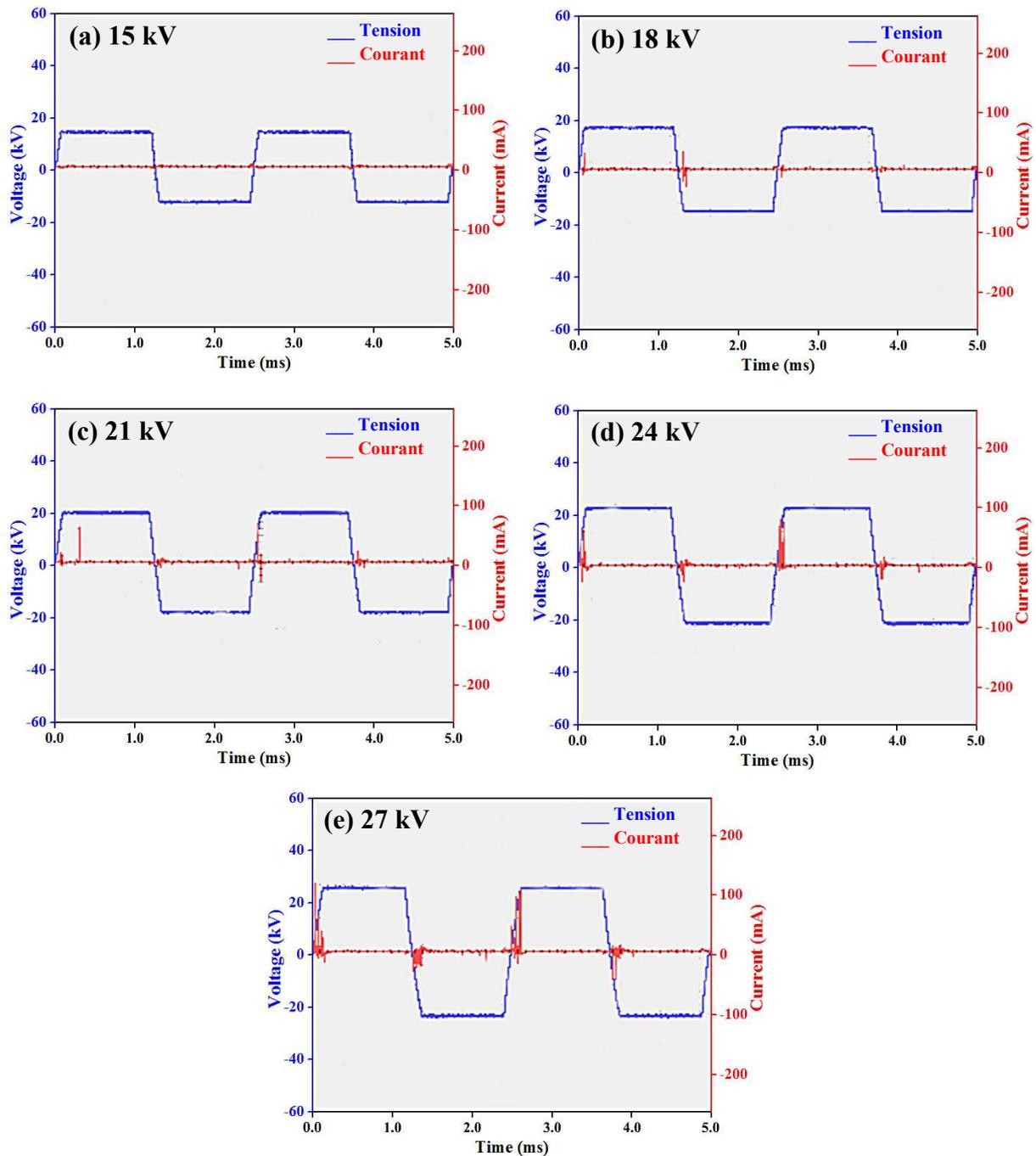


Figure III.7 : Les formes d'onde du courant de décharge pour différentes amplitude de tension appliquée variant de 15 kV à 27 kV. Signal carré; $f = 400$ Hz.

Gadkari et Gu. [111] a également étudié l'effet de la tension appliquée sur les caractéristiques de décharge, ils ont constaté que les pics de courant sont plus élevés et se produisent plus tôt en raison de l'allumage plus facile de la décharge pendant la phase de montée en tension.

La **Figure III.8** montre la décharge pour plusieurs amplitudes de tension appliquée. Généralement, la décharge observée dans l'air est en mode filamentaire quelque soit la valeur de la tension appliquée. En effet, dans le mode filamentaire, la formation de la décharge entraîne la formation d'une multitude de micro-décharges réparties de manière aléatoire dans l'espace. La décharge se caractérise normalement par un grand nombre de micro-décharges par unité de surface et par cycle. Le nombre de micro-décharges qui se propagent à la surface du diélectrique dépend principalement de la haute tension appliquée aux électrodes. Lorsque la tension augmente, les micro-décharges composées de streamers commencent à de nouvelles positions car la présence de charges résiduelles sur le diélectrique diminue le champ électrique aux positions des micro-décharges précédentes. Par conséquent, la décharge devient plus diffuse en augmentant la tension appliquée, ce qui permet de couvrir une grande partie de la surface des particules.

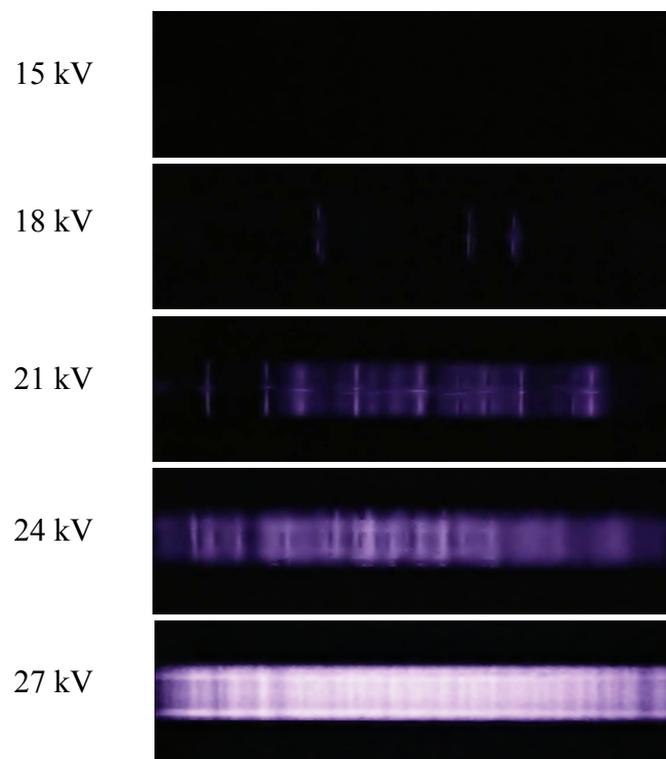


Figure III.8 : Photographie du gap d'air de DBD pour diverses amplitudes de tension appliquée. Conditions expérimentales : Signal carré; $f = 400$ Hz.

La **Figure III.9** illustre l'influence de la tension efficace appliquée à la DBD sur l'évolution de la charge triboélectrique des particules traitées. La tension appliquée a été variée de $U = 15$ kV jusqu'à $U = 27$ kV, avec un pas de 3, le temps de traitement ainsi que la fréquence de la décharge sont constants ($t = 3$ s ; $f = 400$ Hz).

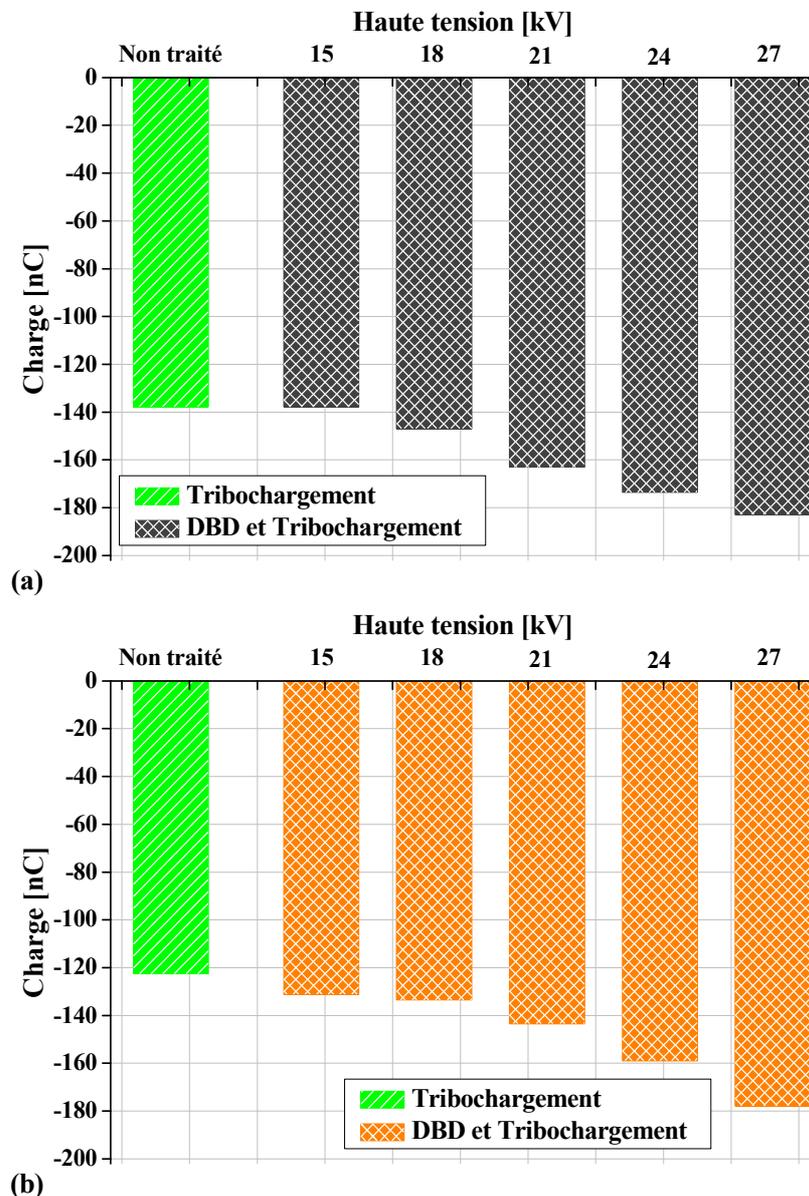


Figure III.9 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction de la tension de la DBD alternative : (a) PVC; (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,2$ C° ; $HR = 39,8\%$.

Il est évident que la charge triboélectrique des particules traitées a été améliorée par rapport au cas non traité d'autant plus que la tension augmente. Ce résultat est lié à l'énergie transférée à la surface des particules exposées au plasma. Une tension élevée entraîne une forte accumulation des charges sur la surface de la barrière diélectrique qui au début de

l'alternance suivante donne lieu à une forte différence de potentiel sur le gap d'air. Celle-ci crée alors de fortes décharges et donc de multitude de pics de courant forts [112]. De ce fait, les caractéristiques de surface des particules traitées sont susceptibles de charger avec la tension appliquée.

Pour toutes les tensions appliquées, la charge triboélectrique acquise par les granules traitées de PVC est supérieure à celle acquise par les granules de PP. Cela s'explique par la différence entre les propriétés diélectriques des deux matériaux.

III.3.4 Effet de la fréquence

Les formes d'onde du courant de décharge pour diverses fréquences de la tension appliquée sont illustrées sur la **Figure III.10**. Le nombre et l'amplitude des pics de courant de décharge augmentent avec la fréquence de la tension appliquée. Cet effet de fréquence pourrait être expliqué par la dynamique des charges d'espace et ceux à la surface du matériau. Lorsque la durée d'une alternance devient courte, les charges à la surface du matériau n'auront plus le temps pour se dissiper. Donc à l'arrivée de la prochaine alternance, la différence de polarité entre les nouvelles charges et celles déjà présentes accentue la décharge expliquant par la même l'intensité élevée du courant en fonction de la fréquence. De plus, pour une même durée de traitement, le nombre de pics de courant enregistré augmente avec la fréquence. Des résultats similaires de la fréquence de tension appliquée sur le courant de décharge ont été rapportés dans la réf. [111].

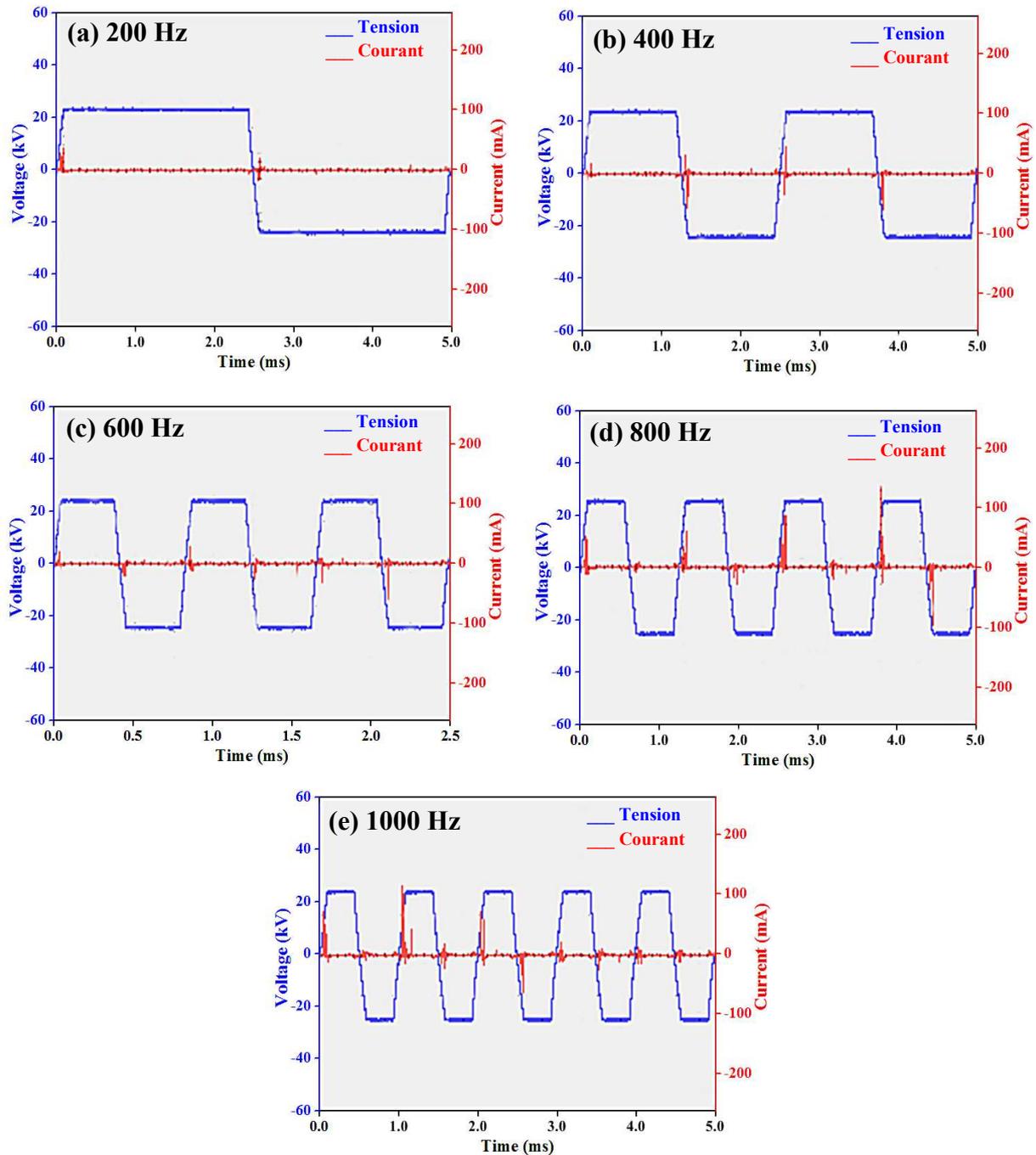


Figure III.10 : Les formes d'onde du courant de décharge pour différentes fréquences de tension appliquée variant de 200 Hz à 1000 Hz. Signal carré; $U_{app} = 24$ kV.

La **Figure III.11** présente des images de l'aspect du gap d'air de DBD pour différentes valeurs de fréquence de la tension appliquée. Une décharge filamentaire est observée pour toutes les valeurs étudiées. En effet, la distribution de la décharge dans le gap dépend de la valeur de la fréquence. On observe que le nombre des branches augmente en augmentant la fréquence jusqu'à 800 Hz et diminue au-delà de cette valeur. Avec l'augmentation de la fréquence, la décharge devient plus énergétique et la charge transférée sera également

considérablement augmentée. Cependant, quand la fréquence augmente au-delà de 800 Hz, la tension de claquage du gap d'air diminue [113], suite à l'accumulation de la charge dans l'espace de décharge et sur la surface diélectrique. De plus, la fréquence de la tension a un effet important sur la distribution de la décharge dans le gap [114].

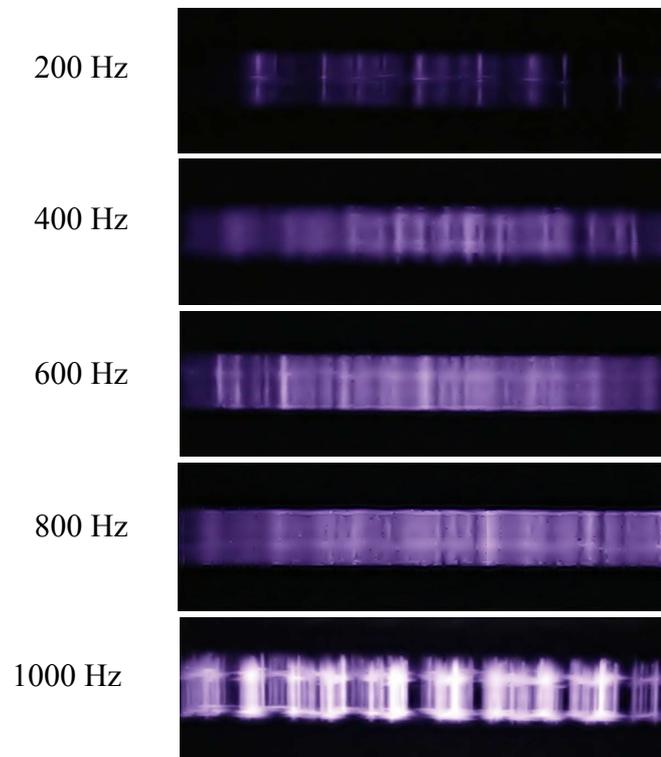


Figure III.11 : Photographie du gap d'air de DBD pour diverses fréquences. Conditions expérimentales : Signal carré; $U = 24 \text{ kV}$.

La **Figure III.12** présente l'évolution de la charge triboélectrique des particules traitées en fonction de la fréquence de décharge, variant de $f = 50 \text{ Hz}$ jusqu'à $f = 1000 \text{ Hz}$, les autres paramètres de réglage sont maintenus constants ($t = 3 \text{ s}$; $U = 24 \text{ kV}$). Le résultat présenté dans la **Figure III.12** montre que la charge triboélectrique des particules traitées a été améliorée par rapport au cas non traité, quelle que soit la valeur de la fréquence de tension appliquée. La charge triboélectrique des particules traitées atteint un maximum à une fréquence de 800 Hz. Une augmentation de la valeur absolue de la charge des particules traitées de 147 nC à 168 nC est obtenue en augmentant la fréquence de 200 Hz à 800 Hz. Inversement, en passant de 800 Hz à 1000 Hz cette valeur de charge a diminué de 168 nC à 150 nC (elle reste toujours supérieure à la valeur de l'état initial correspondant aux particules non traitées). L'augmentation de la charge triboélectrique par l'augmentation de la fréquence dans l'intervalle 200 Hz à 800 Hz indique que la décharge a modifié l'état de surface du matériau. Par contre, à des fréquences plus élevées (supérieures à 800 Hz), la décharge n'aura pas,

probablement, suffisamment de temps pour modifier convenablement la surface. En effet, des études prouvent que l'aspect de la DBD devient plus filamentaire au-delà de 800 Hz ce qui fait diminuer l'énergie dissipée [115, 116]. Dans ce cas, le plasma ne couvrant pas tout l'espace et n'interagit pas avec toute la surface des particules. Par conséquent, le comportement triboélectrique des particules traitées par DBD à des fréquences plus élevées devient moins important.

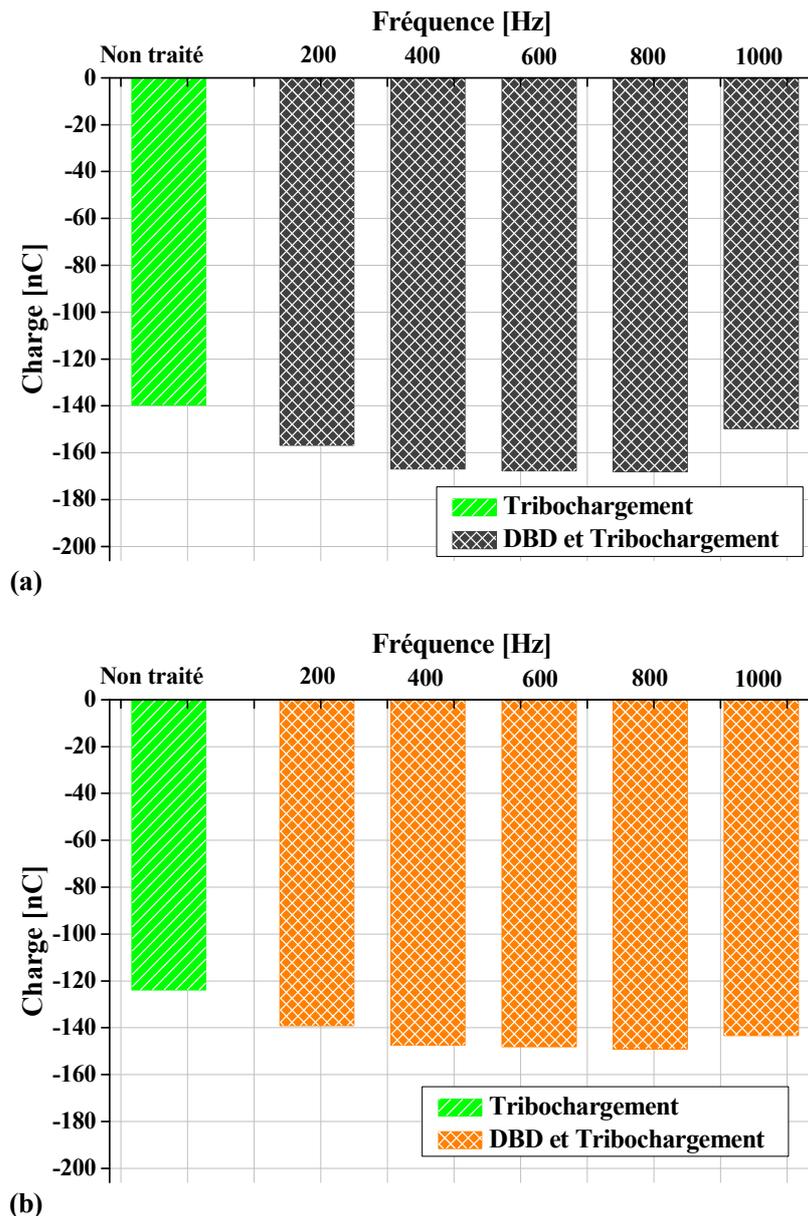


Figure III.12 : Évolution de la charge triboélectrique des particules isolantes en fonction de la fréquence de la DBD alternative : (a) PVC ; (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,9$ C° ; $HR = 33,4\%$.

III.4 Effet des paramètres géométriques

Dans cette partie, nous allons présenter l'effet des paramètres géométriques de la DBD sur les caractéristiques de la décharge elle-même et le comportement de la charge triboélectrique des particules traitées. Les paramètres étudiés comprennent la longueur du gap d'air entre la barrière supérieure et la surface de la couche granulaire, le nombre de couches granulaires, ainsi que le type du matériau des barrières et leur position. Pour mener à bien cette étude, nous avons fixé les valeurs de référence suivantes : longueur du gap d'air = 4mm, nombre de couches : monocouche, des barrières diélectriques en verre, position : les deux électrodes couvertes par le verre. Tous les paramètres électriques étaient fixés lors de notre étude : type de signal : carré, temps de traitement = 3s, tension appliquée = 27 kV, fréquence = 800 Hz.

III.4.1 Effet du gap d'air

La variation de la charge triboélectrique en fonction du gap d'air est représentée sur la **Figure III.13**, pour les particules traitées de PVC et PP. La charge triboélectrique des particules traitées passe par un maximum pour les deux matériaux. La charge des particules traitées pour des petites longueurs du gap d'air est légèrement augmentée par rapport au cas non traité [117], ceci est dû au fait que la zone d'air entre la barrière supérieure et la couche granulaire est très petite et insuffisante pour initier une décharge de volume. Lorsque le gap d'air est augmenté, l'air s'ionise et la charge triboélectrique des particules augmente, puis elle passe au maximum à environ 4 mm. Au-delà de cette distance, la charge commence à diminuer du fait de la diminution du champ électrique qui devient insuffisant pour l'ionisation de l'espace d'air entre la barrière supérieure et la couche granulaire. Dans ce cas, le courant diminue et la décharge est moins énergique pour traiter toute la surface de la couche granulaire. Cette tendance est en accord avec les études précédemment rapportées [114, 118, 119]. Selon [114], l'augmentation de la longueur du gap a une influence néfaste sur la distribution de décharge. Il a été constaté que la décharge peut passer d'un mode homogène, pour des faibles distances, à un mode filamentaire pour des distances relativement plus élevées. Ceci réduit l'efficacité du traitement, puisque le régime homogène est préféré dans le traitement de surface [120].

D'après les résultats de la **Figure III.13**, on peut conclure que l'effet du plasma dépend de la longueur du gap d'air séparant la barrière et la surface à traiter. Une distance optimale

est enregistrée pour notre cas à environ 4mm, distance au-delà de laquelle le traitement devient de plus en plus inefficace.

Le gap d'air "0 mm" signifie que la barrière supérieure de la cellule est en contact avec la surface des particules. Dans ce cas, les particules peuvent également être exposées au plasma en raison de leur espacement, ce qui est dû à leur forme aléatoire (les particules composées de plusieurs régions pointues sur leurs surfaces).

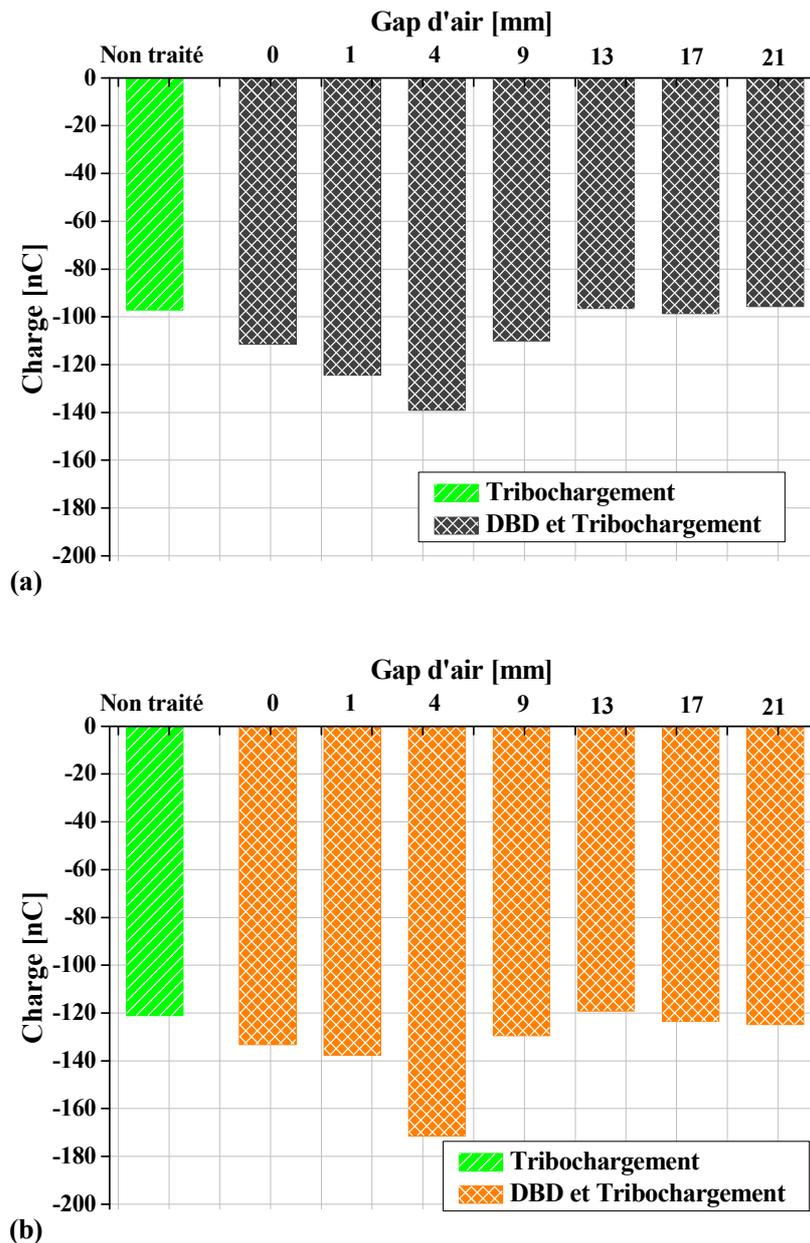


Figure III.13 : *Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction de la longueur du gap d'air : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 18,5$ C° ; $HR = 45,7\%$.*

III.4.2 Effet du nombre des couches

Les dimensions des particules sont 2×4 mm et 2×6 mm pour le PVC et le PP, respectivement. Les échantillons granulaires (masse $m = 7$ g pour une monocouche) ont été déposés sur la surface de la barrière diélectrique inférieure pour une longueur du gap d'air 4 mm. La disposition des particules a été réalisée avec beaucoup de soin, pour obtenir une monocouche d'épaisseur presque uniforme de 2 mm, qui se multiplie en doublant le nombre de couches. De cette façon, il était possible d'obtenir un gap de même longueur pour tous les granulés de l'échantillon.

Les formes d'ondes du courant de décharge pour trois valeurs de couche granulaire sont illustrées sur la **Figure III.14**. On peut voir une nette diminution de l'amplitude des pics de courant de décharge pendant la phase de montée en tension lorsque le nombre de couches granulaires augmente. En effet, dans le cas d'une monocouche, la valeur du courant de décharge atteint 250 mA. Cette valeur diminue jusqu'à 175 mA et 80 mA pour les couches double et triple, respectivement (**Figure III.14**).

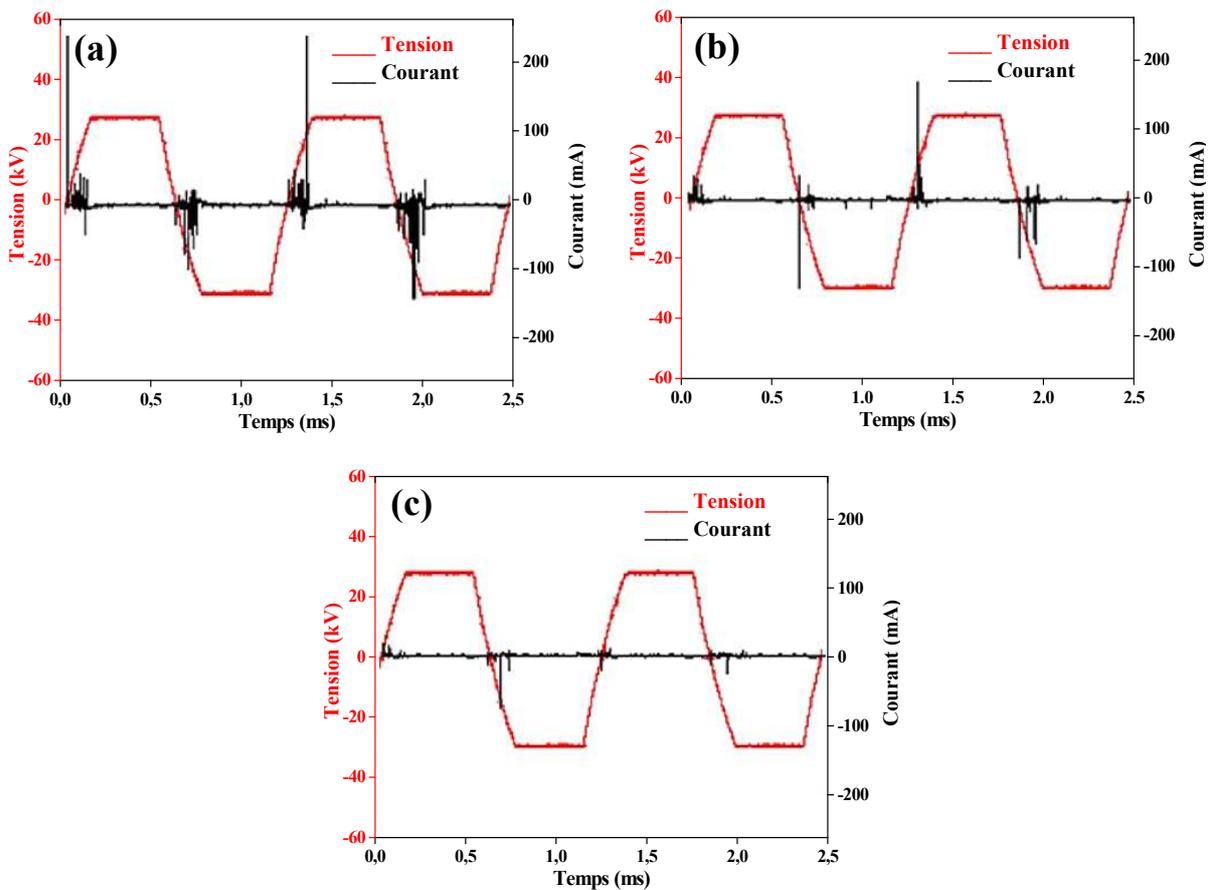


Figure III.14 : Les formes d'onde du courant pour différentes nombre de couches granulaires. (a) : monocouche, (b) double couche, (c) triple couche. Gap d'air = 4 mm.

Les pics de courant sont très sensibles à la variation du nombre de couches (épaisseur de l'échantillon) car non seulement l'amplitude des pics diminue avec l'augmentation du nombre de couches, mais aussi on observe une nette réduction de leur nombre et de leur étendue. Cela signifie que la décharge est maintenue un peu plus longtemps lorsque l'épaisseur de l'échantillon est faible. De plus, l'augmentation du nombre de couches diminue la capacité de la cellule DBD et réduit le courant de décharge.

La **Figure III.15** montre l'évolution de la charge triboélectrique de particules de PVC et de PP non traitées et traitées par DBD en fonction du nombre de couches granulaires.

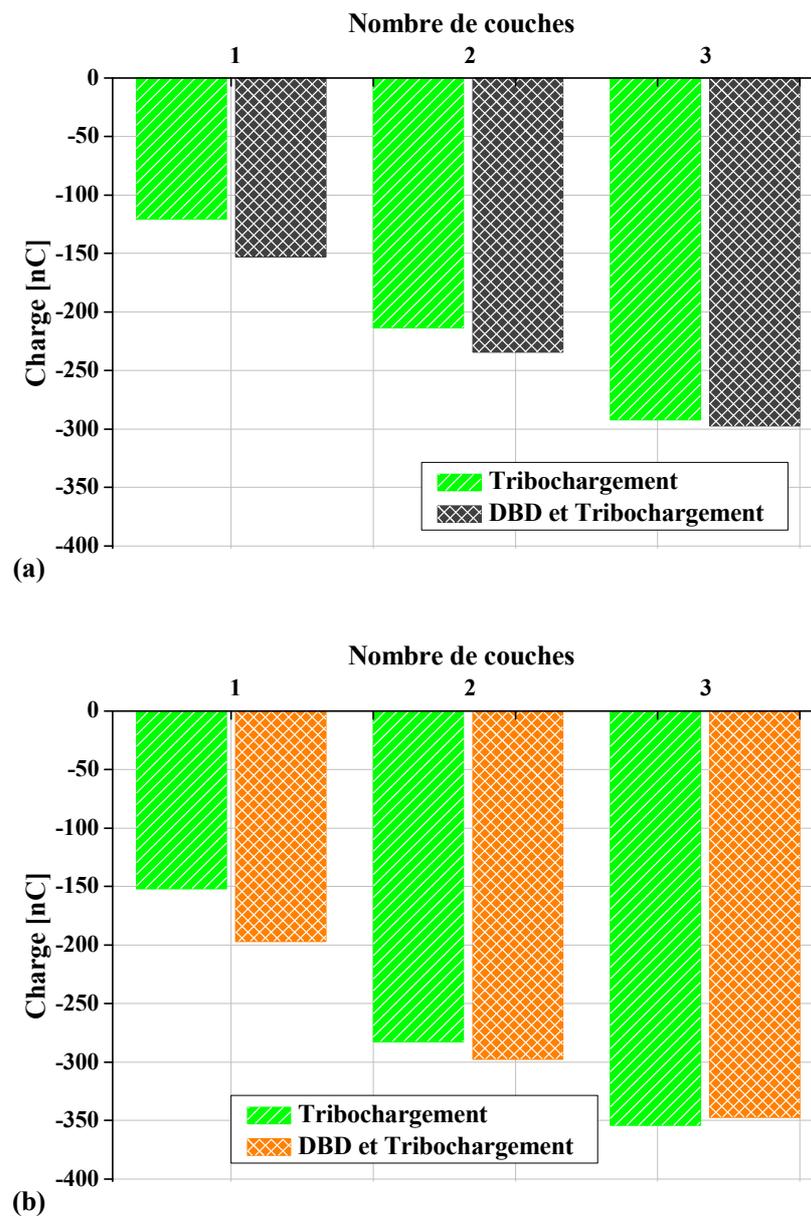


Figure III.15 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction du nombre de couches granulaires : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,7\text{ C}^\circ$; $HR = 33,1\%$.

D'après les résultats de la **Figure III.15**, on peut conclure que la charge triboélectrique a été augmentée avec l'augmentation du nombre de couches granulaires aussi bien pour des particules non traitées et celles traitées par DBD. Cette observation peut s'expliquer par l'augmentation du nombre de contacts du fait de l'augmentation de la quantité de la matière dans la boîte ce qui peuvent favoriser le transfert de charge entre les particules d'un même matériau et la paroi interne de la boîte du dispositif de chargement.

Les résultats de la **Figure III.15** montrent également qu'à un nombre égale de couches, la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD est supérieure à celle des particules non traitées pour le cas mono et double couche. En effet, dans le cas de monocouche, la charge des granules de PVC augmente de -120,53 nC pour les particules non traitées à -152,81 nC après traitement, ce qui représente une augmentation de plus de 26%. En ce qui concerne les particules PP, la charge est augmentée de -151,96 nC pour les particules non traitées à -197,03 nC après traitement, c'est-à-dire une augmentation de charge de plus de 29%. Dans le cas de double couche, la charge de PVC est passée de -213,65 nC pour les particules non traitées à -234,52 nC, ce qui représente une augmentation de plus de 9%. Pour le PP, la charge est augmentée de -282,67 nC pour les particules non traitées à -297,63 nC, c'est-à-dire une augmentation de charge de plus de 5%. Dans le cas de triple couche, pour les deux matériaux, les valeurs de charge triboélectrique des particules traitées par la DBD sont approximativement les mêmes que celles acquises par des particules non traitées.

A partir des formes d'onde du courant représentées sur la **Figure III.14**, le courant de décharge est influencé par la variation du nombre de couches. En effet, le courant passe de 250 mA pour une monocouche à 175 mA et 80 mA pour une double couche et une triple couche, respectivement. Par conséquent, l'effet du courant sur le degré de modification de surface et le comportement triboélectrique devient moins important en augmentant le nombre de couches (**Figure III.15**).

A noter que le taux d'augmentation de charge des particules de PVC et de PP traitées par la DBD a été calculé comme suit :

$$\Delta Q_t \% = \frac{(Q_{t(\text{traité})} - Q_{0(\text{non traité})})}{Q_{t(\text{non traité})}} \times 100 \quad (\text{III.3})$$

Où Q_0 et Q_t sont les charges triboélectriques des particules non traitées et traitées, respectivement.

La **Figure III.16** montre la variation du taux d'augmentation de la charge en fonction du nombre de couches. Pour les deux matériaux, le taux d'augmentation de charge diminue avec l'augmentation du nombre de couches. En effet, dans le cas d'une monocouche, le taux d'augmentation de charge était supérieur à 26% et 29%, pour le PVC et le PP, respectivement. Dans le cas de double couche, le taux d'augmentation de la charge a diminué à 9% et 5%, pour le PVC et le PP, respectivement. Comme pour le cas de triple couche, le taux de variation a été diminué et devient nul. Le traitement par le plasma de DBD peut influencer les propriétés de surface de toutes les particules lorsque l'échantillon déposé sur la barrière supérieure est en monocouche. De cette manière, il est possible d'augmenter la rugosité de surface et de créer des pièges de charge à la surface de toutes les particules de l'échantillon. Ainsi, l'augmentation du nombre de couches par l'accumulation des particules réduit en réalité l'efficacité du traitement. La raison en est, d'une part, la diminution de la probabilité d'exposition des surfaces de toutes les particules au plasma à cause de l'augmentation du nombre de couches (seules les surfaces des particules de la couche supérieure ont été traitées), et d'autre part, que la plus grande distance inter-électrodes entraîne la diminution de l'intensité du courant de décharge.

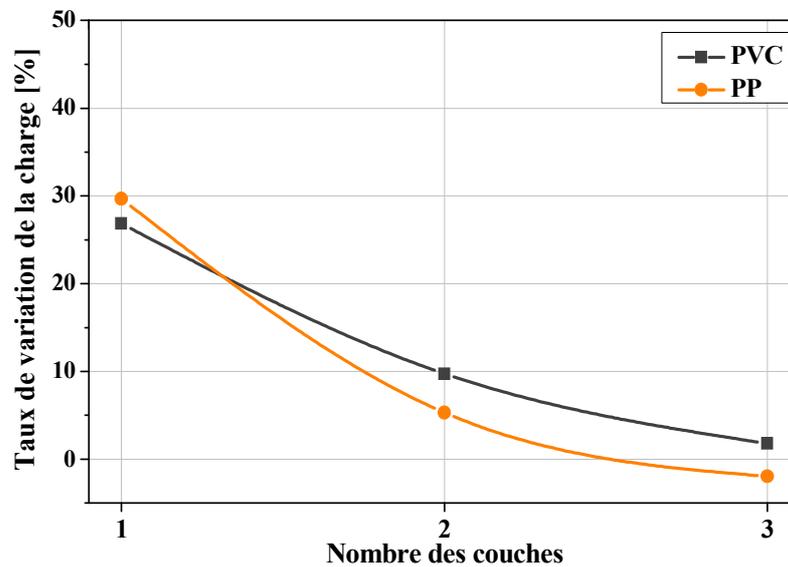


Figure III.16 : Taux de variation de charge en fonction du nombre de couches.

III.4.3 Effet du type de diélectrique constituant la barrière

La **Figure III.17** représente les formes d'onde des courants de décharge pour divers matériaux diélectriques. Les matériaux des barrières utilisés dans le système de décharge sont: Verre, PVC, ABS, PE et PP. En comparaison avec les autres matériaux utilisés, la barrière

diélectrique en verre provoque une décharge plus sévère avec un courant de décharge qui présente multiples pics d'une amplitude assez élevée atteignant 250 mA. Pour le cas d'une barrière en PVC, l'amplitude des pics de courant de décharge atteint 80 mA. Pour l'ABS, le PE et le PP, les courants de décharge ont des formes d'onde identiques et se caractérisent par un nombre et une étendue de pics de courant réduits qui ne dépassent pas 40 mA.

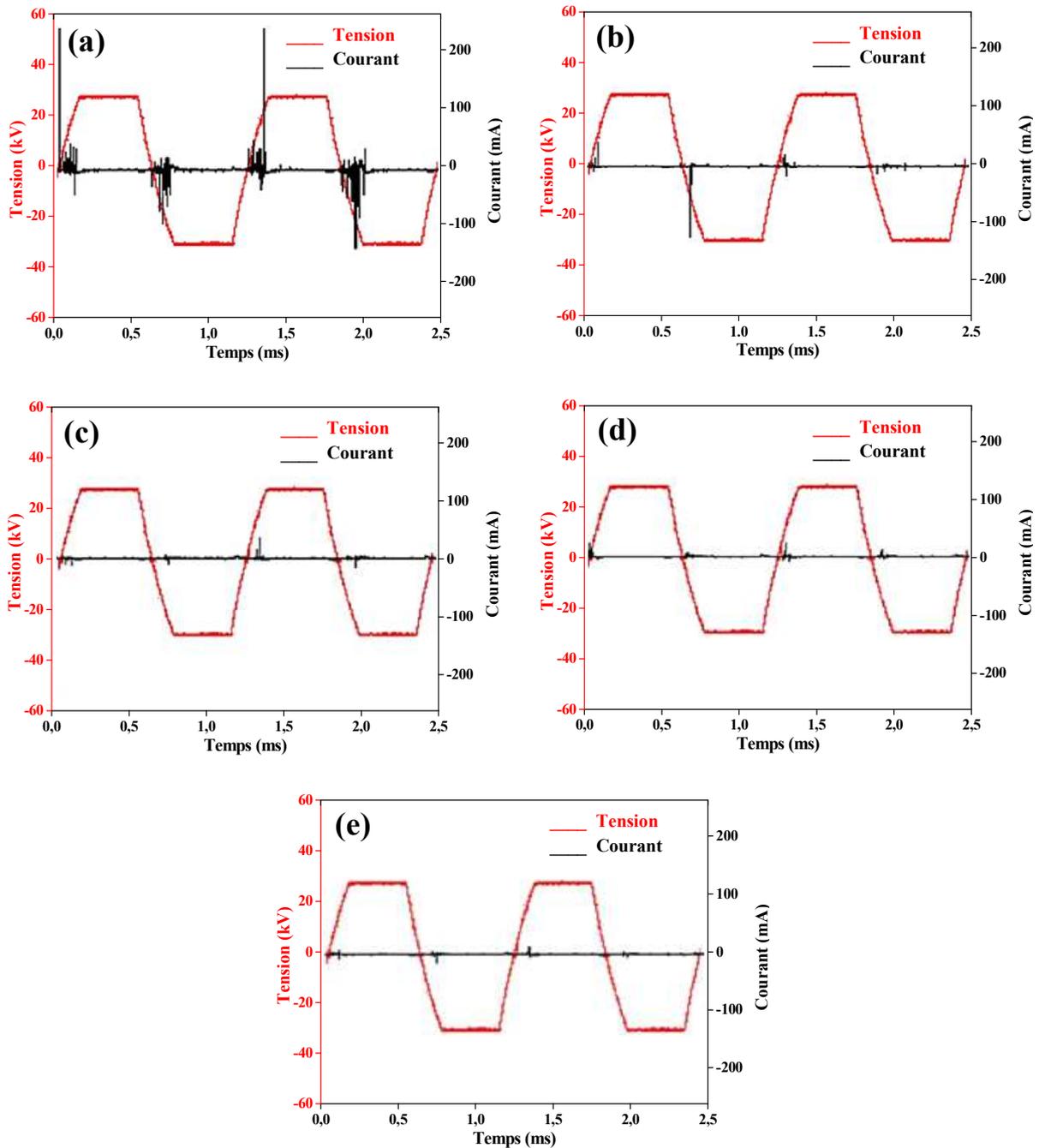


Figure III.17 : Les formes d'onde de tension et du courant de décharge pour différentes barrières. (a) : Verre, (b) : PVC, (c) : ABS, (d) : PE, (e) : PP.

A partir des résultats de la **Figure III.17** on note que les propriétés du matériau diélectrique peuvent influencer les caractéristiques du courant de décharge. L'influence de la nature du matériau sur la décharge est attribuée à la permittivité relative (**Tableau III.1**). L'augmentation de la permittivité relative du diélectrique d'une configuration de DBD entraîne une augmentation de la capacité de la cellule DBD, ce qui conduit à une diminution de la tension aux bornes du diélectrique et à une augmentation de la tension dans le gap d'air. L'effet de la permittivité relative de la barrière diélectrique sur les caractéristiques de décharge a également été étudié par Gadkari et Gu. [111]. Ils ont été constaté que le premier pic du courant et la densité d'électron apparaissent tôt en raison de l'amorçage précoce de la décharge lorsque la permittivité relative augmente.

Le **Tableau III.1** montre les caractéristiques des matériaux utilisés en tant que barrière diélectrique. Les valeurs de la permittivité relative (symbole ϵ_r) sont approximatives et peuvent varier de manière significative en fonction de la fréquence, de la température, de l'hygrométrie ou même de la pression atmosphérique [121].

Tableau III.1: *Caractéristiques des matériaux diélectriques utilisés dans les expériences.*

Matériau diélectrique	Verre	PVC	ABS	PE	PP
Permittivité relative	5-10	4	3.2	2.25-2.36	2.25
Densité [g/cm ³]	2.5	1.38	1.04	0,98	0.92
Rigidité diélectrique [kV/mm]	15,7	13.8-19.7	16.7	18.9-21.7	23.6

La variation de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction du type du matériau de barrière est présentée sur la **Figure III.18**. La charge triboélectrique a été améliorée à la suite de l'exposition à la DBD, quelque soit le matériau de la barrière. Le niveau de la charge le plus élevé est enregistré lorsque la barrière diélectrique est en verre, ayant la permittivité la plus élevée. Le verre dans ce cas permet l'obtention de la décharge la plus énergétique avec un nombre élevé de pics de courant et d'amplitude atteignant 250 mA. L'influence des propriétés et de l'épaisseur du matériau diélectrique sur la DBD a été rapportée dans [111, 122]. Il a été constaté que la réaction du diélectrique, par polarisation, contrôle le courant de décharge et le mode de décharge. Une permittivité élevée conduit à l'augmentation de l'amplitude du courant de décharge et par conséquent à une plus grande puissance, il en résulte également un début précoce de décharge [111].

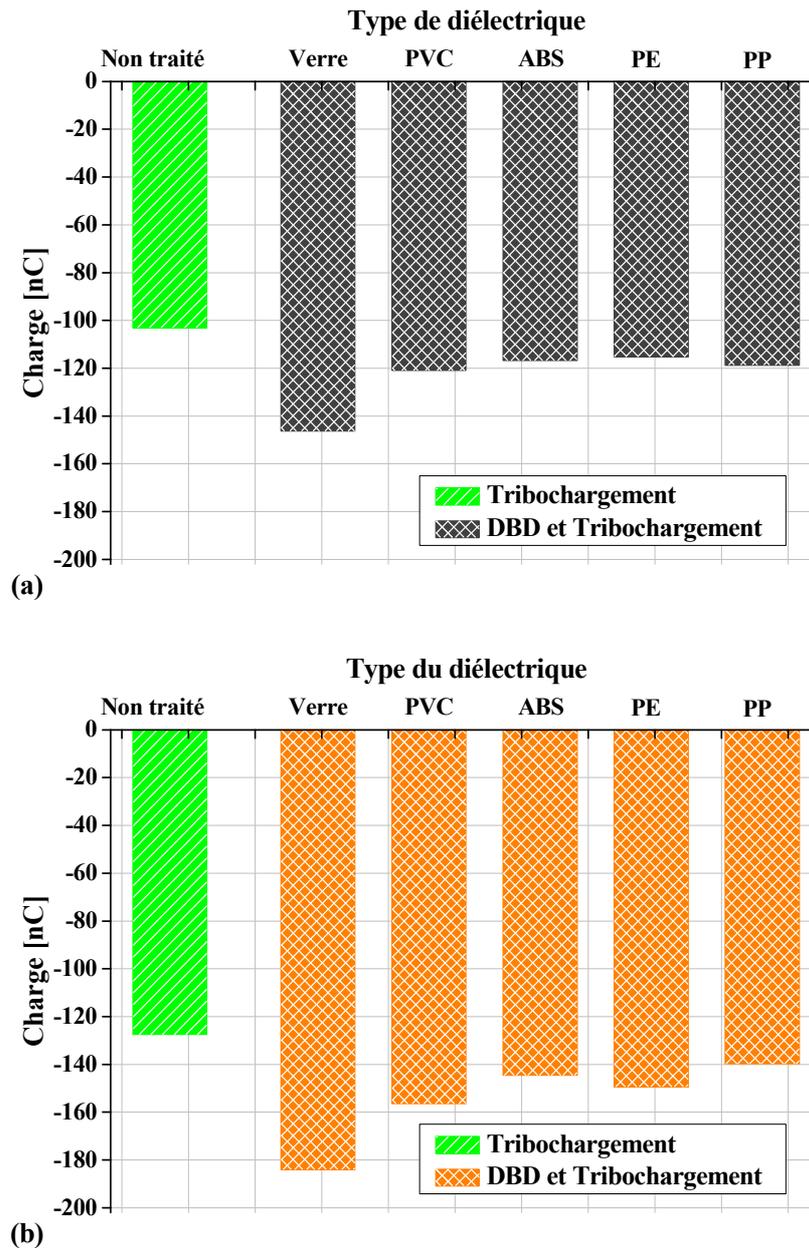


Figure III.18 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction du type de barrière : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 15,9\text{ C}^\circ$; $HR = 41,8\%$.

III.4.4 Effet de la position du diélectrique

Les trois arrangements de la barrière diélectrique sont illustrés sur la **Figure III.19**.

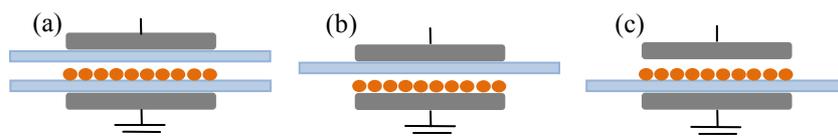


Figure III.19 : Les trois arrangements de barrière : (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre.

La **Figure III.20** représente les formes d'onde du courant de décharge pour trois différentes positions de barrière. On peut voir sur la **Figure III.20.a** que le courant de décharge est constitué de multiples pics dans le demi-cycle de tension (amplitude jusqu'à 250 mA) lorsque les deux électrodes sont couvertes par le verre. Ceci indique que le mode de décharge est filamentaire. Les formes d'onde du courant de décharge sur les **Figure III.20.b** et **Figure III.20.c** sont significativement différentes de celle de la **Figure III.20.a**, où les pics de courant sont caractérisés par un nombre et une étendue élevés (amplitude jusqu'à 240 mA), et le régime de décharge est devenue filamentaire très localisé quand une électrode seulement est couverte par le verre. Cette observation indique que le nombre et l'étendue des pics sont plus élevés en raison de l'augmentation du champ électrique à travers le gap ce qui conduit à des multiples micro-décharges.

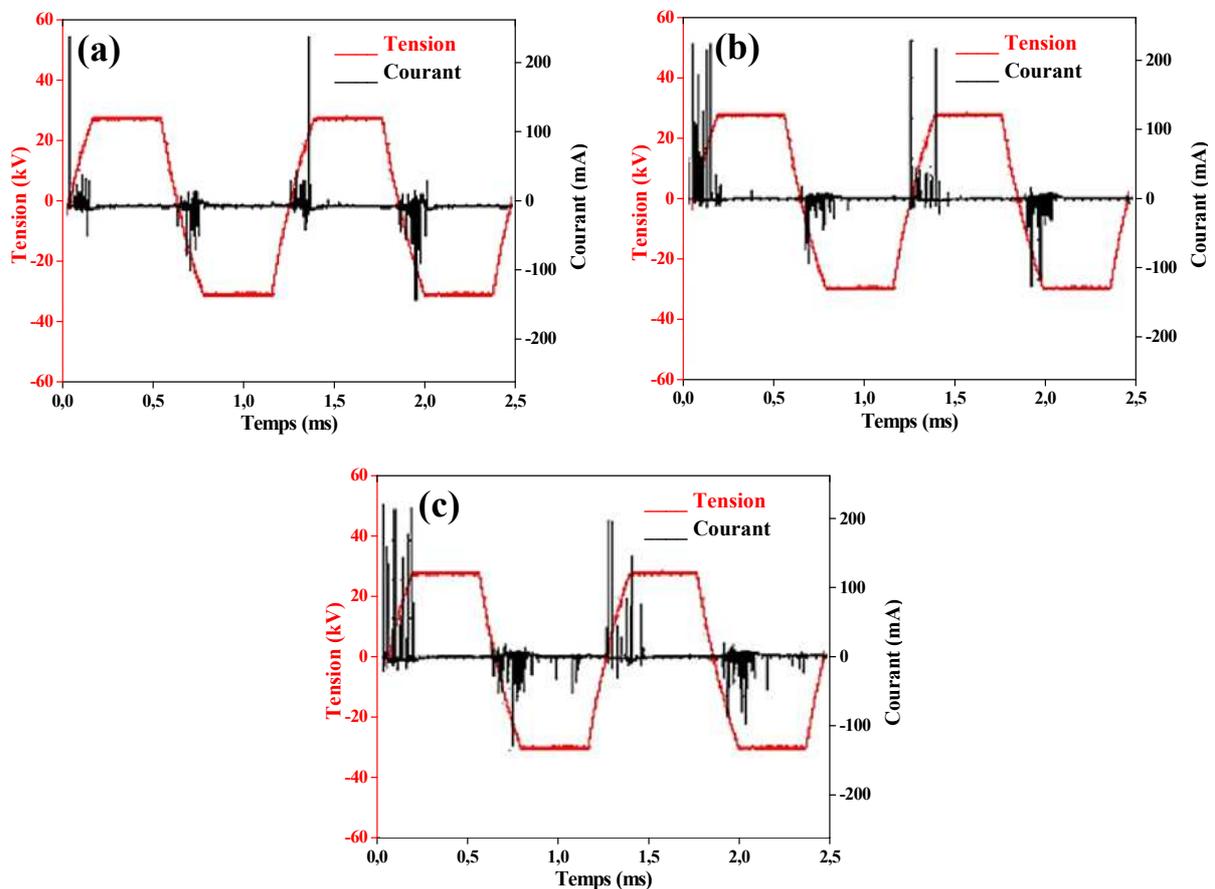


Figure III.20 : Les formes d'onde du courant pour les trois positions. (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre. (Voir Figure III.19).

La **Figure III.21** montre les photographies d'émission de lumière de DBD dans un gap de 4 mm pour différents arrangements de barrière. Le mode filamentaire est observé dans tous

les cas. On peut voir sur la **Figure III.21.a** qu'une décharge non-diffuse est observée lorsque les deux électrodes sont couvertes par le verre. La DBD observée lorsque l'électrode supérieure est couverte par le verre est non diffuse composée de plusieurs filaments, qui augmentent lorsque la décharge se rapproche de la surface de la couche granulaire (**Figure III.21.b**). Lorsque l'électrode inférieure est couverte par le verre (**Figure III.21.c**), une décharge non diffuse claire est perçue à l'œil, elle se compose de multiples filaments dans tout l'espace d'air entre l'électrode active et la surface de la couche granulaire.

En corrélant les formes d'onde de courant de la **Figure III.20** avec la distribution d'émission de lumière, on peut conclure que la décharge non-diffuse observée sur les **Figure III.21.b** et **Figure III.21.c** est causée par le régime filamentaire très localisé qui crée un nombre et une étendue plus élevés des pics de courant dans le demi-cycle de tension.

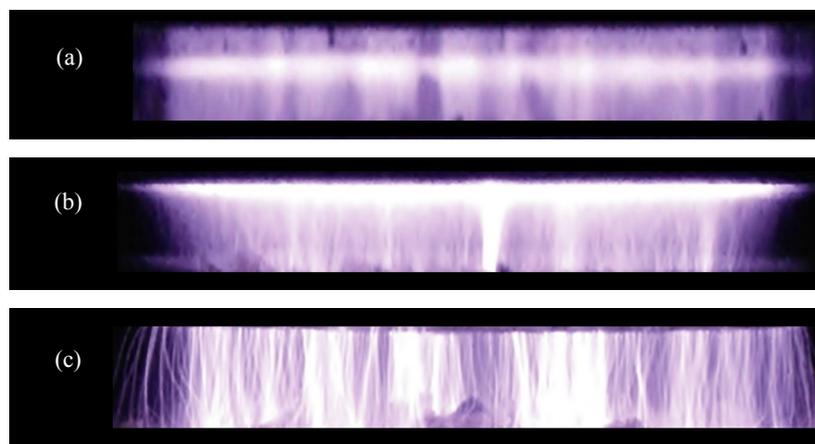


Figure III.21 : Photographies d'émission de lumière de DBD dans un entrefer de 4 mm pour différents arrangements de barrières, (a) les deux électrodes sont couvertes par le verre, (b) seule l'électrode supérieure est couverte par le verre et (c) seule l'électrode inférieure est couverte par le verre.

D'après les résultats de la **Figure III.21**, il convient de noter que la distribution de décharge et le degré de localisation du régime filamentaire dépendent de la position de la barrière. Ces résultats sont similaires à ceux rapportés dans de nombreuses études expérimentales, telles que les références [114, 118]. Ces études ont montré qu'avec deux électrodes couvertes par un diélectrique, la décharge peut passer du mode homogène au mode filamentaire, pour de longues longueurs du gap. Cependant, avec une seule électrode couverte par un diélectrique, la décharge observée à des fréquences supérieures à 500 Hz est toujours en mode filamentaire quelle que soit la longueur du gap [114]. De plus, la forme des particules déposées en monocouche sur la barrière inférieure (ou sur l'électrode inférieure) peut également influencer la distribution de la décharge sur leur surface. En fait, les particules

ont une forme aléatoire composée de plusieurs régions pointues sur leurs surfaces, ce qui peut minimiser la probabilité d'exposer toutes les surfaces des particules au plasma.

La **Figure III.22** illustre l'effet de la position de la barrière sur la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD. Il est à noter que la charge triboélectrique des particules traitées augmente par rapport à celle des particules non traitées lorsque le traitement est réalisé en configuration de DBD avec deux électrodes couvertes par le verre (**Fig.III.22.a**). Comme indiqué dans les sections précédentes, la rugosité de surface augmente sous l'effet de l'exposition du plasma d'une DBD qui couvre la plus grande partie de la surface des particules; c'est-à-dire une augmentation du nombre de pics ou de points à la surface des matériaux conduisant à la création de pièges de charge. Ces pièges sont le siège des charges transférées entre les corps chargés par effet triboélectrique. Inversement, la charge triboélectrique des particules traitées ne change pas lorsqu'une seule électrode couverte par le verre est utilisée. Ceci suggère que les propriétés de surface des particules ne sont pas affectées par l'exposition au plasma DBD. En outre, seules les régions pointues dans les surfaces des particules sont exposées au plasma DBD. En résumé, le courant de décharge est un paramètre important qui peut identifier la décharge et évaluer le degré de modification des propriétés de surface des particules.

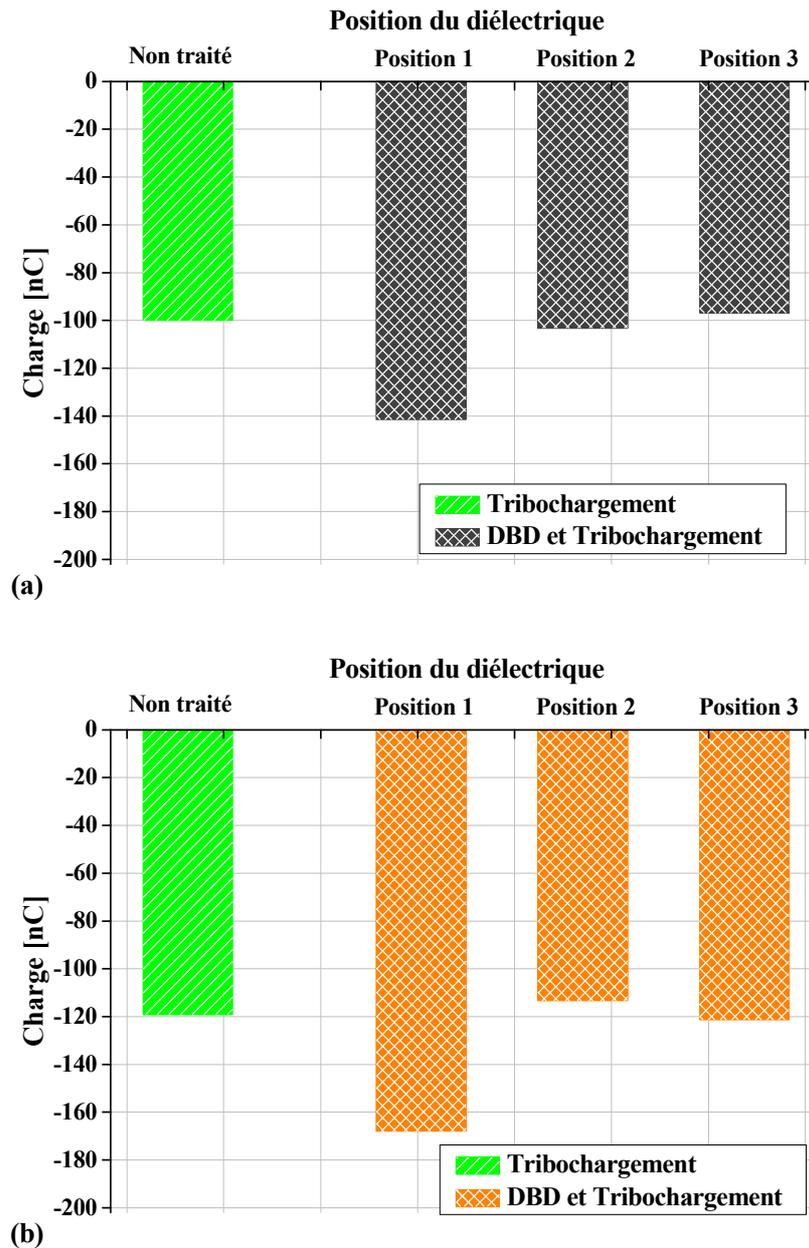


Figure III.22 : Évolution de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD en fonction de la position des barrières (voir figure III.19) : (a) PVC, (b) PP. Conditions expérimentales : $T = 16,2\text{ C}^\circ$; $HR = 45,8\%$.

III.5 Conclusions

Ce chapitre présente les résultats de l'expérience d'exposition des matériaux granulaires à une DBD à électrodes planes. L'influence des différents paramètres électriques et géométriques est présentée.

1. La charge triboélectrique des particules traitées par la DBD peut être augmentée en augmentant le courant de décharge dans certaines conditions (qui dépendent de la distribution de décharge sur la surface des particules); cependant, les caractéristiques de

- décharge et le taux d'augmentation de la charge sont modifiés avec la variation des paramètres électriques et la modification des paramètres géométriques de DBD.
2. L'étude de l'influence des paramètres électriques sur la variation de la charge triboélectrique montre que l'exposition des particules isolantes à un plasma de DBD produit une modification sur leur comportement de tribochargement, s'accompagnant d'une augmentation ou d'une réduction du niveau de la charge des deux matériaux.
 3. La charge triboélectrique des particules traitées est la plus élevée pour une décharge du signal carré par rapport aux autres signaux, ce résultat est due au fait que la DBD du signal carré fournit plus d'énergie.
 4. Le temps d'exposition de DBD influe de manière significative sur la charge, qui peut être améliorée ou fortement diminuée ; donc, les matériaux granulaires traités sur une courte durée (typiquement 3 s) peuvent être bien chargés.
 5. L'augmentation de la haute tension efficace appliquée à l'électrode du réacteur de DBD a un effet significatif sur la charge triboélectrique, en augmentant la tension il est possible d'augmenter la charge des particules.
 6. La charge triboélectrique augmente avec l'augmentation de la fréquence jusqu'à une certaine valeur seuil (qui dépend du degré de distribution de la décharge sur la surface des particules), cette influence devient très faible aux fréquences élevées.
 7. L'étude de l'influence des paramètres géométriques sur la variation de la charge triboélectrique montre que la charge triboélectrique des particules traitées a été améliorée de manière optimale lorsque la longueur du gap d'air n'excède pas 4 mm pour une monocouche de granules et que le diélectrique possède une très grande permittivité est utilisé comme barrière couvrant les deux électrodes.
 8. La position de barrière peut affecter la distribution de décharge et la configuration de DBD avec les deux électrodes couvertes par le diélectrique permet de traiter la grande partie de surface de la couche granulaire et permet d'améliorer leur chargement triboélectrique.
 9. La décharge devient de moins en moins diffuse quand une seule électrode est couverte par un diélectrique, ce cas n'est pas recommandé pour le processus de traitement de surface.

CHAPITRE IV

**APPLICATION SUR LA SEPARATION
ELECTROSTATIQUE DES ISOLANTS**

Chapitre IV Application sur la séparation électrostatique des isolants

La séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants est le résultat de l'action combinée des forces mécaniques et électriques [123]. La charge triboélectrique portée par les granules doit être dans ce cas aussi élevée que possible afin que la force électrique puisse surmonter les forces mécaniques et gravitationnelles et par conséquent mieux séparer les constituants du mélange. Les résultats obtenus sur le traitement des particules par DBD et les conséquences sur l'augmentation de la charge triboélectrique sont mises en application sur le processus de séparation électrostatique des mélanges isolant-isolant.

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de l'évaluation du traitement des particules par DBD sur les performances du séparateur à chute libre.

IV.1 Installation expérimentale

L'installation expérimentale et les étapes suivies durant les expériences sont représentées sur la **Figure IV.1**. Chacune des expériences comporte quatre étapes : le traitement de surface des matériaux granulaires, le chargement triboélectrique, la séparation électrostatique et le poste de mesure. Les deux dispositifs de traitement et de chargement utilisés au cours de cette étude sont les mêmes décrits dans le chapitre précédent (chapitre III). Un système de configuration d'électrode plan – plan est utilisé pour la génération du plasma DBD afin de traiter la surface des particules. Un dispositif de chargement à vibration est utilisé pour le chargement triboélectrique des particules traitées et non traitées. La séparation des mélanges granulaires non traité et traités par la DBD a été réalisée dans un séparateur à chute libre.

IV.2 Procédure expérimentale

IV.2.1 Chargement triboélectrique des particules traitées par la DBD

Dans une première série d'expériences, des échantillons de 10 g de granules de PVC et de PP (§ II.1.2) ont été chargés séparément dans le dispositif vibratoire pendant 4 min.

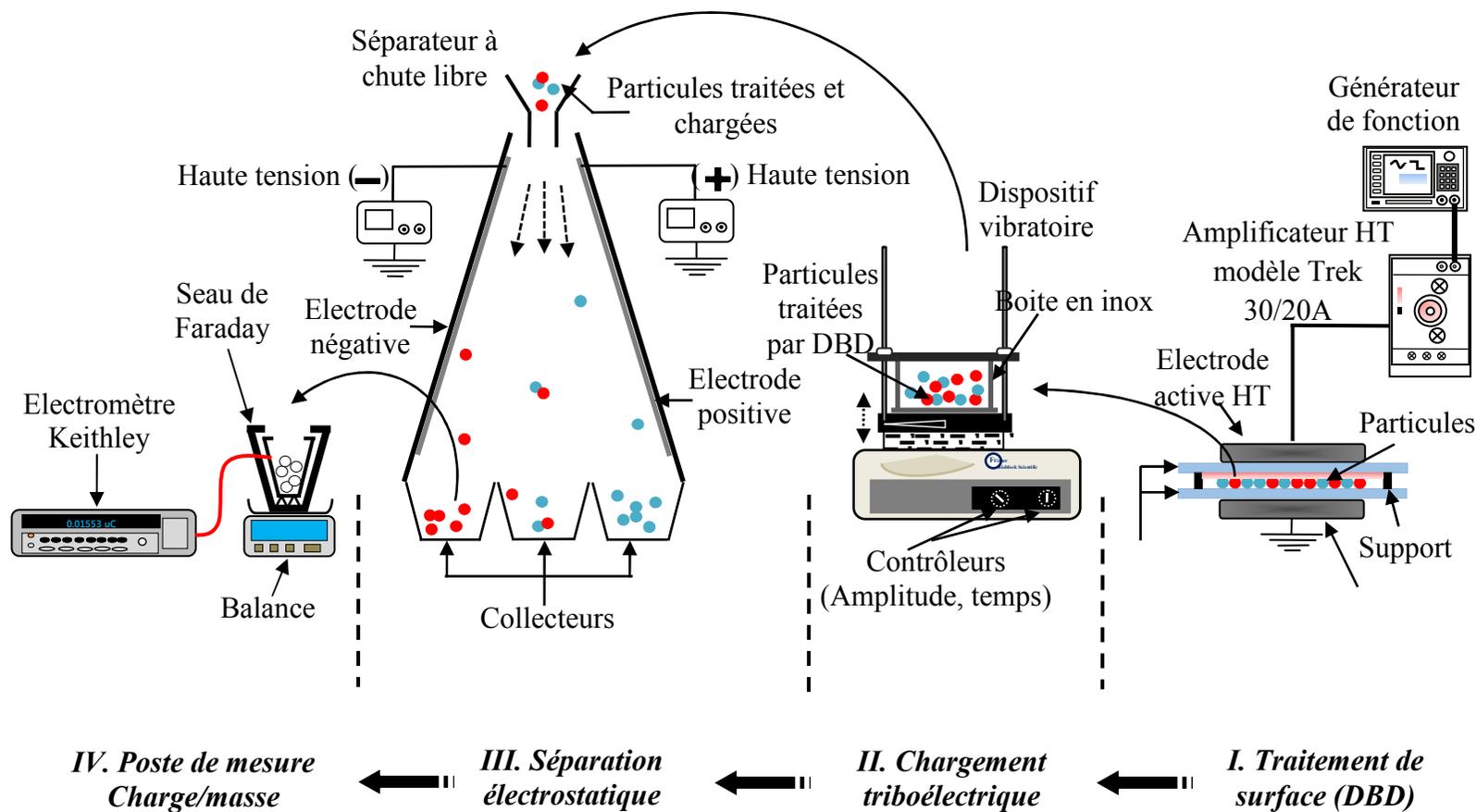


Figure IV.1 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires traités par la DBD.

Les mêmes quantités de granules des deux matériaux ont été traitées séparément dans le réacteur DBD, à une tension alternative de forme d'onde carrée ayant une amplitude de 30 kV et une fréquence de 800 Hz, pour plusieurs durées de traitement : 1s, 3s, 5s, 10s, 2min et 5min. Le choix de la fréquence est justifié par le fait que des essais préliminaires ont montré que la décharge DBD couvre une grande partie de la surface des particules pour cette fréquence (800 Hz). Au-delà de ce seuil, la décharge présente un aspect filamentaire et plus localisé. Cette situation devrait être évitée pour le traitement de surface des matériaux [115, 116, 124]. Après le processus de traitement de surface, les échantillons ont été ensuite chargés pendant 4 min dans le dispositif vibratoire. La charge des particules traitées a été mesurée avant et après le tribochargement. De cette façon, il était possible de comparer la charge des particules produite par l'effet triboélectrique avec et sans traitement par DBD.

IV.2.2 Séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires traités par la DBD

La deuxième série d'expériences a été réalisée sur un mélange binaire composé de 30 g de PVC et 30 g de PP. Les échantillons de ce mélange granulaire ont été traités par la DBD en utilisant la même tension et la même fréquence, pour les mêmes durées de traitement mentionnées dans la première série d'expériences. Ensuite, les particules traitées ont été maintenues dans le dispositif vibratoire de tribochargement pour la même durée (4 min). Les mélanges binaires chargés (particules de PVC et de PP non traitées ou traitées) ont été ensuite introduits dans le séparateur électrostatique à chute libre standard alimenté à ± 30 kV. Lorsque la séparation est achevée, la charge électrique (Q) et la masse (m) des deux produits récupérés ont été mesurées, le taux de récupération et le taux de pureté des deux plastiques ont été calculés pour les mélanges traités et non traités.

Toutes les expériences ont été effectuées dans l'air ambiant (la température: entre 21 °C et 23 °C et l'humidité relative: entre 29 % et 32 %). La charge électrique des échantillons a été estimée par un seau de Faraday connecté à un électromètre (Keithley Instruments, modèle 6514), tandis que la masse des particules a été pesée avec une balance électronique (précision de 0,01 g).

IV.3 Résultats et discussion

La **Figure IV.2** montre l'oscillogramme de l'évolution de la tension et du courant de décharge en fonction du temps d'une cellule de DBD, pour une tension carrée de 30 kV et une fréquence de 800 Hz.

On remarque que le courant de décharge est constitué de plusieurs impulsions et qui ont lieu uniquement lors des phases de la montée et de descente de la tension, ces impulsions sont très rapprochés, et correspondent aux micros décharges de la DBD. Le courant de décharge s'annule bien avant que la tension repasse par zéro, ceci traduit un arrêt de la décharge pendant le laps de temps précédent le renversement de la polarité. Lors du palier de la tension, les impulsions de courant sont presque inexistantes, cela laisse à penser que l'alimentation fournit la totalité de son énergie seulement lors des phases de transition de la haute tension. En effet, pendant l'alternance positive, les charges électriques qui se déposent sur la surface du diélectrique ne se relaxent pas aussitôt; elles induisent un champ électrique qui s'oppose au champ électrique extérieur dans le gap d'air, ce qui éteint la décharge. Sur l'alternance négative, les charges rémanentes permettent l'initiation de nouvelles décharges.

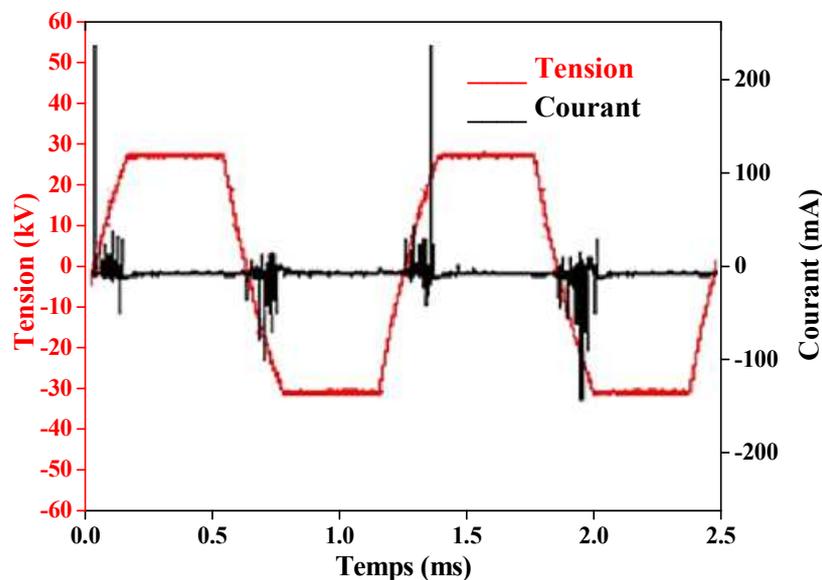


Figure IV.2 : Oscillogramme tension – courant d'une DBD. Conditions : Signal : Carré, Tension = 30 kV, Fréquence = 800 Hz.

IV.3.1 Influence de la décharge à barrière diélectrique sur le chargement triboélectrique

Les résultats des expériences de tribochargement sont montrés sur les **Figures IV.3**, pour les granules de PVC et de PP respectivement.

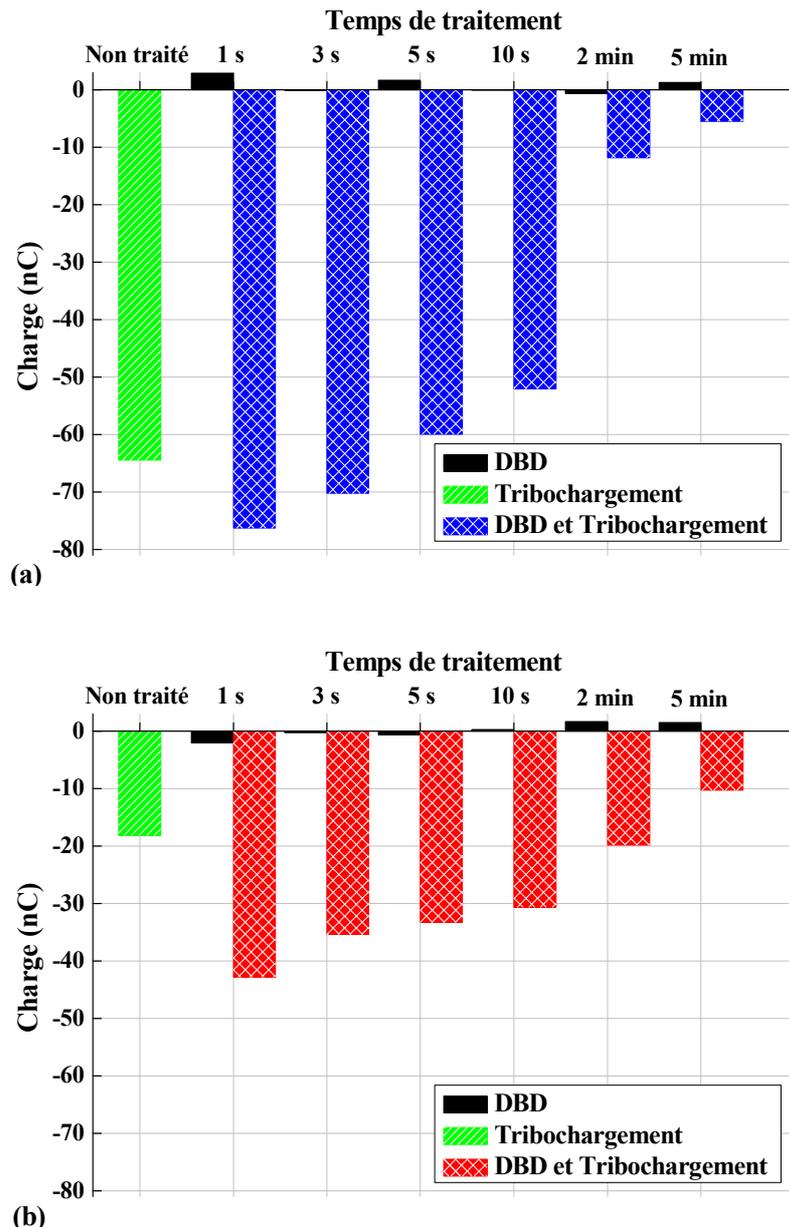


Figure IV.3 : Charge triboélectrique des particules traitées et non traitées par la DBD: (a) PVC; (b) PP.

D'après ces résultats, on peut constater que l'effet du traitement par la DBD dépend du temps de traitement, mais aussi du type de matériau [101]. L'augmentation du temps de traitement n'a pas un effet bénéfique remarquable sur la charge triboélectrique ce qui représente un réel avantage durant l'application industrielle. Selon [108, 125], l'exposition au plasma de la DBD à la pression atmosphérique provoque une gravure de surface (un matériau enlevé de la surface), résultant de la rupture de certaines liaisons et de l'élimination des fragments moléculaires de la surface du polymère. L'effet de gravure est lié à la densité de la puissance électrique transférée dans la décharge et au temps de traitement. Le traitement conduit à l'augmentation de la rugosité de surface et les molécules de H₂O adsorbées à la

surface du polymère, des phénomènes qui sont accompagnés par l'augmentation de la mouillabilité. L'humidité relative semble affecter fortement le mécanisme de triboélectrification des polymères [16, 126]. Presque aucune génération de charges par électrification n'apparaît à une humidité relative égale à 0 %, elle atteint le maximum à environ 30% et diminue le plus souvent aux valeurs au-delà de 40 % [16]. Ainsi, la modification des propriétés de surface probablement facilite l'humidification du matériau lors d'un traitement de DBD; dans ces circonstances, la charge acquise par le mécanisme triboélectrique peut diminuer. Le champ électrique de la décharge crée des sites de piégeage (défauts et d'impuretés) des charges dans le matériau. La présence de ces piègeages s'explique par la modification de la surface de l'isolant. Ainsi, le comportement du processus de chargement triboélectrique des matériaux change avec les propriétés de surfaces. Donc, ces piègeages jouent un rôle important dans le transfert de charge entre les matériaux frottés.

La variation de la charge triboélectrique relative due au traitement de DBD a été calculée comme suit:

$$\Delta Q_t \% = \frac{(Q_t(\text{traité}) - Q_0(\text{non traité}))}{Q_0(\text{non traité})} \times 100 \quad (\text{IV.1})$$

Où Q_0 est la charge triboélectrique des particules non traitées et Q_t la charge triboélectrique après exposition au plasma de DBD à une durée t . La **Figure IV.4** montre la variation de la charge triboélectrique en fonction du temps de traitement de DBD pour les deux matériaux. Le temps de traitement est un paramètre qui affecte à un degré différent les changements dans les propriétés de surface observés pour les deux polymères. La charge triboélectrique relative tend à diminuer avec l'augmentation de la durée du traitement et devient négative pour des valeurs de temps plus élevées. Les valeurs positives de ΔQ_t correspondent aux situations dans lesquelles la DBD peut améliorer la charge triboélectrique. Lorsque $\Delta Q_t = 0$, cela signifie que l'effet de DBD est nul, les valeurs négatives de ΔQ_t correspondent à l'inversion de l'effet de DBD, c'est-à-dire une diminution de la charge triboélectrique lors des longues durées d'exposition au plasma. La charge triboélectrique relative des particules de PP est plus importante que celle du PVC, pour tous les temps de traitement de DBD. Le temps de traitement où le taux de variation de la charge est zéro correspond à la durée maximale de l'exposition à la DBD qui provoque des effets positifs. À des durées d'exposition plus longues, les modifications de surface sont accompagnées par l'humidification de surface des polymères qui a un effet négatif sur le tribochargement. Cette valeur critique de temps d'exposition à la DBD est entre 3s et 5s pour le PVC et au-delà de 2

minutes pour le PP. La différence entre les effets de DBD sur les deux matériaux est due à la différence entre leurs structures chimiques, formes et rugosité de surfaces.

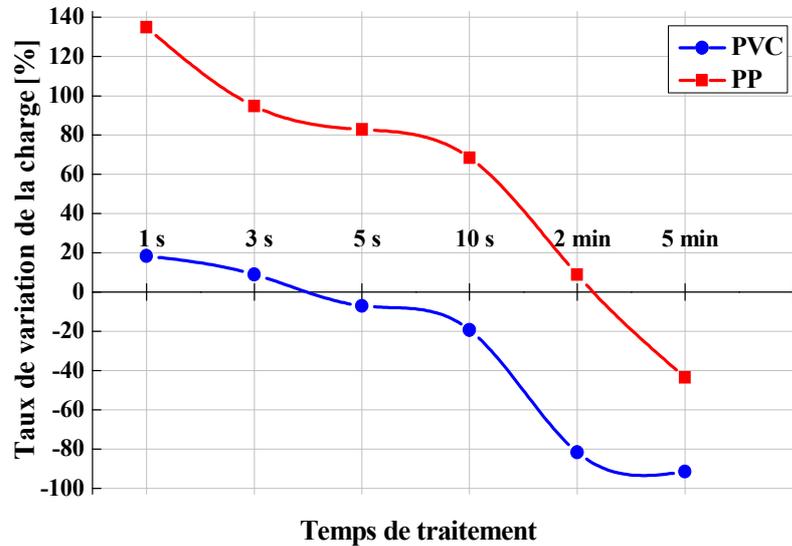


Figure IV.4 : Taux de variation de la charge triboélectrique des particules traitées par la DBD.

IV.3.2 Performances du séparateur avec des particules traitées

Les rapports charge/masse (Q/m) enregistrés pour les deux produits récupérés dans le collecteur d'un séparateur à chute libre des mélanges granulaires de PVC / PP traités par la DBD et chargés par effet triboélectrique sont présentés dans la **Figure IV.5**.

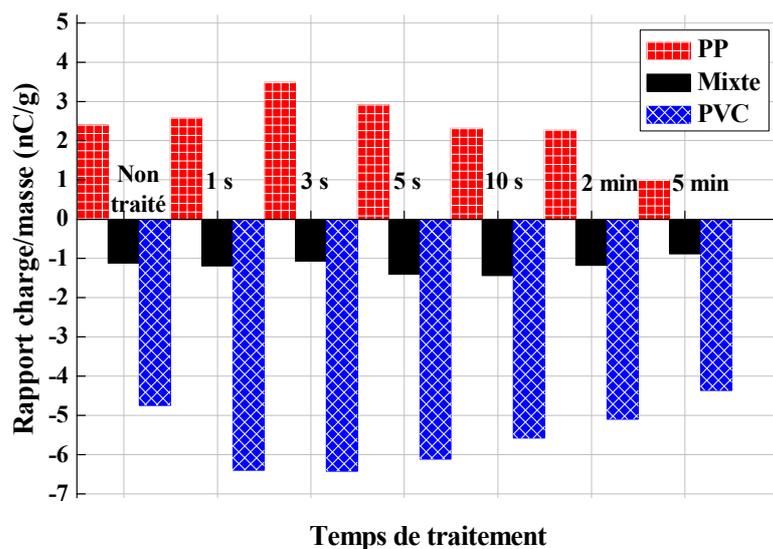


Figure IV.5 : Rapport charge/masse des produits séparés.

Quand les deux matériaux (PVC et PP) sont chargés séparément, ils acquièrent une charge négative. Mais, dans le mélange (PVC/PP), les particules de PVC seront chargées négativement et les particules de PP seront chargées positivement, en raison du contact entre eux. Les résultats de séparation (**Figure IV.5**) montrent que l'effet du traitement par la DBD sur le processus de séparation est fortement lié aussi à la durée d'exposition.

La **Figure IV.6** montre la masse totale récupérée dans chaque compartiment du collecteur après la séparation.

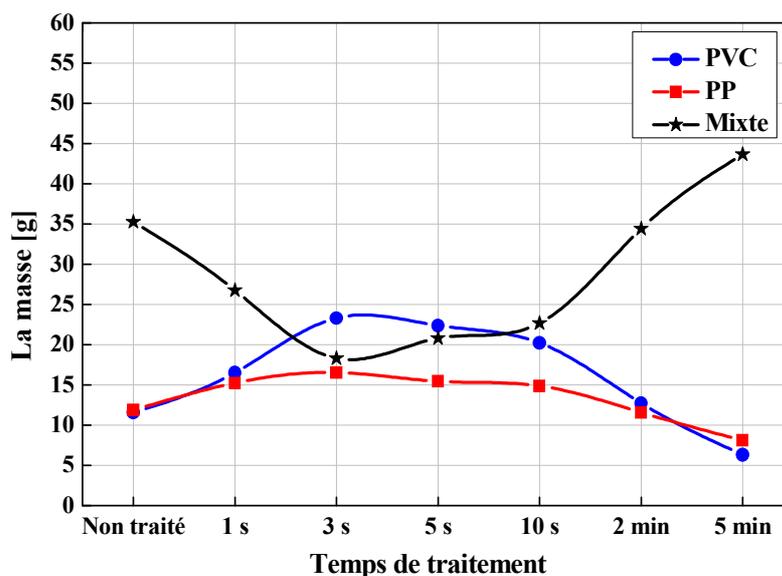


Figure IV.6 : La masse granulaire du PVC, PP et le produit mixte obtenus après la séparation électrostatique à partir de mélanges granulaires traités et non traités pour différents temps.

Le taux de récupération a été calculé comme le rapport de la masse de la matière pure du produit récupéré dans la boîte qui lui est destiné et la masse totale du même produit introduit dans le séparateur (**Tableau IV.1**).

Tableau IV.1 : Taux de récupération des deux produits récupérés (PVC et PP) en fonction de la durée de DBD.

	Non traité	1s	3s	5s	10s	2min	5min
Bac de PVC	30,56	43,8	61,4	60,96	54,4	34,53	17,36
Bac de PP	30,23	37,75	39,43	37,16	39,66	31,3	22,43

La charge maximale et les meilleurs résultats de séparation ont été obtenus à temps de traitement de 3s, une durée de traitement de DBD pour laquelle les quantités des produits récupérées ont été augmentées de plus de 104 % pour le PVC et de 30 % pour le PP, par rapport au cas des mélanges non traités. Cependant, pour des expositions plus longues, l'influence de la DBD devient moins important, son effet sur le chargement triboélectrique et la séparation peut être même renversée (**Figure IV.6**).

La composition du produit mixte, non séparé, obtenu dans des expériences effectuées sur des mélanges granulaires traités par la DBD dans différents temps est présentée sur la **Figure IV.7**.

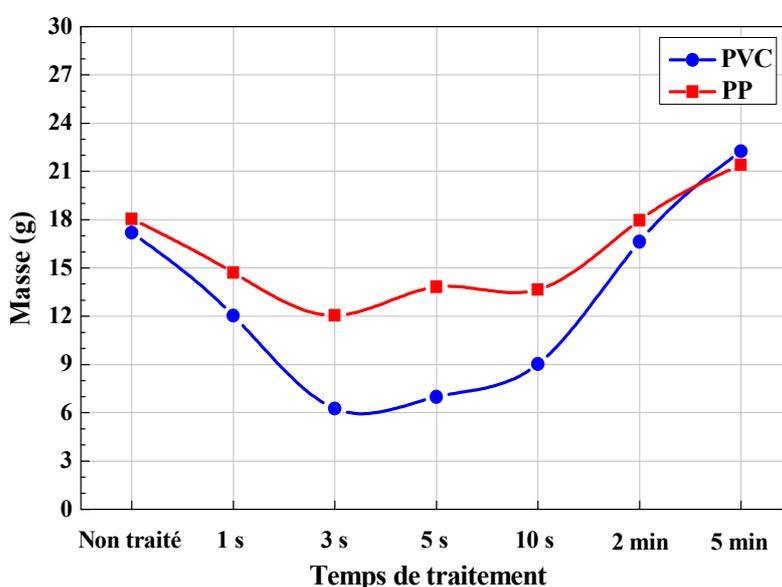


Figure IV.7 : Composition du produit mixte obtenu après la séparation électrostatique à partir de mélanges granulaires non traités et traités pour différents temps.

Dans l'intervalle de 3 s à 10 s, le PP constitue la plus grande partie du produit mixte, car il n'acquiert pas des charges aussi élevées que le PVC (**Figure IV.7**). Cependant, en dehors de cet intervalle, les quantités des deux matériaux du produit mixte dans le médium (produit non séparé) deviennent approximativement similaires. Cette observation consolide le résultat que l'influence de la DBD est différente d'un matériau à l'autre et dépend du temps d'exposition.

La pureté des produits récupérés n'a pas changé de manière significative avec le temps d'exposition (**Tableau IV.2**). La pureté a été calculée comme le rapport de la masse de la matière pure et la masse totale du produit récupéré dans la boîte qui lui est destinée.

Tableau IV.2 : Taux de pureté des deux produits récupérés (PVC et PP) en fonction de la durée de DBD.

	Non traité	1s	3s	5s	10s	2min	5min
PVC	79,12	79,63	78,95	81,75	80,71	81,31	82,3
PP	76,41	73,9	71,48	72,16	79,97	81,15	83,08

La différence entre la capacité de chargement observée pour les deux matériaux (PVC et PP) peut être attribuée à leurs propriétés (la conductivité et la permittivité), structure chimique, mais aussi à leurs formes. En effet, les particules caractérisées par des différentes formes et tailles ont des différentes surfaces de contact avec le plasma généré par la DBD, de sorte qu'ils se chargent différemment (**Figure IV.8**).

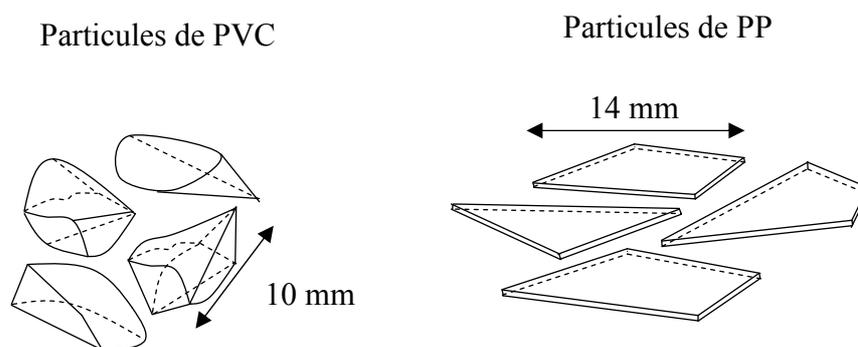


Figure IV.8 : Forme et taille des particules de plastique de PVC et PP.

Quelles que soient la forme et la taille des granules, leur exposition à une DBD avant le processus de chargement par effet triboélectrique peut nettement améliorer la charge acquise et, par conséquent, les résultats de séparation si la durée d'exposition est convenablement choisie. Les résultats obtenus indiquent que quelques secondes (moins de 10 s) sont suffisantes pour améliorer l'effet triboélectrique. Les temps courts sont donc appropriés pour le traitement et l'amélioration de la triboélectricité. Ce résultat est en soit un avantage lors d'un processus industriel puisque cela permet le gain en temps et en efficacité.

IV.4 Conclusions

Le traitement des granulaires provenant des déchets industriels par la DBD influence la charge triboélectrique et la séparation électrostatique des deux polymères (PVC et PP). Ainsi:

1. L'exposition de granulés de PVC et de PP à une DBD avant leur chargement par friction peut fortement renforcer l'effet triboélectrique.
2. La durée du traitement DBD joue un rôle crucial dans le processus. Les meilleurs effets de tribochargement et de séparation électrostatique sont obtenus pour des expositions relativement courtes au DBD (typiquement 3 s).
3. Pour les durées de traitement supérieures à 10 s, l'effet de la DBD est inversé et l'effet triboélectrique est plus pauvre.
4. Dans des conditions de fonctionnement optimales, les quantités de PVC et PP obtenues à partir d'un mélange granulaire traité par DBD dans un séparateur électrostatique à chute libre peut être augmenté de 104% et 30%, par rapport au cas non traité.
5. L'effet du traitement par la DBD sur la charge triboélectrique varie d'un matériau à l'autre.

CHAPITRE V

**ETUDE EXPERIMENTALE D'UN
SEPARATEUR A PLAN INCLINE**

Chapitre V Etude expérimentale d'un séparateur à plan incliné

La séparation électrostatique est considérée comme une technique multifactorielle difficilement contrôlable, appropriée pour le recyclage des matériaux granulaires plastiques préalablement chargés [36, 127]. Cette technique non polluante 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. Le résultat final est donc fortement lié aux différents paramètres du séparateur lui-même [127-129], à l'efficacité du dispositif de chargement [44, 93, 130], à l'humidité relative, à la taille des particules ...etc.

Le séparateur électrostatique à chute libre est l'un des dispositifs de séparation le plus basique. Son principe inclut l'action combinée des forces gravitationnelle et électrique afin de séparer un mélange d'isolants [93, 131]. Ce séparateur a fait l'objet de l'application de la présente étude en proposant une configuration plutôt inclinée. Une expérience d'amélioration du séparateur à chute libre à travers notamment l'angle d'inclinaison sera présentée.

Un des grands défis de la séparation électrostatique des mélanges granulaires isolants dans le séparateur à chute libre est le manque de la possibilité de contrôler la force gravitationnelle exercée sur les particules. La séparation électrostatique grâce au plan incliné a l'avantage d'être une méthode simple à mettre en œuvre et surtout d'assurer une solution efficace pour le tri des matériaux granulaires.

V.1 Mode de fonctionnement du séparateur à plan incliné

La charge des mélanges granulaires se produit par effet triboélectrique dans un dispositif de chargement à lit fluidisé. Les particules chargées sont attirées par l'électrode de polarité opposée. Tandis que, les particules non-chargées (ou 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. Le type du mouvement des particules dans ce séparateur est le glissement sur le plan, ce qui est différent de celui dans le séparateur à chute libre.

V.1.1 Forces exercées sur les particules

La **Figure V.1** illustre un schéma représentatif des forces électrostatiques et mécaniques qui agissent sur les particules durant le processus de séparation pour les deux types de séparateurs (à chute libre et à plan incliné). La particule de masse m , portant une charge Q et évoluant dans un champ électrique d'intensité E , assez uniforme.

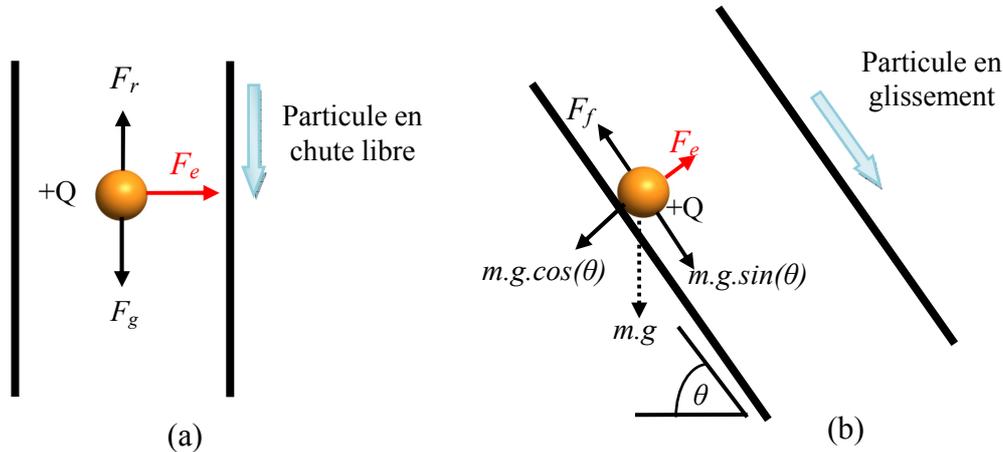


Figure V.1 : Représentation schématique des forces agissant sur une particule glisse dans un champ électrique : (a) configuration à chute libre ; (b) configuration à plan incliné.

1. Configuration à chute libre

Le mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique intense E créé entre les deux électrodes du séparateur à chute libre est affecté par l'action de la force du champ électrique F_e et la force gravitationnelle F_g (**Figure V.1(a)**), selon l'équation de la deuxième loi de Newton :

$$\Sigma F = m.a = F_e + F_g \quad (\text{V.1})$$

Avec :

$$F_e = Q.E \quad (\text{V.2})$$

$$F_g = m.g \quad (\text{V.3})$$

$$E = \frac{\Delta U}{d} \quad (\text{V.4})$$

F_r : Force de l'air négligeable.

m : Masse de la particule [Kg] ;

g : L'accélération de la pesanteur [m/s^2] ;

Q : La charge de la particule [C] ;

E : Le champ électrique [kV/m] ;

ΔU : La différence de potentiel [kV] ;

d : La distance entre les électrodes [m].

2. Configuration à plan incliné

Les particules chargées glissent le long d'un plan incliné faisant un angle θ avec l'horizontale (elles ne chutent pas verticalement), à travers un champ électrique intense E créé entre les deux électrodes du séparateur et sont soumis à l'action de plusieurs forces : la force du champ électrique F_e , la force gravitationnelle F_g et la force de frottement F_f (**Figure V.1(b)**). Le choix de l'axe x selon la pente du plan simplifie les équations suivantes :

$$\Sigma F = m.a = F_x + F_y \quad (\text{V.5})$$

Avec :

$$F_x = F_e + F_{gx} = Q.E + m.g.\cos\theta \quad (\text{V.6})$$

$$F_y = F_f + F_{gy} = m.g.\sin\theta \quad (\text{V.7})$$

F_f : Force de frottement négligeable dans ce cas en raison de la surface lisse du plan.

V.2 Application de la séparation électrostatique

L'étude expérimentale porte sur l'évaluation de l'efficacité de l'installation de séparation. On prend les mesures de la masse granulaire et la pureté des deux produits récupérés principaux grandeurs d'évaluation. Elles sont étudiées en fonction des deux paramètres de contrôle qui sont susceptibles d'affecter les performances du processus de séparation électrostatique à savoir la tension et le degré d'inclinaison. Les essais ont été réalisés sur des échantillons constitués en proportions égales (50 % - 50 %) de particules de PA et PC (§ II.1.1).

V.2.1 Procédure et configuration expérimentale

Les expériences ont été réalisées sur le séparateur électrostatique à plan incliné (**Figure V.2**). En premier lieu, les particules de mélange ont été chargées par effet triboélectrique dans un dispositif de chargement à lit fluidisé. Dans toutes les expériences, les paramètres du système de tribochargement étaient maintenus constants : le temps de fluidisation : $t = 2$ min ; la vitesse de l'air de fluidisation assurée par le souffleur : $V = 3,6$ m/s. Ensuite, les particules chargées sont versées sur le plan incliné du séparateur (la zone de séparation entre les deux électrodes) à l'aide d'un entonnoir avec un débit d'alimentation : $D = 1.1$ g/s.

Les essais de séparation ont été effectués, en faisant varier les deux facteurs principaux qui peuvent influencer le processus. Il s'agit de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur et l'angle d'inclinaison de l'installation. Ces deux facteurs ont été variés de ± 5 kV à ± 10 kV pour la tension, et de 25° à 90° pour l'angle d'inclinaison. La valeur minimale de

l'angle (25°) a été choisie après de nombreuses expériences préliminaires. Ainsi, on a observé que les particules ne peuvent pas glisser sur le plan aux angles plus bas que cette valeur, la valeur maximum (90°) correspond au cas de séparateur standard à chute libre. Lorsque la séparation est achevée, la masse (m) des deux produits récupérés dans le collecteur a été mesurée, le taux de récupération et le taux de pureté des deux matériaux ont été calculés pour déterminer les valeurs de ces facteurs susceptibles d'assurer la meilleure séparation d'un mélange PA-PC.

Les expériences ont été réalisées dans les mêmes conditions d'humidité et de température, afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de séparation. L'humidité relative pendant l'étude expérimentale était entre 40 % et 41 % et la température ambiante était entre 21°C et 22°C .

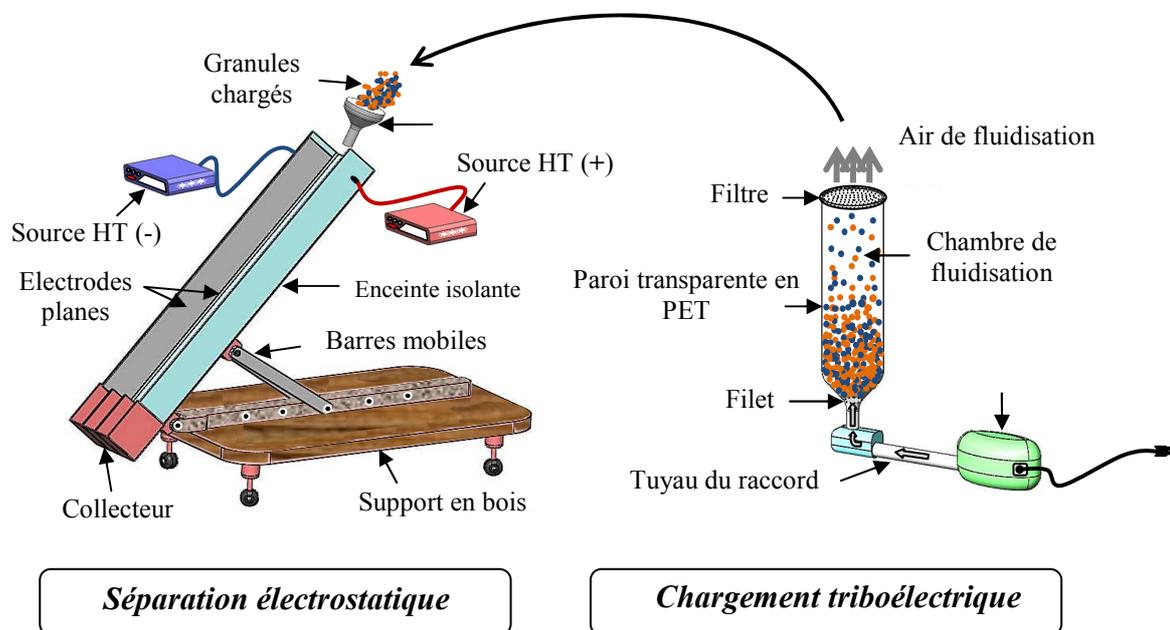


Figure V.2 : Représentation schématique de l'installation expérimentale pour l'étude du processus de séparation en utilisant le séparateur à plan incliné.

La performance du processus de séparation est estimée après le pesage des quantités relatives des deux produits collectées dans chaque compartiment afin de calculer les taux de récupération et de pureté de chaque matériau. Ces deux indicateurs déterminent l'efficacité du processus.

Le taux de récupération et le taux de pureté des produits séparés ont été calculés par les formules suivantes :

1. *Le taux de récupération* : C'est un paramètre qui permet d'évaluer le taux (en pourcentage) du produit récupéré en rapport avec le produit total introduit :

$$Rec(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{it}} \times 100 \quad (V.8)$$

Avec :

m_{ic} : La quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{it} : La quantité totale du même produit i introduit dans le séparateur.

2. *Le taux de pureté* : C'est un paramètre permet d'évaluer le taux de la pureté (en pourcentage) du produit collecté.

$$Pur(\%) = \frac{m_{ic}}{m_{tc}} \times 100 \quad (V.9)$$

Avec :

m_{ic} : La quantité du produit i considéré collecté dans la partie qui lui est destinée.

m_{tc} : La quantité totale (des deux produits) collectée dans la même partie du collecteur.

V.2.2 Résultats du séparateur à plan incliné

Lorsque les particules du mélange sont introduites dans la chambre de fluidisation, elles subissent deux types de collisions: «particule/particule» et «particule/paroi de la chambre» (Figure V.3).

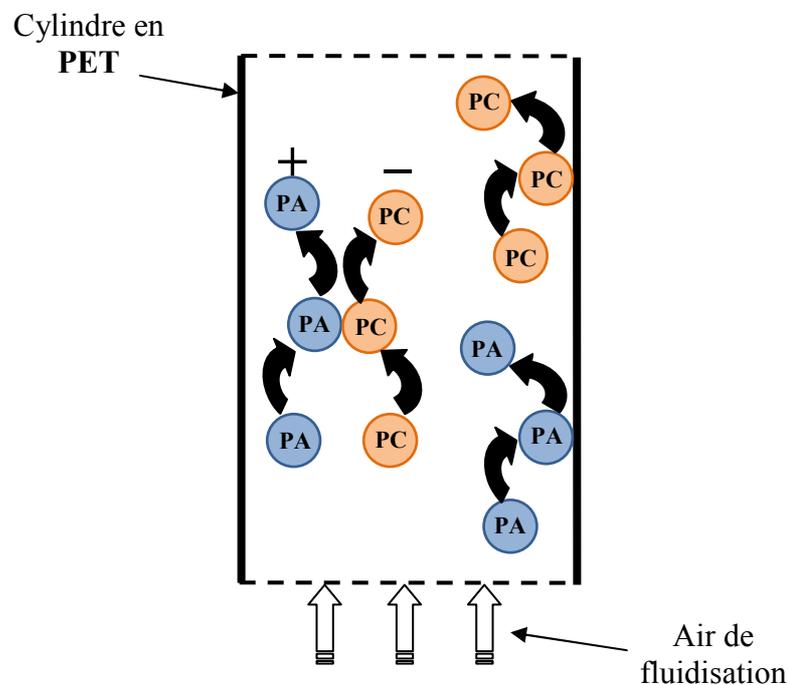


Figure V.3 : Types de collisions à l'intérieur de la chambre de fluidisation.

Selon la série triboélectrique de la **Figure V.4**, le PA frotté contre le PC donne une charge négative pour le PC et positive pour le PA. Cependant, le mélange PA - PC en contact avec la boîte en PET donne une charge positive pour le PA et le PC et une charge négative sur la boîte PET: la polarité de la charge dépend de la position du matériau dans la série triboélectrique.



Figure V.4 : Série triboélectrique de matériaux isolants utilisés.

La **Figure V.5** représente une photographie des produits récupérés dans les trois compartiments du collecteur après la séparation d'un mélange granulaire 50 %-50 % composé des deux matériaux PA-PC (§ II.1.1).

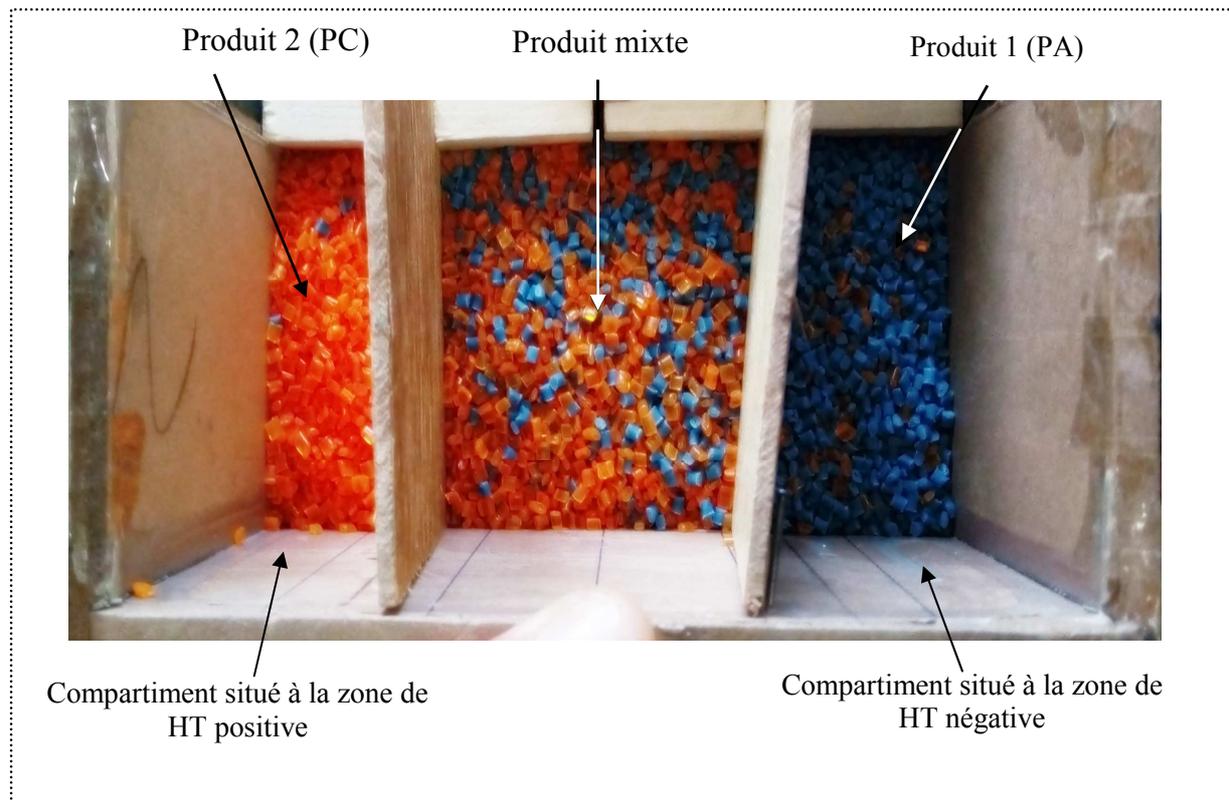


Figure V.5 : Photographie des deux produits séparés et le produit mixte dans les trois compartiments du collecteur.

V.2.2.1 Influence de la haute tension

1. Taux de récupération

Les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur sont montrés sur la **Figure V.6**, pour deux angles d'inclinaison (90° et de 25°).

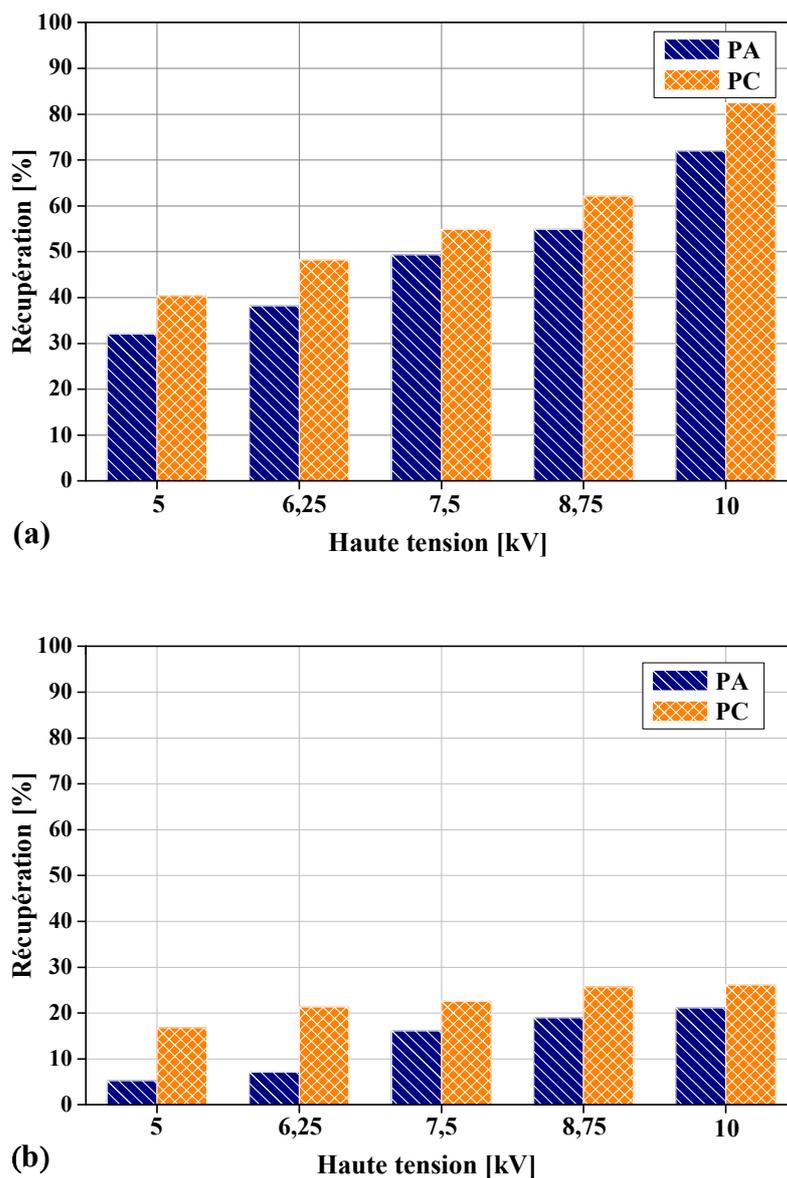


Figure V.6 : Taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de la haute tension appliquée : (a) $\theta = 25^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$.

2. Taux de pureté

La pureté des deux produits récupérés en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes du séparateur est montrée sur la **Figure V.7**.

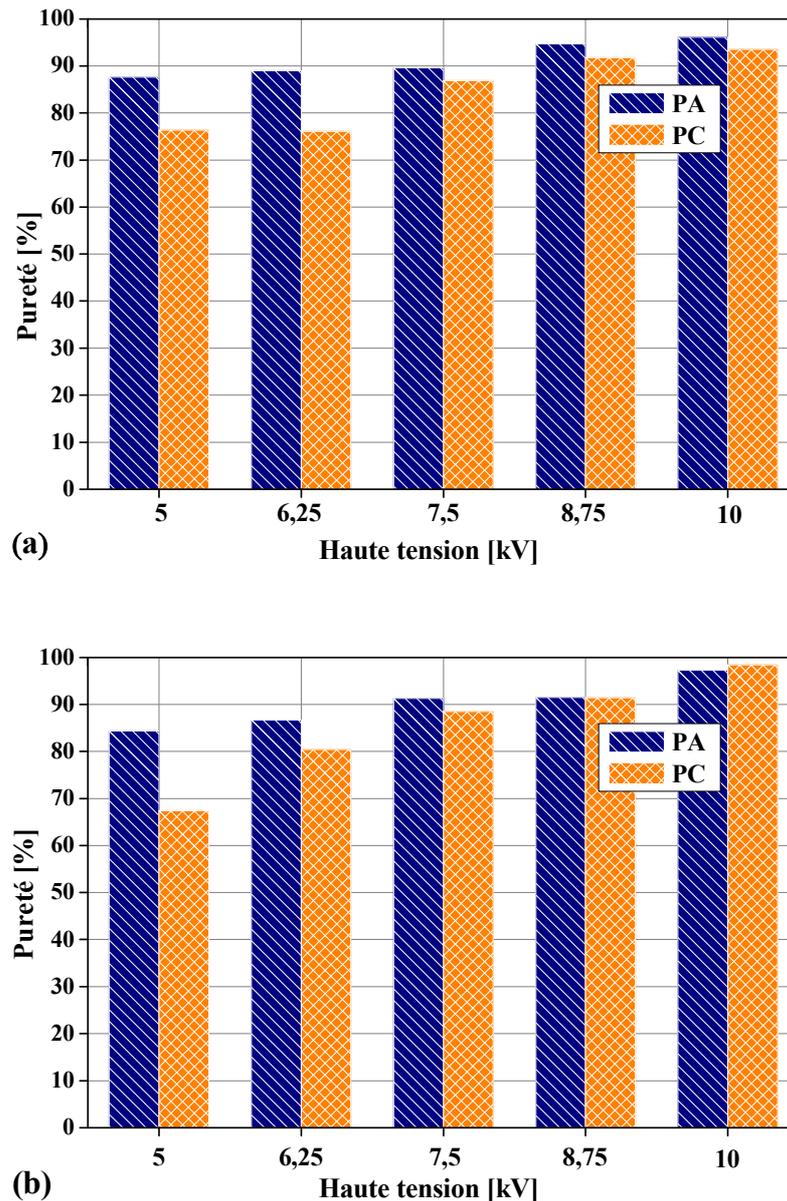


Figure V.7 : Taux de pureté des produits obtenus après la séparation en fonction de la haute tension appliquée : (a) $\theta = 25^\circ$; (b) $\theta = 90^\circ$.

Les résultats présentés sur les **Figures V.6** et **V.7** concernant l'efficacité de la séparation en fonction de la haute tension appliquée aux électrodes montrent que les résultats de séparation s'améliorent avec l'augmentation de la tension et ce évidemment dans les limites des tensions considérées. En effet, les taux de récupération augmentent avec la haute tension appliquée quelque soit l'angle d'inclinaison (**Figures V.6**). Ce résultat est dû à l'augmentation du champ électrique et, par conséquent, à l'augmentation de la force électrique appliquée aux particules. Cependant, il faut noter la grande différence des résultats obtenus à 25° et 90° . Dans le premier cas, les résultats sont nettement meilleurs même à des

tensions faibles comparativement au deuxième cas (**Figure V.7**). A partir de là, l'angle d'inclinaison a un effet très important sur l'efficacité du processus de séparation [132].

La **Figure V.7** représente la pureté des produits récupérés à différentes tensions appliquées. Elles montrent que quelque soit l'angle, la pureté des deux produits récupérés est légèrement augmentée avec la haute tension appliquée. Bien que la masse et la taille de chaque particule de PA soient plus petites que celle d'une particule de PC, ce dernier présente des valeurs de pureté inférieure à celui du PA. Cette observation s'explique par le fait que les particules de PA se chargent positivement et que les particules de PC se chargent négativement en raison des collisions entre eux. Mais, quand les particules des deux matériaux entrent séparément en collision avec les parois de la chambre de chargement en Polyéthylène téréphtalate « PET », ils acquièrent une charge négative. De sorte que la charge acquise par les particules de PC augment d'avantage en raison du contact avec les parois de PET. Par contre, en raison de leur contact avec les parois du PET, certaines particules de PA perdent une partie de leur charge puisqu'elles sont chargées avec une polarité opposée; ce qui conduit à leur passage à la boîte de produit PC et donc la réduction de la pureté du PC.

V.2.2.2 Influence de l'angle d'inclinaison

1. Taux de récupération

Les résultats des expériences de séparation en termes de taux de récupération des deux produits en fonction de l'angle d'inclinaison sont montrés sur la **Figure V.8**. Variant l'angle d'inclinaison de $\theta = 25^\circ$ jusqu'à $\theta = 90^\circ$ par un pas de $16,25^\circ$.

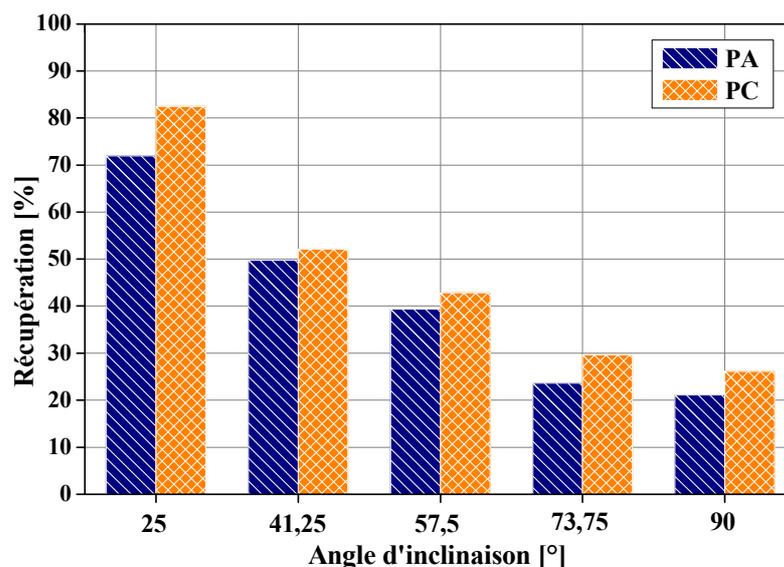


Figure V.8 : Taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.

La variation du taux de récupération due à l'angle d'inclinaison du séparateur à plan incliné a été calculée par l'équation suivant :

$$\Delta Rec(\theta_i)\% = \frac{(Rec_{(\theta_i)} - Rec_{(90^\circ)})}{Rec_{(90^\circ)}} \times 100 \quad (V.10)$$

Où $Rec_{(90^\circ)}$ est le taux de récupération des produits séparés lors d'un angle 90° (cas du séparateur à chute libre standard) et $Rec_{(\theta_i)}$ est la récupération des produits séparés dans le séparateur à plan incliné d'un angle θ_i déterminé par rapport à l'horizontale. La **Figure V.9** montre la variation du taux de récupération relative en fonction de l'angle d'inclinaison pour les deux produits séparés.

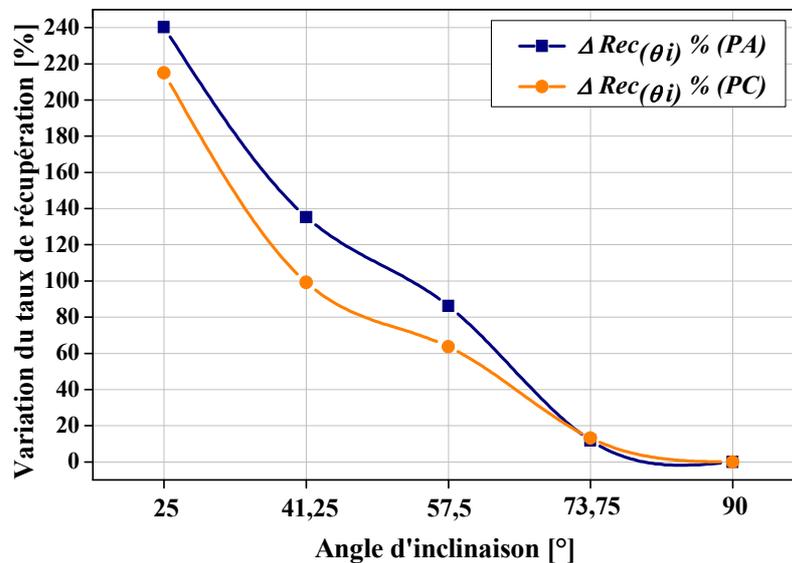


Figure V.9 : Variation du taux de récupération des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.

1. Taux de pureté

La **Figure V.10** représente la pureté des deux produits dans les compartiments latéraux en fonction de l'angle d'inclinaison.

Les résultats montrés sur les **Figures V.8** et **V.9** prouvent que l'angle d'inclinaison influence de manière significative le taux de récupération des produits séparés. Clairement, le taux de récupération diminue avec l'angle d'inclinaison (**Figure V.8**), puisque l'augmentation de l'angle d'inclinaison conduit nécessairement à l'augmentation de la force gravitationnelle ce qui augmente aussi la vitesse des particules. Cela mène à la réduction du temps de transit des particules [133]. En conséquence, pendant le processus de séparation, la plupart des

particules tombent dans le compartiment qui se trouve au milieu du collecteur. La **Figure V.9** résume l'effet de l'angle d'inclinaison sur le taux de récupération des deux produits (PA et PC). Il est clair que plus l'angle est petit plus la récupération est meilleure, en comparaison au cas de la chute libre. La **Figure V.10** montre que la pureté des produits récupérés n'est pas significativement affectée par la variation de l'angle d'inclinaison. En effet, dans tous les cas, la valeur de la pureté est supérieure à 90 % pour les deux produits.

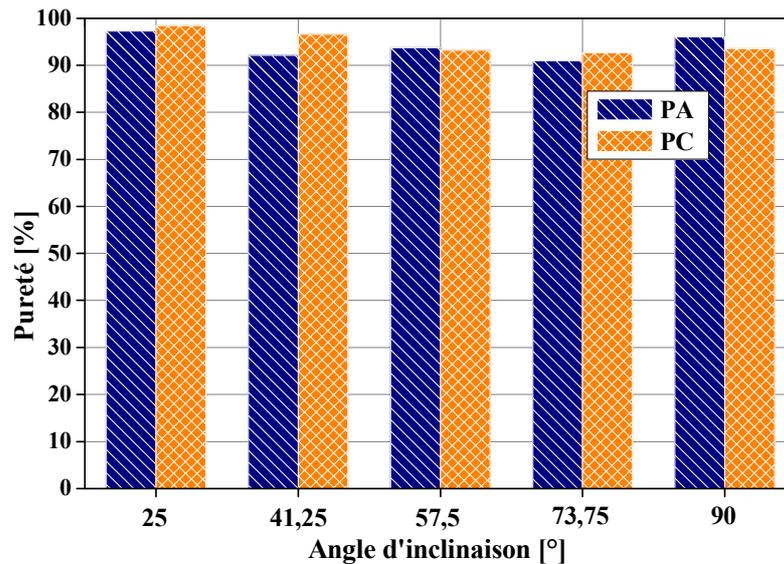


Figure V.10 : Taux de pureté des produits obtenus après la séparation en fonction de l'angle d'inclinaison.

En résumé, les meilleurs résultats s'obtiennent à des tensions élevées (10 kV dans notre cas) et un angle d'inclinaison le plus bas (25 °). En conséquence, à 10 kV et 25 °, le taux de récupération était supérieur à 70 %, et la pureté des produits était environ 97 % pour le PA et 98 % pour le PC.

V.3 Conclusions

Dans ce chapitre, une étude expérimentale d'une configuration inclinée d'un séparateur électrostatique à chute libre a été réalisée. Les résultats obtenus montrent clairement que les paramètres étudiés (la haute tension appliquée et l'angle d'inclinaison) influencent énormément le taux de récupération et le taux de pureté des produits obtenus d'un mélange granulaire PA-PC.

1. La haute tension influe considérablement à la fois la récupération et la pureté.
2. L'angle d'inclinaison agit uniquement sur la récupération des produits séparés.
3. En augmentant la haute tension appliquée et en diminuant l'angle d'inclinaison il est possible d'augmenter le taux de récupération des produits obtenus par rapport à la configuration standard à chute libre, sans diminuer leurs taux de pureté.
4. Il est intéressant de noter que le but de ce travail est non pas seulement d'étudier l'influence de ces paramètres sur l'efficacité de séparation, mais de contribuer à l'amélioration du séparateur à chute libre et ainsi de prouver l'efficacité du prototype proposé (séparateur à plan incliné), qui va permettre l'amélioration du processus de séparation électrostatique destiné au recyclage des matériaux isolants.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Le recyclage des déchets en plastiques nécessite le développement de nouvelles technologies de séparation triboélectrostatique due à la grande diversité de ces matériaux, le résultat final de cette technologie est fortement lié à l'efficacité du processus de tribochargement. Le procédé de traitement de surface par la DBD peut être utilisé pour favoriser la charge triboélectrique des particules afin d'améliorer la séparation des mélanges granulaires composés de granules issus de matériaux différents.

La conclusion générale de nos travaux peut être formulée ainsi: le traitement de surface par la DBD est une technique efficace d'une part pour la modification de l'état de surface des matériaux granulaires isolants provenant des déchets industriels, et d'autre part pour l'amélioration de leurs caractéristiques de chargement triboélectrique, ainsi que les résultats de séparation. Dans notre travail, ce procédé de traitement de surface est caractérisé par des coûts d'exploitation et d'entretien réduits, ainsi que par une faible consommation d'énergie grâce à la courte durée de fonctionnement.

D'une manière générale, la thèse a apporté plusieurs contributions dans ce domaine :

- Evaluation des effets de plusieurs facteurs électriques et géométriques de la DBD dans des conditions normales de température et de pression sur l'efficacité du processus de chargement triboélectrique.
- Etude expérimentale de la séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires traités par la DBD (PVC et PP).
- Réalisation d'une installation expérimentale pour la séparation triboélectrostatique "le séparateur à plan incliné".
- Etude de l'effet de l'angle d'inclinaison et la tension appliquée aux électrodes du séparateur à plan incliné sur le taux de récupération et le taux de pureté des produits séparés.

- Etude expérimentale comparative de la séparation triboélectrostatique des mélanges granulaires (PA et PC) à une concentration des constituants : 50% -50% pour le séparateur à chute libre et le prototype réalisé.

Perspectives

Comme perspectives intéressantes à ce travail, il nous paraît important de développer les points suivants :

- Étudier l'influence des autres paramètres géométriques de la DBD sur le comportement triboélectrique des matériaux granulaires traités, tels que : les dimensions des barrières diélectriques et des électrodes, les matériaux des électrodes... etc.
- Utilisation d'autre système d'électrode de DBD afin d'améliorer les conditions de traitement de surface des matériaux granulaires.
- Monter un prototype réunissant le système de DBD et le dispositif de chargement, afin de coupler les deux processus dans des conditions atmosphériques contrôlables.
- Elargir notre étude à d'autres matériaux. Ceci permettra de généraliser les conclusions sur le rendement de la séparation dans notre prototype de séparateur.

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] Das, S., Samuila, A., Dragan, C., & Dascalescu, L. "Behaviour of charged insulating particles in contact with a rotating roll electrode." *Journal of Electrostatics*, vol. 67 (2-3), p.189-192, 2009.
- [2] Castle, G. S. P. "Contact charging between insulators." *Journal of Electrostatics*, vol. 40, p. 13-20, 1997.
- [3] Giacometti, J. A., & Oliveira, O. N. "Corona charging of polymers." *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. 27(5), p. 924-943, 1992.
- [4] Labergue, A. "Etude de décharges électriques dans l'air pour le développement d'actionneurs plasmas—Application au contrôle de décollements d'écoulements." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2005.
- [5] Raju, G. G. "Gaseous electronics, theory and practice." CRC Taylor and Francis, 2006.
- [6] Dragan, C. "Modélisation du processus de charge et séparation tribo-aéro- électrostatique de matériaux plastiques granulaires." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2010.
- [7] Matsusaka, S., Maruyama, H., Matsuyama, T., & Ghadiri, M. "Triboelectric charging of powders: A review." *Chemical Engineering Science*, vol. 65(22), p. 5781-5807, 2010.
- [8] Forward, K. M., Lacks, D. J., & Sankaran, R. M. "Triboelectric Charging of Granular Insulator Mixtures Due Solely to Particle– Particle Interactions." *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 48(5), p. 2309-2314, 2008.
- [9] Shaw, P. E. "Experiments on tribo-electricity. I.—The tribo-electric series." *Proc. R. Soc. Lond. A*, vol. 94(656), p. 16-33, 1917.
- [10] Matsushita, Y., Mori, N., & Sometani, T. "Electrostatic separation of plastics by friction mixer with rotary blades." *Electrical engineering in Japan*, vol. 127(3), p. 33-40, 1999.
- [11] Diaz, A. F., & Felix-Navarro, R. M. "A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties." *Journal of Electrostatics*, vol. 62(4), p. 277-290, 2004.
- [12] Iuga, A., Calin, L., Neamtu, V., Mihalcioiu, A., & Dascalescu, L. "Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device." *Journal of Electrostatics*, vol. 63(6-10), p. 937-942, 2005.
- [13] Park, C. H., Jeon, H. S., Cho, B. G., & Park, J. K. "Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire." *Polymer Engineering & Science*, vol. 47(12), p. 1975-1982, 2007.

- [14] Park, C. H., Park, J. K., Jeon, H. S., & Chun, B. C. "Triboelectric series and charging properties of plastics using the designed vertical-reciprocation charger." *Journal of Electrostatics*, vol. 66(11-12), p. 578-583, 2008.
- [15] Escalante, S. L., Touchard, G., & Dominguez, G. "Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes." In *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Annual Report Conference on. IEEE*, pp. 694-697, 2002.
- [16] McCarty, L. S., & Whitesides, G. M. "Electrostatic charging due to separation of ions at interfaces: contact electrification of ionic electrets." *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 47(12), p. 2188-2207, 2008.
- [17] Călin, L. F. "Séparation électrostatique des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques en utilisant la triboélectrisation en lit fluidisé." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2008.
- [18] Hammi, T. "Étude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles." Thèse de Doctorat, Université de Lille 1, 2005.
- [19] Wei, W., & Gu, Z. "Electrification of particulate entrained fluid flows—mechanisms, applications, and numerical methodology." *Physics Reports*, vol. 600, p. 1-53, 2015.
- [20] Zhu, G., Chen, J., Liu, Y., Bai, P., Zhou, Y. S., Jing, Q., ... & Wang, Z. L. "Linear-grating triboelectric generator based on sliding electrification." *Nano letters*, vol. 13(5), p. 2282-2289, 2013.
- [21] Greason, W. D. "Investigation of a test methodology for triboelectrification." In *Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium Proceedings*, vol. 1999, pp. 344-351. IEEE, 1999.
- [22] Brennan, W. J., Lowell, J., O'Neill, M. C., & Wilson, M. P. W. "Contact electrification: the charge penetration depth." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 25(10), p. 1513, 1992.
- [23] Davies, D. K. "Charge generation on dielectric surfaces." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 2(11), p. 1533, 1969.
- [24] Bailey, A. G. "The charging of insulator surfaces." *Journal of Electrostatics*, vol. 51, p. 82-90, 2001.
- [25] Lowell, J., & Rose-Innes, A. C. "Contact electrification." *Advances in Physics*, vol. 29(6), p. 947-1023, 1980.
- [26] Lowell, J., & Truscott, W. S. "Triboelectrification of identical insulators. II. Theory and further experiments." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 19(7), p. 1281, 1986.
- [27] Gu, Z., Wei, W., Su, J., & Yu, C. W. "The role of water content in triboelectric charging of wind-blown sand." *Scientific reports*, vol. 3, p.1337, 2013.

- [28] Soh, S., Kwok, S. W., Liu, H., & Whitesides, G. M. "Contact de-electrification of electrostatically charged polymers." *Journal of the American Chemical Society*, vol. 134(49), p. 20151-20159, 2012.
- [29] Mirkowska, M., Kratzer, M., Teichert, C., & Flachberger, H. "Principal Factors of Contact Charging of Minerals for a Successful Triboelectrostatic Separation Process—a Review." *BHM Berg-und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 161(8), p. 359-382, 2016.
- [30] Baytekin, H. T., Patashinski, A. Z., Branicki, M., Baytekin, B., Soh, S., & Grzybowski, B. A. "The mosaic of surface charge in contact electrification." *Science*, vol. 333(6040), p. 308-312, 2011.
- [31] Baytekin, H. T., Baytekin, B., Incorvati, J. T., & Grzybowski, B. A. "Material transfer and polarity reversal in contact charging." *Angewandte Chemie*, vol. 124(20), p. 4927-4931, 2012.
- [32] Dodbiba, G., Sadaki, J., Okaya, K., Shibayama, A., & Fujita, T. "The use of air tabling and triboelectric separation for separating a mixture of three plastics." *Minerals Engineering*, vol. 18(15), p. 1350-1360, 2005.
- [33] Laurentie, J. C., Traoré, P., & Dascalescu, L. "Discrete element modeling of triboelectric charging of insulating materials in vibrated granular beds." *Journal of Electrostatics*, vol. 71(6), p. 951-957, 2013.
- [34] Aksa, W., & Medles, K. "Réalisation et étude d'un séparateur aérodynamique semi-industriel pour la récupération de particules isolantes." *Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-bel-abbes*, 2014.
- [35] Rezoug, M., Ouiddir, R., Aksa, W., Medles, K., Bilici, M., & Dascalescu, L. "Tribo-aero-electrostatic separator for ternary mixtures of granular plastics." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 51(2), p. 1161-1167, 2015.
- [36] Wu, G., Li, J., & Xu, Z. "Triboelectrostatic separation for granular plastic waste recycling: A review." *Waste Management*, vol. 33(3), p. 585-597, 2013.
- [37] Coste, J., & Pechery, P. "Influence of surface profile in polymer-metal contact charging." *Journal of Electrostatics*, 10, 129-136, 1981.
- [38] Dascalescu, L., Urs, A., Bente, S., Huzau, M., & Samuila, A. "Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices." *Journal of electrostatics*, vol. 63(6-10), p. 705-710, 2005.
- [39] Németh, E., Albrecht, V., Schubert, G., & Simon, F. "Polymer tribo-electric charging: dependence on thermodynamic surface properties and relative humidity." *Journal of Electrostatics*, vol. 58(1-2), p. 3-16, 2003.
- [40] Yanar, D. K., & Kwetkus, B. A. "Electrostatic separation of polymer powders." *Journal of Electrostatics*, vol. 35(2-3), p. 257-266, 1995.
- [41] Taylor, D. M., & Secker, P. E. "Industrial electrostatics: Fundamentals and measurements." *Research Studies Pre, London*, vol. 13, 1994.

- [42] Haenen, H. T. M. "Experimental investigation of the relationship between generation and decay of charges on dielectrics." *Journal of Electrostatics*, vol. 2(2), p. 151-173, 1976.
- [43] Iuga, A., Samuila, A., Morar, R., Bilici, M., & Dascalescu, L. "Tribocharging techniques for the electrostatic separation of granular plastics from waste electric and electronic equipment." *Particulate Science and Technology*, vol. 34(1), p. 45-54, 2016.
- [44] Li, J., Wu, G., & Xu, Z. "Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation." *Waste management*, vol. 35, p. 36-41, 2015.
- [45] Miloudi, M., Medles, K., Tilmatine, A., Brahami, M., & Dascalescu, L. "Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials." *Journal of Electrostatics*, vol. 69(6), p. 631-637, 2011.
- [46] Hogue, M. D., Buhler, C. R., Calle, C. I., Matsuyama, T., Luo, W., & Groop, E. E. "Insulator-insulator contact charging and its relationship to atmospheric pressure." *Journal of electrostatics*, vol. 61(3-4), p. 259-268, 2004.
- [47] Boukhoulda, M. F., Miloudi, M., Medles, K., Rezoug, M., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. "Experimental modeling of a new triboelectrostatic separation process for mixed granular polymers." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49(6), p. 2375-2381, 2013.
- [48] Bilici, M., Dascalescu, L., Dragan, C., Fati, O., Iuga, A., & Samuila, A. "Tribocharging and electrostatic separation of mixed granular solids in fluidized bed devices." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 18(5), p. 1476-1483, 2011.
- [49] Miloudi, M., Remadnia, M., Dragan, C., Medles, K., Tilmatine, A., & Dascalescu, L. "Experimental study of the optimum operating conditions of a pilot-scale tribo-aero-electrostatic separator for mixed granular solids." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49(2), p. 699-706, 2013.
- [50] Tilmatine, A., Benabboun, A., Brahmi, Y., Bendaoud, A., Miloudi, M., & Dascalescu, L. "Experimental investigation of a new triboelectrostatic separation process for mixed fine granular plastics." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50(6), p. 4245-4250, 2014.
- [51] Fodil, B. M., Karim, M., Mohamed, M., Amar, T., Abdelber, B., & Dascalescu, L. "Effect of ambient humidity on the outcome of electrostatic separation process for mixed granular polymers." In *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE*, p. 1-5, 2013.
- [52] Siemens, W. V. "Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrähnen." *Annalen der Physik*, vol. 178(9), p. 66-122, 1857.
- [53] Andrews, T., & Tait, P. G. "On the volumetric relations of ozone, and the action of the electrical discharge on oxygen and other gases." *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, vol. 150, p. 113-131, 1860.
- [54] Warburg, E., & Leithäuser, G. "Über die Analyse der Stickoxyde durch ihre Absorptionsspektren im Ultrarot." *Annalen der Physik*, vol. 333(2), p. 313-325, 1909.

- [55] Warburg, E. "Über die Ozonisierung des Sauerstoffs durch stille elektrische Entladungen." *Annalen der Physik*, vol. 318(3), p. 464-476, 1904.
- [56] Buss, K. "Die elektrodenlose Entladung nach Messung mit dem Kathodenzillographen." *Archiv für Elektrotechnik*, vol. 26(4), p. 261-265, 1932.
- [57] Benard, N., Zouzou, N., Claverie, A., Sotton, J., & Moreau, E. "Optical visualization and electrical characterization of fast-rising pulsed dielectric barrier discharge for airflow control applications." *Journal of Applied Physics*, vol. 111(3), p. 033303, 2012.
- [58] Kwon, S. B., Sakurai, H., Seto, T., & Kim, Y. J. "Charge neutralization of submicron aerosols using surface-discharge microplasma." *Journal of aerosol science*, vol. 37(4), p. 483-499, 2006.
- [59] Moussaoui, A., Kachi, M., Zouaghi, A., & Zouzou, N. "Neutralization of charged dielectric materials using a dielectric barrier discharge." *Journal of Electrostatics*, vol. 87, p. 102-109, 2017.
- [60] Wang, X., Fan, Q., Chen, Z., Wang, Q., Li, J., Hobiny, A., ... & Wang, X. "Surface modification of graphene oxides by plasma techniques and their application for environmental pollution cleanup." *The Chemical Record*, vol. 16(1), p. 295-318, 2016.
- [61] Dorraki, N., Safa, N. N., Jahanfar, M., Ghomi, H., & Ranaei-Siadat, S. O. "Surface modification of chitosan/PEO nanofibers by air dielectric barrier discharge plasma for acetylcholinesterase immobilization." *Applied Surface Science*, vol. 349, p. 940-947, 2015.
- [62] Schade, R. "Über die aufbauzeit einer Glimmentladung." *Zeitschrift für Physik*, vol. 104(7-8), p. 487-510, 1937.
- [63] Aba'a Ndong, A. "Décharges à barrière diélectrique pulsées de volume et de surface appliquées à la précipitation électrostatique et à la régénération de surface." Thèse de Doctorat, Université de Poitiers, 2014.
- [64] Massines, F., & Gouda, G. "A comparison of polypropylene-surface treatment by filamentary, homogeneous and glow discharges in helium at atmospheric pressure." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 31(24), p. 3411, 1998.
- [65] Gherardi, N. "Physico-chimie et contrôlées par barrière régimes des décharges diélectrique en mélanges azote - gaz oxydant - silane. Application à l'activation de surfaces polymères et aux dépôts." Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, 1998.
- [66] Kogelschatz, U., Eliasson, B., & Egli, W. "Dielectric-barrier discharges. Principle and applications." *Le Journal de Physique IV*, vol. 7(C4), p. C4-47, 1997.
- [67] Bartnikas, R. "Note on ac Discharges between Metallic-Dielectric Electrodes in Helium." *Journal of Applied Physics*, vol. 40(4), p. 1974-1976, 1969.
- [68] Naudé, N., Cambronne, J. P., Gherardi, N., & Massines, F. "Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure Townsend discharge to a filamentary discharge." *Journal of physics D: applied physics*, vol. 38(4), p. 530, 2005.

- [69] Roth, J. R., Laroussi, M., & Liu, C. "Experimental generation of a steady-state glow discharge at atmospheric pressure." In *Plasma Science, 1992. IEEE Conference Record-Abstracts, 1992 IEEE International Conference*, pp. 170-171, 1993.
- [70] Liu, C., & Roth, J. R. "Plasma-related characteristics of a steady-state glow discharge at atmospheric pressure." In *Plasma Science, 1993. IEEE Conference Record-Abstracts., 1993 IEEE International Conference*, p. 129, 1993.
- [71] Sellin, N., & Campos, J. S. D. C. "Surface composition analysis of PP films treated by corona discharge." *Materials Research*, vol. 6(2), p. 163-166, 2003.
- [72] Boileau, S. P. "Préparation de surface du PET avant métallisation: étude et comparaison des procédés laser excimère et plasma hors-équilibre." Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI, 2003.
- [73] Winters, H. F., & Coburn, J. W. "Surface science aspects of etching reactions." *Surface Science Reports*, vol. 14(4-6), p. 162-269, 1992.
- [74] Wu, B. "Photomask plasma etching: A review." *Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena*, vol. 24(1), p. 1-15, 2006.
- [75] Lieberman, M. A., & Lichtenberg, A. J. "Principles of plasma discharges and materials processing." *MRS Bulletin*, vol. 30, p. 899-901, 1994.
- [76] Favia, P., Stendardo, M. V., & d'Agostino, R. "Selective grafting of amine groups on polyethylene by means of NH₃-H₂ RF glow discharges." *Plasmas and polymers*, vol. 1(2), p. 91-112, 1996.
- [77] Sardella, E., Gristina, R., Milella, A., d'Agostino, R., & Favia, P. "Functionalization of biomedical polymers by means of plasma processes: plasma treated polymers with limited hydrophobic recovery and PE-CVD of-COOH functional coatings." *Journal of Photopolymer Science and Technology*, vol. 15(2), p. 341-350, 2002.
- [78] Chan, C. M., Ko, T. M., & Hiraoka, H. "Polymer surface modification by plasmas and photons." *Surface science reports*, vol. 24(1-2), p. 1-54, 1996.
- [79] Haïdopoulos, M. (2005). "Étude expérimentale d'optimisation de procédés de modifications de surface de l'acier inoxydable 316 pour application aux dispositifs endovasculaires." Thèse de doctorat, Université, Université Laval, 2003.
- [80] d'Agostino, R., Capezzuto, P., Bruno, G., & Cramarossa, F. "Mechanism of etching, polymerization and deposition in RF (radio frequency) discharges." *Pure and Applied Chemistry*, vol. 57(9), p. 1287-1298, 1985.
- [81] Venugopalan, M. "Basic processes in glow discharge plasmas." *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 23(4), p. 405-417, 1987.
- [82] Sarra-Bournet, C. "Design et réalisation d'un réacteur plasma à pression atmosphérique pour des traitements de surfaces dans le domaine des biomatériaux." Thèse de Doctorat, Université Laval, 2007.

- [83] Coburn, J. W. "Surface processing with partially ionized plasmas." *IEEE transactions on plasma science*, vol. 19(6), p. 1048-1062, 1991.
- [84] Butoi, C. I., Mackie, N. M., McCurdy, P. R., Peers, J. R., & Fisher, E. R. "Surface interactions of radicals during plasma processing of polymers." *Plasmas and Polymers*, vol. 4(1), p. 77-91, 1999.
- [85] Sheu, M. S., Hudson, D. M., & Loh, I. H. "Biomaterial surface modification using plasma gas discharge processes." *Encyclopedic handbook of biomaterials and bioengineering, Part A: Materials*, p. 865-894, 1995.
- [86] Vasilets, V. N., Hirata, I., Iwata, H., & Ikada, Y. "Photolysis of a fluorinated polymer film by vacuum ultraviolet radiation." *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, vol. 36(13), p. 2215-2222, 1998.
- [87] Carrega, Marc. "Aide-mémoire - Matières plastiques." Paris : Dunod, 2011.
- [88] Gonçalves, E. S., Poulsen, L., & Ogilby, P. R. "Mechanism of the temperature-dependent degradation of polyamide 66 films exposed to water." *Polymer Degradation and Stability*, vol. 92(11), p. 1977-1985, 2007.
- [89] www.metaux-detail.com
- [90] www.emac.es
- [91] www.eurometalso.com
- [92] Higashiyama, Y., Ujiie, Y., & Asano, K. "Triboelectrification of plastic particles on a vibrating feeder laminated with a plastic film." *Journal of Electrostatics*, vol. 42(1-2), p. 63-68, 1997.
- [93] Tilmatine, A., Medles, K., Younes, M., Bendaoud, A., & Dascalescu, L. "Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46(4), p. 1564-1569, 2010.
- [94] Calin, L., Caliap, L., Neamtu, V., Morar, R., Iuga, A., Samuila, A., & Dascalescu, L. "Tribocharging of granular plastic mixtures in view of electrostatic separation." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44(4), p. 1045-1051, 2008.
- [95] Calin, L., Mihalcioiu, A., Das, S., Neamtu, V., Dragan, C., Dascalescu, L., & Iuga, A. "Controlling particle trajectory in free-fall electrostatic separators." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44(4), p. 1038-1044, 2008.
- [96] Shao, T., Zhang, C., Long, K., Zhang, D., Wang, J., Yan, P., & Zhou, Y. "Surface modification of polyimide films using unipolar nanosecond-pulse DBD in atmospheric air." *Applied Surface Science*, vol. 256(12), p. 3888-3894, 2010.
- [97] Mercado-Cabrera, A., Jaramillo-Sierra, B., López-Callejas, R., Valencia-Alvarado, R., de la Piedad-Beneitez, A., Peña-Eguiluz, R., ... & Rodríguez-Méndez, B. "Surface modification of polypropylene fiber for hydrophilicity enhancement aided by DBD plasma." *Progress in Organic Coatings*, vol. 76(12), p. 1858-1862, 2013.

- [98] Niu, Z., Zhang, C., Shao, T., Fang, Z., Yu, Y., & Yan, P. "Repetitive nanosecond-pulse dielectric barrier discharge and its application on surface modification of polymers." *Surface and Coatings Technology*, vol. 228, p. S578-S582, 2013.
- [99] Bekkara, M. F. "Contributions à l'étude du plasma froid. Applications au dépôt des couches minces et à la charge électrostatique des médias filtrants." Thèse de Doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-bel-abbes, 2017.
- [100] Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., & Leprince, P. "Atmospheric pressure plasmas: A review." *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 61(1), p. 2-30, 2006.
- [101] **Nadjem, A.**, Kachi, M., Bekkara, M., Medles, K., Zeghloul, T., Dascalescu, L. "Triboelectrification of granular insulating materials as affected by dielectric barrier discharge (DBD) treatment." *J. Electrostat.* vol. 86, p. 18–23, 2017. doi:10.1016/j.elstat.2016.12.017.
- [102] Richard, G., **Nadjem, A.**, Medles, K., Kachi, M., Zeghloul, T., Dascalescu, L. "Tribocharging of PP granules after exposure to a dielectric barrier discharge (DBD). Effect of exposure duration, voltage amplitude and frequency." *Proc. Electrostat. Soc. Am. Annu. Meet. ESA*, p. 8–11, 2017.
- [103] Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., & van der Mullen, J. "Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochim.*" *Acta - Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 57, p. 609–658, 2002. doi:10.1016/S0584-8547(01)00406-2.
- [104] Bekkara, M. F., Dascalescu, L., Benmimoun, Y., Zeghloul, T., Tilmatine, A., & Zouzou, N. "Modification of surface characteristic and tribo-electric properties of polymers by DBD plasma in atmospheric air." *The European Physical Journal Applied Physics*, vol. 81(1), p. 10801, 2018.
- [105] Neagoe, M. B., Prawatya, Y. E., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. "Influence of surface roughness on the tribo-electric process for a sliding contact between polymeric plate materials." *IOP In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 174(1), p. 012003, IOP Publishing, 2017. doi:10.1088/1757-899X/174/1/012003.
- [106] Ren, C. S., Wang, K., Nie, Q. Y., Wang, D. Z., & Guo, S. H. "Surface modification of PE film by DBD plasma in air." *Applied surface science*, vol. 255(5), p. 3421-3425, 2008.
- [107] Kostov, K. G., Nishime, T. M. C., Hein, L. R. O., & Toth, A. "Study of polypropylene surface modification by air dielectric barrier discharge operated at two different frequencies." *Surface and Coatings Technology*, vol. 234, p. 60-66, 2013.
- [108] Kostov, K. D., Dos Santos, A. L. R., Honda, R. Y., Nascente, P. A. P., Kayama, M. E., Algatti, M. A., & Mota, R. P. "Treatment of PET and PU polymers by atmospheric pressure plasma generated in dielectric barrier discharge in air." *Surface and Coatings Technology*, vol. 204(18-19), p. 3064-3068, 2010.
- [109] Richard, G., Benabderrahmane, A., Medles, K., Tilmatine, A., Zeghloul, T., & Dascalescu, L. "Factors that affect tribocharging of PE granules after exposure to a

- dielectric barrier discharge (DBD)." In Industry Applications Society Annual Meeting, 2017 IEEE (pp. 1-4). IEEE, 2017.
- [110] Wang, D., Wang, Y., & Liu, C. "Multipeak behavior and mode transition of a homogeneous barrier discharge in atmospheric pressure helium." *Thin Solid Films*, vol. 506, p. 384-388, 2006.
- [111] Gadkari, S., & Gu, S. "Numerical investigation of co-axial DBD: Influence of relative permittivity of the dielectric barrier, applied voltage amplitude, and frequency." *Physics of Plasmas*, vol. 24(5), p. 053517, 2017. doi:10.1063/1.4982657.
- [112] Wang, D., Wang, Y., & Liu, C. "Multipeak behavior and mode transition of a homogeneous barrier discharge in atmospheric pressure helium." *Thin Solid Films*, vol. 506–507, p. 384–388, 2006.
- [113] Tao, S., Guangsheng, S., Ping, Y., Jue, W., Weiqun, Y., Yaohong, S., & Shichang, Z. "An experimental investigation of repetitive nanosecond-pulse breakdown in air." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39(10), p. 2192, 2006.
- [114] Tao, S., Kaihua, L., Cheng, Z., Ping, Y., Shichang, Z., & Ruzheng, P. "Experimental study on repetitive unipolar nanosecond-pulse dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 41(21), p. 215203, 2008. doi:10.1088/0022-3727/41/21/215203.
- [115] Bruggeman, P., & Brandenburg, R. "Atmospheric pressure discharge filaments and microplasmas: physics, chemistry and diagnostics." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46(46), p. 464001, 2013.
- [116] Subedi, D. P. "An investigation of the effect of electrode geometry and frequency of power supply in the homogeneity of dielectric barrier discharge in air." *Kathmandu University Journal of Science, Engineering and Technology*, vol. 6(1), p. 96-101, 2010.
- [117] **Nadjem, A.**, Kachi, M., Dascalescu, L., Medles, K., Zeghloul, T. "Influence of the geometrical parameters of a dielectric barrier discharge reactor on the subsequent tribocharging of granular polymers." *J. Electrostat.* vol. 95, p. 24–31, 2018. doi:10.1016/j.elstat.2018.08.003.
- [118] Shao, T., Long, K., Zhang, C., Wang, J., Zhang, D., Yan, P., & Zhang, S. "Electrical characterization of dielectric barrier discharge driven by repetitive nanosecond pulses in atmospheric air." *Journal of Electrostatics*, vol. 67(2-3), p. 215-221, 2009. doi:10.1016/j.elstat.2008.12.001.
- [119] Wang, X., Tan, Z., Nie, L., & Pan, J. "Study on modes of the pulsed dielectric barrier discharges at atmospheric pressure in helium." *IEEE Trans. Plasma Sci*, vol. 42, p. 2245–2252, 2014. doi:10.1109/TPS.2014.2346231.
- [120] Golubovskii, Y. B., Maiorov, V. A., Li, P., & Lindmayer, M. "Effect of the barrier material in a Townsend barrier discharge in nitrogen at atmospheric pressure." *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 39(8), p. 1574, 2006. doi:10.1088/0022-3727/39/8/016.
- [121] Le Manuel internet des radioamateurs, «Permittivité - Constante diélectrique»: <http://f5zv.pagesperso-orange.fr/RADIO/RM/RM23/RM23B/RM23B07a.html>.

- [122] Ozkan, A., Dufour, T., Bogaerts, A., & Reniers, F. "How do the barrier thickness and dielectric material influence the filamentary mode and CO₂ conversion in a flowing DBD?" *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 25(4), p. 045016, 2016. doi:10.1088/0963-0252/25/4/045016.
- [123] Remadnia, M., Kachi, M., Messal, S., Oprean, A., Rouau, X., & Dascalescu, L. "Electrostatic separation of peeling and gluten from finely ground wheat grains." *Particulate Science and Technology*, vol. 32(6), p. 608-615, 2014.
- [124] Massines, F., Gherardi, N., Naudé, N., & Ségur, P. "Recent advances in the understanding of homogeneous dielectric barrier discharges." *The European Physical Journal-Applied Physics*, 47(2), 2009.
- [125] Xi, M., Li, Y. L., Shang, S. Y., Li, D. H., Yin, Y. X., & Dai, X. Y. "Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing." *Surface and Coatings Technology*, vol. 202(24), p. 6029-6033, 2008.
- [126] Hiratsuka, K. I., & Hosotani, K. "Effects of friction type and humidity on triboelectrification and triboluminescence among eight kinds of polymers." *Tribology International*, vol. 55, p. 87-99, 2012.
- [127] Aksa, W., Medles, K., Rezoug, M., Boukhoulda, M. F., Bilici, M., & Dascalescu, L. "Two stage electrostatic separator for the recycling of plastics from waste electrical and electronic equipment." *Journal of Electrostatics*, vol. 71(4), p. 681-688, 2013.
- [128] Zelmat, M. E. M., Tilmatine, A., Touhami, S., Bendaoud, A., Medles, K., Ouiddir, R., & Dascalescu, L. "Experimental Investigation of a New Tribo-Aeroelectrostatic Separation Process for Micronized Plastics From WEEE." *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 53(5), p. 4950-4956, 2017.
- [129] Miloudi, M., Dascalescu, L., Li, J., El-Mossouess, S., & Medles, K. "Tribo-aero-electrostatic separator for coarse granular insulating materials." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20(5), p. 1510-1515, 2013.
- [130] Buda, G., Samuila, A., Atroune, S., Bilici, M., & Dascalescu, L. "Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids." *Journal of Electrostatics*, vol. 71(3), p. 407-412, 2013.
- [131] Bendimerad, S., Tilmatine, A., Ziane, M., & Dascalescu, L. "Plastic wastes recovery using free-fall triboelectric separator." *International Journal of Environmental Studies*, vol. 66(5), p. 529-538, 2009.
- [132] **Nadjem, A.**, Kachi, M., Rouagdia, K., Remadnia, M. "Experimental Study of an Inclined-Plane Electrostatic Separator." *Proceedings of the Third International Symposium on Materials and Sustainable Development*, Springer International Publishing, p. 439-450, 2018. doi:10.1007/978-3-319-89707-3.
- [133] Jalaal, M., & Ganji, D. D. "An analytical study on motion of a sphere rolling down an inclined plane submerged in a Newtonian fluid." *Powder Technology*, vol. 198(1), p. 82-92, 2010.