

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès



Faculté de Génie Électrique
Département d'Électrotechnique



THESE

Présentée par :

DAIOUI Khaled

Pour l'obtention du diplôme de :

Doctorat 3^{ème} cycle en Électrotechnique

Option : Haute Tension

Intitulé de la thèse :

*Utilisation des tensions alternatives pour la
neutralisation des matériaux
granulaires chargés*

Présentée devant le jury composé de :

Pr. TILMATINE Amar	Professeur	UDL de Sidi Bel Abbès	Président
Pr. BENDAOU Abdelber	Professeur	U.D.L. Sidi Bel-Abbès	Directeur de thèse
Pr. DASCALESCU Lucien	Professeur	Univ. Poitiers, France	Co-directeur de thèse
Dr. HAMMADI Nacera	MCA	USTO-Oran	Examinatrice
Dr. MILOUDI Mohammed	MCA	UDL de Sidi Bel Abbès	Examineur
Dr. MILOUA Farid	MCA	UDL de Sidi Bel Abbès	Examineur

Soutenue en : Juin 2018

REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, je suis très ému à l'idée que je peux oublier de remercier certains, c'est pourquoi je témoigne tout d'abord ma reconnaissance à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réussite de ce travail.

J'exprime ma profonde reconnaissance à mon directeur de thèse, le professeur Abdelber BENDAOU, pour avoir cru en mes capacités pour mener à bien ce travail qu'il a toujours dirigé avec une très grande rigueur. Sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements durant toutes ces années m'ont été d'une grande utilité, sur le plan humain ainsi que scientifique. Qu'il trouve ici le témoignage de ma vive reconnaissance.

Ma profonde gratitude, de façon très particulière, s'adresse aussi à mon co-directeur de thèse, Professeur Lucian DASCALESCU, pour son aide précieuse et les remarques utiles qu'il m'a procurées durant toutes ces années. Je le remercie profondément pour tout ce qu'il a apporté à cette thèse, et à l'article publié, aussi bien pour son encadrement scientifique que pour sa disponibilité et ses grandes qualités humaines en particulier sa gentillesse.

Je remercie le Professeur Amar TILMATINE d'avoir accepté d'être le président du jury, je le remercie en particulier de m'avoir facilité l'accès au laboratoire APELEC et aussi pour ses conseils, son admirable esprit scientifique, sa disponibilité, sa gentillesse, ses orientations et son soutien.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers les membres qui m'ont fait l'honneur d'accepter avec intérêt de prendre part au jury de ma soutenance de thèse : Docteur Nacera HAMMADI Maîtres de conférences A à l'université Mohammed Boudiaf d'Oran ; Docteur Mohamed MILOUDI et Docteur Farid MILOUA Maîtres de conférences A à l'université de Sidi Bel-Abbès. Je les prie de bien vouloir accepter mes plus vifs et sincères remerciements.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers Professeur Karim MEDLES, pour leurs qualités de recherche ainsi que pour le soutien accordé, qu'ils trouvent ici l'expression de mes vifs remerciements.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous mes collègues, membres des laboratoires APELEC et IRECOM de l'Université de Sidi-Bel-Abbès, ainsi que de l'Institut PPRIME de l'IUT d'Angoulême.

Je termine mes remerciements en ayant une pensée particulière à ma mère, mon père pour leur soutien qu'ils m'ont donné, ainsi que pour la patience et l'aide accordées durant ces années d'étude, qu'ils trouvent ici ma profonde gratitude. Enfin, je salue le soutien et l'encouragement de mon frère, mes sœurs, mes oncles et tous les membres de ma famille.

Mille merci à toutes et à tous.

Résumé

Titre : " Utilisation des tensions alternatives pour la neutralisation des matériaux granulaires chargés "

Résumé : L'objectif principal de cette thèse est l'étude de l'efficacité de la neutralisation électrostatique des matériaux granulaires isolants chargés issus de procédé du recyclage des DEEE. Les recherches se sont focalisées sur un système de neutralisation composé d'un neutralisateur de charge commercial alimenté à partir d'un générateur de tension. L'étude s'est déroulée sur deux installations : (1) Le premier travail est effectuée sur une installation expérimentale conçue et réalisée pour caractériser l'état de charge des matériaux isolants avant et juste après neutralisation. Cette installation permet de tester l'efficacité de la neutralisation dans plusieurs situations et paramètres opératoires. (2) le deuxième travail est effectué sur un séparateur électrostatique déjà réalisé au niveau du laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès. Le système de neutralisation placé à la sortie de ce séparateur permet de tester l'efficacité de neutralisation d'une façon continue. Le système de mesures simultanées de la masse et de la charge électrique des produits récupérés a facilité l'analyse des effets sur le processus de neutralisation. Les recherches menées dans cette thèse ont permis d'ajuster les paramètres de neutralisation pour une neutralisation efficace quel que soit le type des matériaux isolants traités ou le niveau de la charge acquise. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences a permis d'identifier les facteurs influents et de trouver le point de fonctionnement optimal.

Mots clés : Décharge couronne, Procédés électrostatiques, Charge électrique, Neutralisation, Matériaux isolants, Plan d'expériences.

Title : " Use of alternative voltages for the neutralization of charged granular materials "

Abstract : The main objective of this thesis is the study of the electrostatic neutralization efficiency of charged insulating granular materials resulting from the WEEE recycling process. The research focused on a neutralization system consisting of a commercial neutralizer of charge from a voltage generator. The study was carried out on two installations : (1) The first work is carried out on an experimental installation conceived and realized to characterize the state of charge of the insulating materials before and just after neutralization. This installation makes it possible to test the effectiveness of the neutralization in several situations and operating parameters. (2) The second work is carried out on an electrostatic separator made at the APELEC laboratory of the University of Sidi Bel-Abbès. The neutralization system placed at the outlet of this separator makes it possible to test the neutralization efficiency in a continuous manner. The system of simultaneous measurements of the mass and electrical charge of the recovered products facilitated the analysis of the effects on the neutralization process. The research carried out in this thesis has made it possible to adjust the neutralization parameters for effective neutralization whatever the type of insulating materials treated or the level of the charge acquired. The use of the experimental design methodology helped to identify the influencing factors and to find the optimal operating point.

Keywords: Corona discharge, Electrostatic processes, Electrical charge, Neutralization, Insulating materials, Plan of experiences.

عنوان : " استخدام التيار المتردد لتحييد المواد الحبيبية المشحونة "

ملخص : الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو دراسة كفاءة إبطال الكهرياء الساكنة للمواد العازلة المشحونة الناتجة عن عملية إعادة تدوير مخلفات المعدات الكهربائية والإلكترونية. ركزت الدراسة على نظام تحييد يتكون من محايد الشحنة الكهربائية التجاري تعمل بالطاقة من مولد الجهد. أجريت الدراسة على تركيبين: (1) أجري العمل الأول على تركيب تجريبي مصمم ومُحقق لتوصيف حالة شحن المواد العازلة قبل وبعد التحييد مباشرة. هذا التثبيت يجعل من الممكن اختبار فعالية المحاييد في العديد من الحالات ومعاملات التشغيل. (2) و أجري العمل الثاني على فاصل كهرياء تم تصنيعه في مختبر APELEC جامعة سيدي بلعباس. إن نظام التحييد الموصل عند مخرج هذا الفاصل يجعل من الممكن اختبار كفاءة المحاييد بطريقة مستمرة. نظام القياسات الانني للكتلة والشحنة الكهربائية الخاصة بالمواد التي تم جمعها يسهل تحليل عملية إبطال الكهرياء الساكنة. جعلت هذه الأبحاث من الممكن تعديل معايير للتحييد الفعال للكهرياء الساكنة أيضاً كانت أنواع المواد العازلة المعالجة أو مستوى الشحنة المكتسبة. استخدام منهجية خطة التجارب تساعد على تحديد تأثير كل عامل وإيجاد حالة التشغيل المثلى.

الكلمات المفتاحية : كورونا التفريغ، تقنيات الكتر وستاتيك، الشحنة الكهربائية، إبطال الكهرياء الساكنة، المواد العازلة، خطة التجارب.

Sommaire

TABLE DES MATIERES

Introduction générale	1
Chapitre 1. État de l'art	
I.1. Charge électrique des matériaux granulaire.....	5
I.1.1. Charge par effet couronne.....	5
I.1.2. Charge par effet triboélectrique.....	7
I.1.3. Dispositifs de charge triboélectrique.....	10
I.2. Neutralisation de la charge électrique.....	15
I.2.1. Déclin de potentiel.....	17
I.2.2. Technique de neutralisation.....	18
I.3. Conclusion.....	22
Chapitre 2. Installations expérimentales et méthodes d'analyses	
II.1. Caractérisation des matériaux isolants.....	27
II.1.1. Matériaux issus des DEEEs.....	27
II.1.2. Câble électrique.....	29
II.2. Installations expérimentales.....	30
II.2.1. Phase de la charge des matériaux granulaire isolants.....	32
II.2.2. Phase de la neutralisation.....	33
II.2.3. Phase de mesure de la charge électrique.....	37
II.3. Séparateur électrostatique a cylindre tournant.....	39
II.3.1. Test de chargement par effet couronne.....	41
II.3.2. Test de neutralisation.....	42
II.4. Méthode des plans d'expériences.....	43
II.4.1. Notion d'espace expérimental.....	44
II.4.2. Plans factoriels.....	45
II.4.3. Plans factoriels complets.....	45
II.4.4. Plan composite.....	46
II.4.5. Logiciels des plans d'expériences.....	47
II.5. Conclusion.....	48
Chapitre 3. Étude de la neutralisation de matériaux granulaires isolants chargés	
III.1. Etude de la neutralisation.....	50
III.1.1. Etude de chargement des matériaux granulaires isolants.....	50
III.1.2. Protocole et configuration expérimentale.....	51
III.1.3. Effet de la vitesse d'écoulement d'air « v ».....	53
III.1.4. Effet de la distance inter-électrodes « d ».....	55

III.1.5. Effet de l'amplitude de la tension « U »	59
III.1.6. Effet de l'angle d'inclinaison « α »	62
III.2. Modélisation expérimentale.....	64
III.2.1. Méthodologie expérimentale	65
III.2.2. Résultats et interprétations	66
III.3. Effet de types de la charge sur l'efficacité de la neutralisation.....	76
III.3.1. Protocole opératoire des expériences.....	76
III.3.2. Résultats et interprétation.....	78
III.4. Conclusion.....	80

Chapitre 4. Neutralisation des matériaux granulaires isolants chargés par diverses formes de tension

IV.1. Etude de la neutralisation.....	82
IV.1.1. Protocole expérimental.....	83
IV.1.2. Modélisation expérimentale.....	85
IV.1.3. Etude préliminaire.....	87
IV.2. Modélisation expérimentale	94
IV.2.1. Evaluation des effets des facteurs	96
IV.2.2. Optimisation du processus de la neutralisation.....	99
IV.3. Conclusion.....	104

Conclusion générale.....	106
---------------------------------	------------

Bibliographie

Annexes

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les plastiques sont omniprésents dans notre vie. Au-delà de leurs atouts, une fois consommés, ils génèrent des déchets volumineux par rapport à leur poids [1]. Ces déchets occupent un volume important dans les points de collecte et autres installations de gestion de déchets dont les centres d'enfouissements techniques. Leur dissémination dans la nature est durable et inesthétique car leur biodégradabilité est, dans la plupart des cas, faible. Il y a donc lieu d'encourager leur recyclage. Le recyclage et le réemploi permettent d'économiser une grande quantité d'énergie primaire, notamment du pétrole, la principale matière première de la plupart des matières plastiques [2].

En termes d'applications industrielles, la séparation électrostatique [3] est une technologie qui s'adopte pleinement à ce nouveau modèle énergétique. Caractérisée par une faible consommation d'énergie, ainsi que par des coûts réduits d'exploitation et d'entretien, elle représente une technologie économiquement viable pour le tri sélectif des différents types de plastiques contenu dans les Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE) [4]. Plusieurs types de séparateurs électrostatiques ont été spécialement conçus pour cette classe importante d'applications industrielles, tout en respectant une réglementation de plus en plus sévère respectueuse de l'environnement [5].

Cependant, l'accumulation de charge électrique sur la surface des matériaux granulaires isolants à la sortie des séparateurs électrostatiques, représente un danger potentiel pour la sécurité des opérateurs, et cause des pertes considérables à l'industrie [6-8]. Les décharges électrostatiques causées par les charges électriques peuvent être à l'origine des incendies lorsqu'elles se produisent dans des installations contenant des substances inflammables [9]. Dans toutes ces situations, la charge électrique statique doit être neutralisée. Les techniques les plus largement utilisées pour l'accomplir, font usage à des ions bipolaires générés dans la décharge couronne AC [10].

L'objectif de cette thèse est d'étudier les effets des différents facteurs influents sur le processus de la neutralisation des matériaux granulaires isolants chargés en utilisant un neutralisateur de charge commercial. Ce type de neutralisateur est largement utilisé

dans l'industrie de recyclages des DEEE pour neutraliser les particules isolantes chargées issues des processus de la séparation électrostatique.

La neutralisation par décharge couronne AC est réalisée dans un premier temps, sur plusieurs matériaux isolants granulaires (acrylonitrile butadiène styrène - ABS, polystyrène à haute résistance - HIPS, chlorure de polyvinyle - PVC, polycarbonate - PC et polyamide PA) posés sur la surface d'un tapis roulant dans l'air atmosphérique. Le tribo-chargeur à hélices conçu au laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès est utilisé pour la charge des matériaux granulaires isolants. Par la suite, des tests de neutralisation ont été réalisés sur un séparateur électrostatique à cylindre tournant.

Dans un deuxième temps, une étude des effets de plusieurs paramètres sur la charge électrique a été réalisée : l'amplitude de la haute tension appliquée, la position du neutralisateur par rapport à la surface des échantillons, l'angle d'inclinaison du neutralisateur par rapport à le vertical, la vitesse du flux d'air et également le type des matériaux utilisés. L'efficacité de la neutralisation a été évaluée en calculant le rapport entre la charge massique avant et juste après la neutralisation. Et les résultats obtenus expérimentalement sont analysé et discuté.

Les recherches développées ont été réalisées au niveau du laboratoire APELEC de l'université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbès pour déterminer l'efficacité du neutralisateur de charge commercial dans différentes conditions. Puis un stage de courte durée au laboratoire d'Electrostatique appliquée de l'Institut PPRIME, UPR 3346 CNRS – Université de Poitiers – ENSMA, sur le site de l'Institut Universitaire de Technologie d'Angoulême où on a participé à des expériences de séparation électrostatique avec des membres de la société APR2 de Bonnières sur Seine, et CITF, de Saint Cybardeaux, en Charente, spécialisé dans le traitement des DEEEs.

La thèse s'articule autour de quatre chapitres

❖ Le premier est une synthèse bibliographique de l'état de l'art de la théorie de la décharge électrostatique. Nous exposerons une vue générale sur le mécanisme de la génération de la charge statique, en décrivant le principe de fonctionnement ainsi que les dispositifs utilisés pour la mesure de la charge électrique. Qui sera suivi par une description générale des différents processus caractérisant le déclin de potentiel de surface des matériaux diélectriques.

Ensuite, les différentes techniques utilisées dans le domaine de l'électrostatique pour la neutralisation des particules isolantes chargées seront données. Ainsi que la méthodologie des plans d'expériences couramment utilisée pour aider l'expérimentateur à structurer les expériences.

❖ Les différents matériaux qui font l'objet de l'étude, ainsi que les techniques expérimentales utilisées, sont décrits dans le chapitre II. Il s'agit des matériaux provenant du recyclage des déchets d'équipements électriques et informatiques.

Les bancs expérimentaux utilisés pour la réalisation des expériences seront présentés. Ainsi que les dispositifs utilisés pour la charge des matériaux granulaires

isolants par effet triboélectrique et par effet couronne. Les équipements nécessaires pour les expériences effectuées, à savoir ; la mesure de la charge électrique et la masse au moyen d'un électromètre et une balance électronique seront présentés.

Une description de la méthode des plans d'expériences utilisées pour la modélisation de processus de neutralisation électrostatique étudiée complète ce chapitre.

❖ L'objectif des expériences présentées dans le cadre du chapitre III, est l'évaluation de la faisabilité de la neutralisation électrostatique des matériaux granulaires isolants chargés à l'aide d'un neutralisateur de charge commercial.

L'effet triboélectrique a été utilisé comme mécanisme de charge électrique de différents matériaux granulaires. L'interprétation des résultats expérimentaux de la mesure de la charge massique des matériaux granulaires dans différentes conditions de neutralisation sera présentée.

Les résultats des études menées en utilisant la méthodologie des plans d'expériences permettent de déterminer le point de fonctionnement optimal afin d'améliorer l'efficacité globale de la neutralisation électrostatique.

❖ Le dernier chapitre est consacré à l'étude de l'efficacité de la neutralisation des matériaux granulaires issus de processus de séparation électrostatique. L'étude est effectuée dans le séparateur électrostatique à tambour rotatif, il a été possible d'évaluer les effets de plusieurs facteurs qui pourraient influencer l'efficacité du processus de neutralisation des matériaux granulaires isolants chargés.

Les données expérimentales présentées dans le chapitre IV prouvent l'efficacité de ce dispositif à neutraliser les matériaux granulaires chargés d'une façon continue.

❖ Enfin, la conclusion générale met en valeur les apports des travaux de cette thèse et présente quelques perspectives.

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

CHAPITRE I

ETAT DE L'ART

Divers procédés électrostatiques, comme la séparation, la filtration ou la pulvérisation, impliquent la charge électrique de divers matériaux granulaires isolants [11, 12]. Dans le cas typique de la séparation électrostatique [13, 14], les mélanges de matériaux granulaires isolants sont chargés par effet triboélectrique ou par effet couronne puis soumis à l'action d'un champ électrique intense [15-17].

Un isolant peut conserver une charge pendant des heures voir même des jours. Les charges résiduelles des particules séparées qui s'accumulent dans les trémies de collecte d'un séparateur électrostatique représentent une nuisance électrostatique qui doit être prise en compte dans la phase de conception d'un nouveau processus [18, 19]. L'élimination des charges statiques sur les produits granulaires isolants obtenus par séparation électrostatique est un problème parfois délicat à résoudre. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour neutraliser la charge électrique résiduelle de ces produits, parmi lesquels la décharge couronne qui peut facilement et économiquement produire des ions bipolaires [20, 21].

Ce chapitre est consacré à une étude bibliographique de la théorie de la décharge électrostatique. En premier lieu, nous décrirons les phénomènes liés à la création des charges électriques sur les matériaux diélectriques avec les deux mécanismes triboélectrique et décharge couronne.

En expliquant également les processus responsables du déclin de potentiel de surface. Par la suite, nous citerons certaines techniques essentielles utilisées dans le domaine de l'électrostatique pour la neutralisation des particules isolantes chargées. La dernière partie sera consacrée à la description de la méthodologie des plans d'expériences utilisée pour la modélisation et l'optimisation du processus de la neutralisation des matériaux granulaires chargées utilisées dans le cadre de cette thèse.

I.1. CHARGE ELECTRIQUE DES MATERIAUX GRANULAIRE

Les particules peuvent recueillir des charges électriques grâce à plusieurs mécanismes physiques [22-25], Il s'agit de la charge par effet couronne ; les ions étant produits principalement à l'aide d'une décharge électrique, la densité d'ions peut être unipolaire (positive ou négative utilisée pour la charge des particules) ou bipolaire (utilisée pour la neutralisation des matériaux chargés), et la charge par effet tribo-électrique, impliquant le transfert de charge entre deux corps en contact. L'effet triboélectrique est utilisé pour la séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants, grâce à l'aptitude de ses matériaux à garder la charge obtenue par effet triboélectrique le plus longtemps possible.

I.1.1. Charge par effet couronne

a) Description

La charge des matériaux granulaires, des poudres ou des médias fibreux par décharge couronne est largement utilisée dans divers procédés électrostatiques [26-28]. Cet effet couronne est lié à l'ionisation de l'air dans une zone de champ électrique très intense produite entre deux électrodes métalliques.

On désigne sous le nom d'électrode active celle qui possède le plus petit rayon de courbure, qui se présente généralement sous la forme d'une pointe ou d'un fil, et l'autre passive qui n'est autre qu'une plaque ou une grille métallique reliée à la terre. Le matériau est posé sur le plan de masse qui sous l'action du champ électrique, il reçoit des charges de même polarité que l'électrode couronne. La figure I-1 illustre le système de charge d'un diélectrique par décharge couronne.

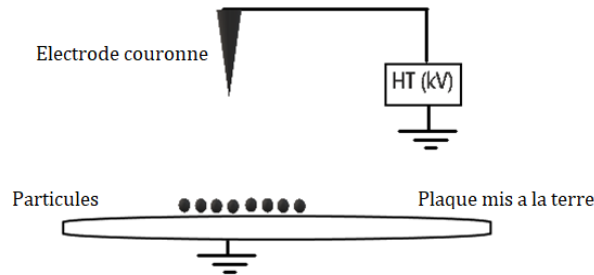


Figure I-1. Topologie du système d'électrodes couronne pour la charge des matériaux granulaires.

Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée entre les deux électrodes, la décharge couronne a fait naissance par la collision des électrons libres présents dans l'air en raison des rayons cosmiques, des rayonnements UV, etc... avec des molécules neutres du gaz, provoquant un déclenchement d'une avalanche d'ionisation dans la région de champ électrique intense (près de l'électrode couronne). Les électrons qui se trouvent dans une région de champ électrique faible plus loin de l'électrode couronne, ne possèdent pas suffisamment d'énergie pour ioniser les molécules, et vont s'attacher aux molécules neutres. En d'autres termes, l'espace entre les électrodes peut être divisé en deux régions : la zone d'ionisation, où les électrons déclenchent l'ionisation des

molécules neutres; ou de nouvelles paires électrons-ions positifs sont créés; et la zone dérive, dans laquelle les électrons ont une énergie plus faible et peuvent s'attacher aux molécules neutres pour former des ions négatifs lors d'une décharge négative, contrairement à la décharge positive ou un nuage d'ions positives prend naissance dans cette zone [29-32].

b) Dispositifs de charge par effet couronne

Plusieurs dispositifs ont été mis en place pour générer des décharges couronnes. Les configurations courantes utilisées pour générer des décharges couronnes sont des électrodes de type « dual » tel que : fil, segments de fil ou lame [33] (Fig. I-2).

Ainsi il y a certains cas où des systèmes d'électrode de type « triode » sont utilisés, pour mieux contrôler la valeur du potentiel de surface des échantillons exposés aux décharges couronne, tels que les processus de fabrication des médias de filtration d'air [34].

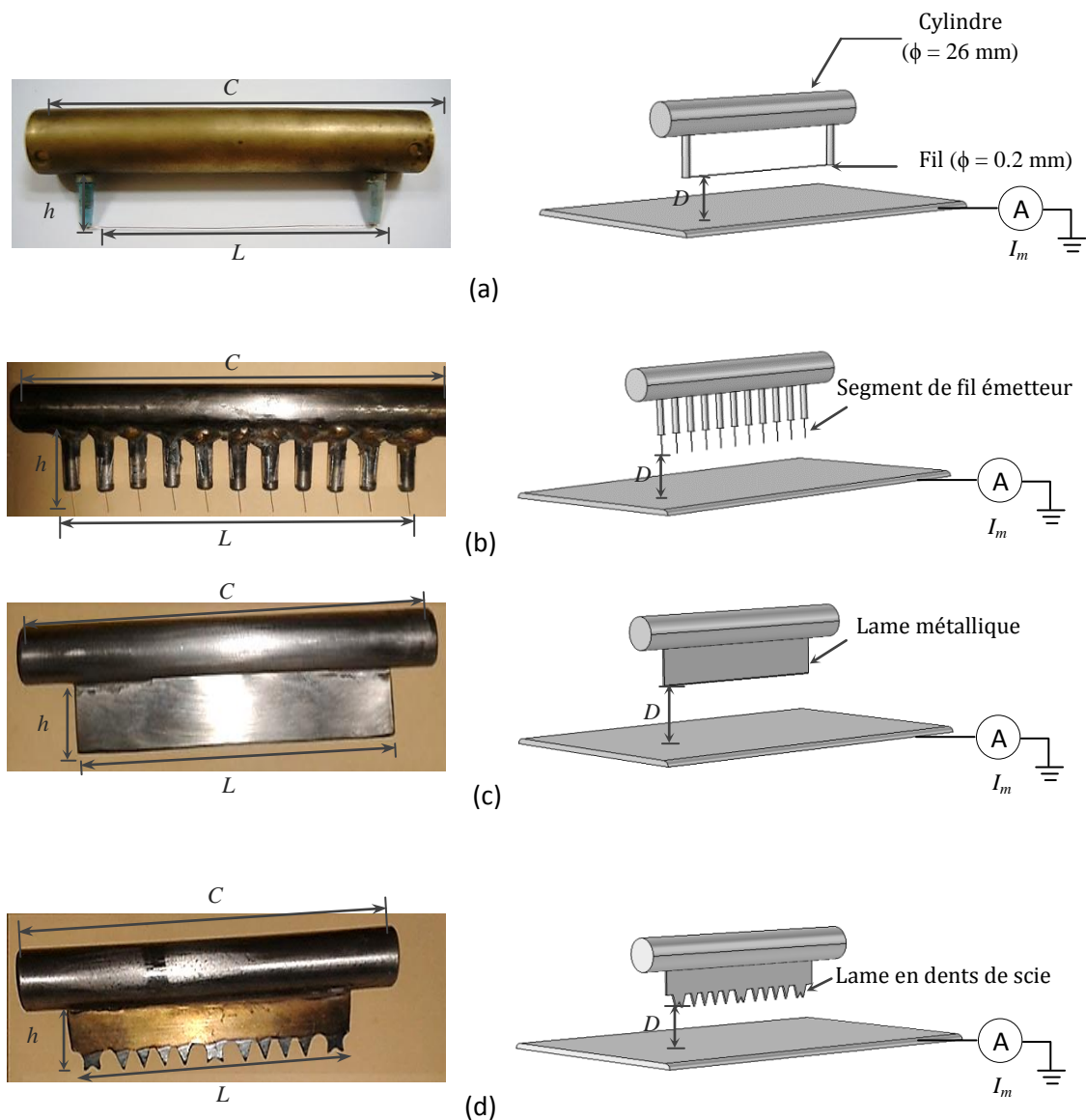


Figure I-2. Photographies (à gauche) et représentations schématiques (à droite) des électrodes couronne de type dual, (a) à fil, (b) à segments de fil, (c) à lame, (d) à lame en dents de scie ($C = 150$ mm) [33].

I.1.2. Charge par effet triboélectrique

a) Description

L'effet triboélectrique est en général associé à l'apparition de charges électriques après frottement entre deux matériaux ; sa définition s'étend souvent aux transferts de charges par contact. Lorsque deux matériaux différents et électriquement neutres entrent en contact, il y a un transfert de charges qui aboutit à l'obtention de deux matériaux chargés, l'un positivement et l'autre négativement [35-40].

À l'échelle atomique, le mouvement des électrons obéit aux lois de la mécanique quantique. Le concept de localisation ou de délocalisation a des conséquences sur la conductivité du matériau. Elles sont montrées dans la figure I-3. Les vibrations thermiques des atomes d'un cristal parfait entravent le déplacement des électrons et diminuent la conductivité ou augmentent la résistivité. Lorsque les électrons occupent des états localisés dans un matériau désordonné, les vibrations thermiques peuvent fournir une énergie suffisante à l'électron, pour quitter son site par l'effet tunnel. Ici la conduction augmente avec la température (T°), contrairement à celle des solides ordonnés, c'est ce que l'on appelle la conduction par saut. Comme le précise Touchard [41], ce processus de conduction par saut résulte d'un transfert d'électrons entre les états localisés, dans la bande interdite (E_g) au voisinage du niveau Fermi (E_f). En particulier, lorsque la densité d'état près du niveau Fermi est élevée, la mobilité des porteurs augmente de façon importante. Ce mécanisme s'observe parfaitement dans les solides isolants.

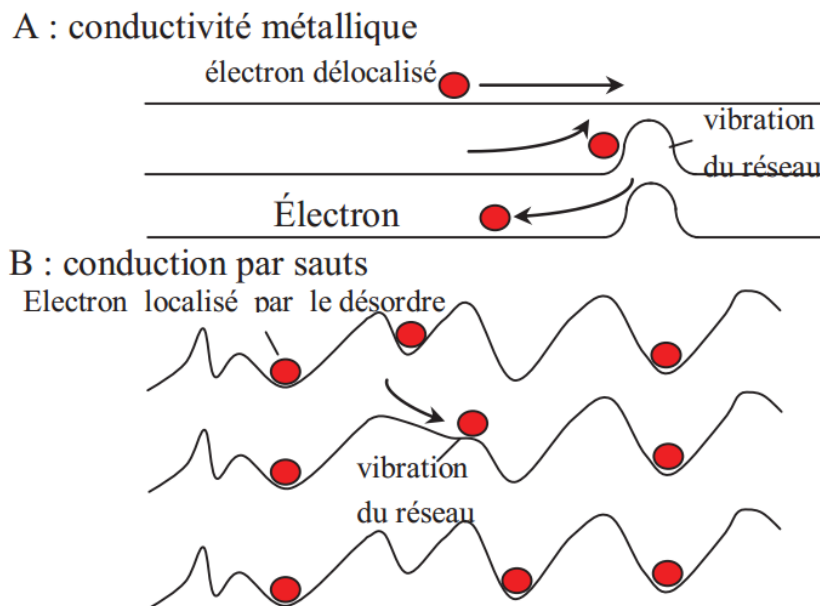


Figure 1-3. Effets de la localisation et de la délocalisation des électrons.

Les travaux de Liu et Bard [42] ont proposé un modèle de transfert d'électrons, validé par des expériences sur la charge de téflon. En revanche, White sides et Mc Carthy [43] ont utilisé une série d'électrets ioniques qui contiennent des ions mobiles, afin de

proposer que le transfert d'ions soit une explication possible pour la tribocharge des matériaux isolants.

La plupart des chercheurs ont supposé que la tribo-électrisation des isolants implique également le transfert d'électrons [44], mais les observations expérimentales semblent contredire ce point de vue. La tribo-électrisation des isolants n'est pas en corrélation avec les propriétés électroniques des matériaux, tels que la constante diélectrique, ou des propriétés atomiques, tels que l'énergie d'ionisation, affinité électronique, ou électronégativité. Des considérations théoriques s'opposent aussi à un mécanisme faisant intervenir le transfert d'électrons.

Plusieurs chercheurs ont remarqué que le processus de tribo-électrisation est en corrélation avec l'acidité ou la basicité des matériaux isolants. En 1902, Knoblauch a fait observer que les solides organiques acides tendent à se charger négativement, et les solides organiques basiques tendent à se charger positivement [45]. Il a proposé un mécanisme de transfert de proton pour l'effet triboélectrique.

Diaz a proposé qu'un mécanisme de transfert de proton puisse expliquer la tribo-électrisation d'un large éventail de matériaux isolants [46]. Ces observations, que les propriétés acides ou basiques des matériaux sont en corrélation avec leurs propriétés tribo-électriques, sont difficiles à concilier par un mécanisme qui implique le transfert d'électrons (Fig. I-4).

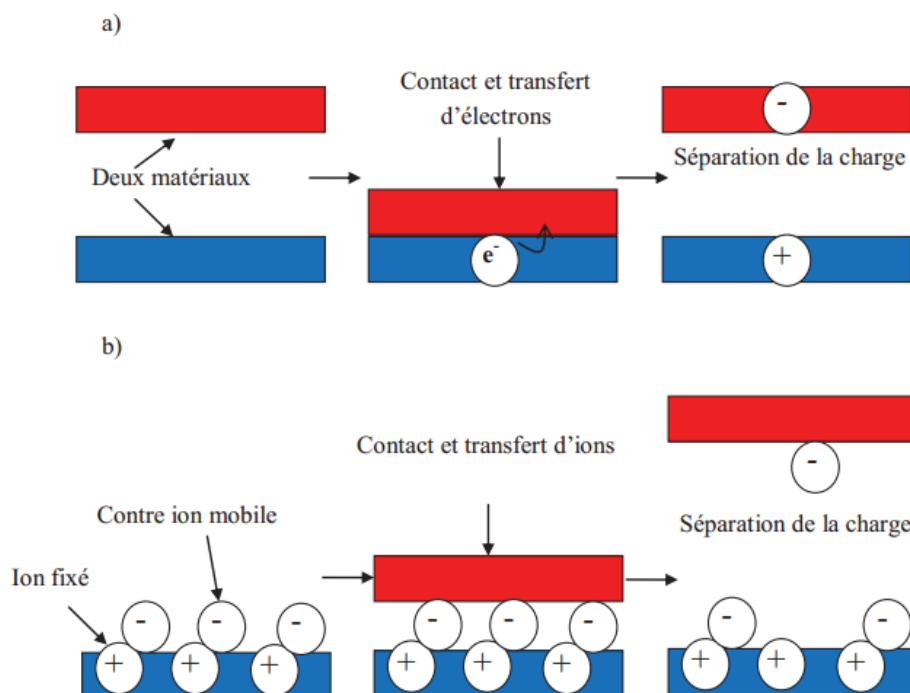


Figure I-4. Mécanismes possibles de transfert de charge : a) Transfert d'électrons ; b) Transfert d'ions.

La charge transférée augmente généralement avec la surface du contact, la pression entre les deux matériaux en contact ainsi qu'avec la vitesse du frottement ; elle diminue avec la rugosité des surfaces de contact [47].

b) Série triboélectrique

La "série triboélectrique" (Tableau I-1) est une liste de matériaux classés empiriquement en fonction de leur tendance à acquérir une charge positive ou négative au contact : le matériau le plus proche du sommet de la liste développera typiquement une charge positive, tandis que l'autre matériel développera une charge négative.

De nombreuses séries triboélectriques ont été publiées au cours des 150 dernières années, dont beaucoup par des scientifiques amateurs. En raison des complexités impliquées dans les expériences qui impliquent une charge contrôlée des matériaux, ces chercheurs obtiennent parfois des résultats différents pour déterminer le rang d'un matériau dans la série triboélectrique. Une des raisons à cela est la multitude de facteurs et de conditions qui affectent la tendance d'un matériau à charger.

La série triboélectrique montrée dans le tableau 1 est un travail effectuée par Bill Lee [48].

Tableau I-1. Série triboélectrique réalisée par Bill Lee en 2009 [48].

Isolants	Rapport de la charge [nC/J]
Polyuréthane solide	+40
Nylatron (nylon + MoS ₂)	+28
Verre	+25
Papier	+10
Bois (pin)	+7
Silicone	+6
Coton	+5
Caoutchouc nitrile	+3
Laine	0
Polycarbonate	-5
ABS	-5
Acrylique (Poly méthacrylate de méthyle)	-10
Époxy (circuit imprimé)	-32
Caoutchouc en styrène-butadiène (SBR, Buna S)	-35
PET (mylar) solide	-40
Polystyrène	-70
Polyamide	-70
Silicone	-72
Oléfines (alcènes) : LDPE, HDPE, PP	-90
PVC (vinyle rigide)	-100
Latex (naturel) en caoutchouc	-105
Caoutchouc en EPDM, remplie	-140
Téflon	-190

I.1.3. Dispositifs de charge triboélectrique

Plusieurs dispositifs de chargement qui utilise l'effet tribo-électrique comme mécanisme de chargement sont couramment utilisés pour la charge des particules isolantes destinés à la séparation des mélanges granulaires [49-51]. Dans cette partie nous allons présenter quelques dispositifs construits au sein des laboratoires APELEC et IRECOM de l'Université Djilali Liabès à Sidi Bel-Abbès et l'Institut PPrime, Université de Poitiers, France dont :

❖ *Chargement par ventilateur*

La Figure I-5 représente le dispositif de chargement par ventilateur équipé d'une hélice tournante dans un tube cylindrique en poly-méthacrylate de méthyle (PMMA).

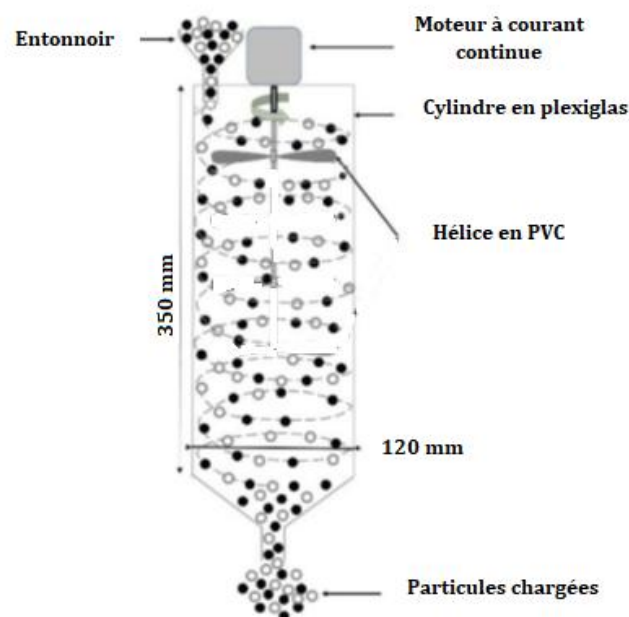


Figure I-5. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par ventilateur [52].

Le mélange de particules déposé dans le tube acquiert une charge triboélectrique lors de la mise en marche de l'hélice qui crée un courant d'air descendant donnant naissance à des turbulences aérodynamique multipliant les collisions des particules granulaires à l'intérieur du cylindre. Deux types de collisions se produisent l'une des particules contre les parois du cylindre, la seconde les particules entre elles [52]. Ce dispositif peut être adapté à un fonctionnement continu en introduisant les granules par sa partie supérieure, et en les récupérant chargés par sa partie inférieure.

❖ *Chargement par cyclone*

Le dispositif est un cylindre isolant (Fig. I-6), y compris un ventilateur dont le rôle est de souffler les particules à charger à l'intérieur du cylindre, où elles subissent un frottement continu contre la paroi interne [53, 54].

Le principe de fonctionnement de ce dispositif permet aussi une alimentation continue du séparateur tribo-aéro-électrostatique.

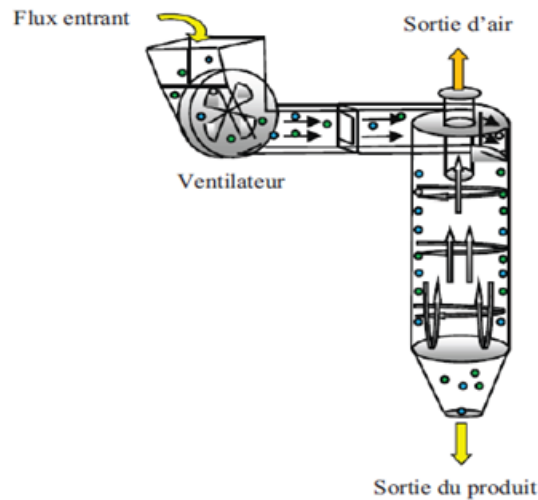


Figure I-6. Représentation schématique d'un dispositif de chargement par cyclone.

❖ Chargement par vibrations

Une autre solution pour charger les particules est représentée par le dispositif à vibrations. Cette installation a été développée par Blajan et al [55] (Fig. I-7). Le matériau à charger glisse dans des canaux en Zig-Zag mis en mouvement vibratoire [56, 57] sur les deux axes X et Y. Les oscillations du dispositif de charge sont contrôlées par un moteur électrique associé à un système bielle-manivelle. Les particules à charger interagissent premièrement avec les parois du dispositif. En changeant la vitesse du moteur, il est possible de modifier le mouvement oscillant du dispositif de charge.

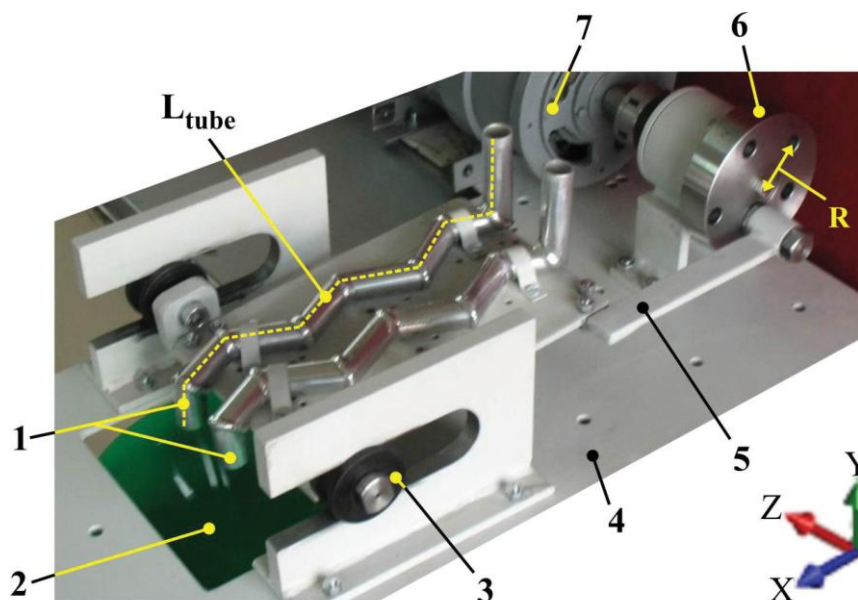


Figure I-7. Dispositif à vibrations ; 1 : tubes de charge ; 2 : sortie des particules chargées ; 3 : glissière ; 4 : support ; 5 : bielle ; 6 : manivelle ; 7 : moteur électrique ; R : rayon ; X, Y, Z : direction du mouvement ; L_{tube} : longueur du tube [56, 57].

❖ *Chargement en lit fluidisé*

C'est le procédé le plus utilisé pour le chargement tribo-électrique. Le fonctionnement du lit fluidisé dans ces dispositifs est défini par six phénomènes (Fig. I-8) [58, 59].

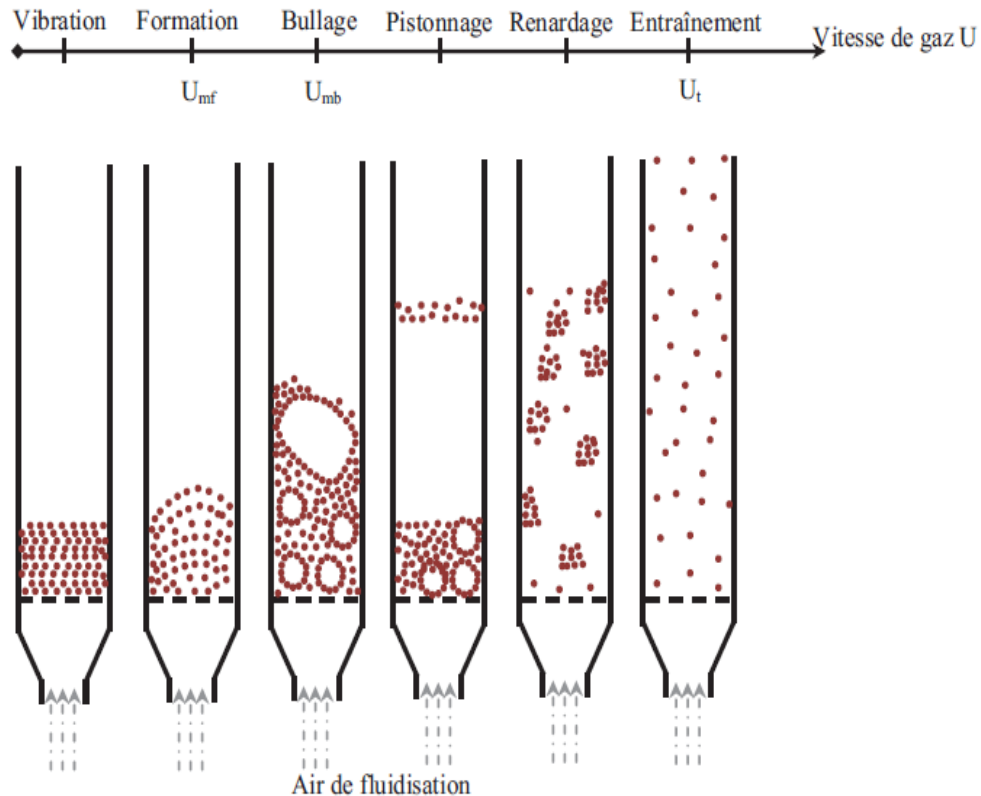


Figure I-8. Régimes d'un lit fluidisé en fonction de la vitesse de fluidisation [58].

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

de grosses bulles et de lit stable. La surface du lit se soulève et retombe de manière très régulière.

- ✓ **Le renardage** : les particules s'accrochent et créent des passages préférentiels pour le gaz.
- ✓ **L'entraînement** : quand la vitesse du gaz est approximativement égale à la vitesse limite de chute des particules dans le gaz au repos U_t , l'ensemble des particules est alors expulsé hors de la chambre de fluidisation : c'est le phénomène d'entraînement.

Le dispositif de la figure I-9 a souvent la forme d'un tube cylindrique isolant, en position verticale. Le mélange de particules est déposé sur un support (un disperseur d'air, en tamis isolant), situé en bas du cylindre. L'air de fluidisation est produit par une soufflante connectée au bas du cylindre. Les particules fluidisées acquièrent des charges électriques de signe opposé grâce aux collisions entre elles. Le dispositif est particulièrement efficace pour les particules fines, car l'air de fluidisation empêche leur agglomération et favorise le chargement par effet triboélectrique.

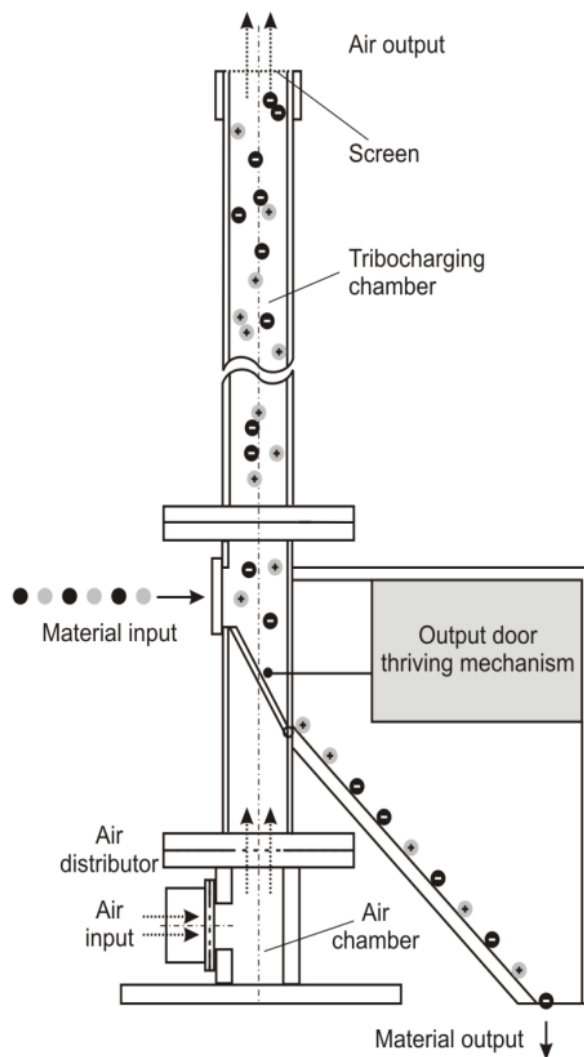


Figure I-9. Dispositif à lit fluidisé [60].

Un article récent [53] décrit une combinaison de deux modes de chargement en cascade (Fig. I-10). La première section du dispositif assure le chargement triboélectrique en lit fluidisé. Les particules fines sont dirigées vers la deuxième partie du dispositif, destinée au chargement statique sur des plaques inclinées. Cette solution technique permet de mieux contrôler le processus, multipliant les mécanismes de charge employés.

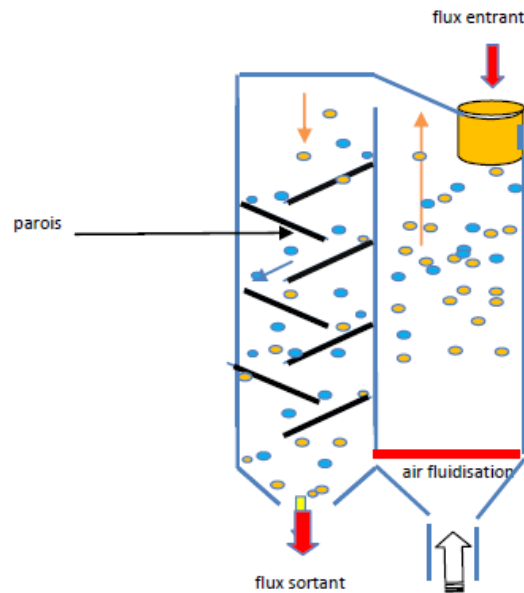


Figure I-10. Représentation schématique d'un dispositif composé d'un lit fluidisé et d'un chargeur statique [53].

I.2. NEUTRALISATION DE LA CHARGE ELECTRIQUE

La décharge électrostatique est probablement le phénomène le plus important à appréhender, car il est la principale cause des nuisances dues à l'électricité statique [61]. Ce phénomène est un événement qui correspond à un transfert spontané de charges électriques qui intervient après une phase d'accumulation. En effet, cette décharge apparaît lorsqu'une distribution de charge superficielle ou volumique engendre un champ électrique supérieur à la rigidité diélectrique du milieu [62].

Un arc se forme entre la surface chargée et celle d'un conducteur proche. Cette étincelle correspond à une ionisation de l'air, c'est un phénomène transitoire très bref, les temps de montée du courant de décharge étant de l'ordre de nanoseconde. C'est ce phénomène que l'on cherche à tout prix à éviter surtout dans les zones à risques, car l'énergie mise en jeu lors de cette décharge est suffisante pour déclencher un incendie ou une explosion (Fig. I-11).

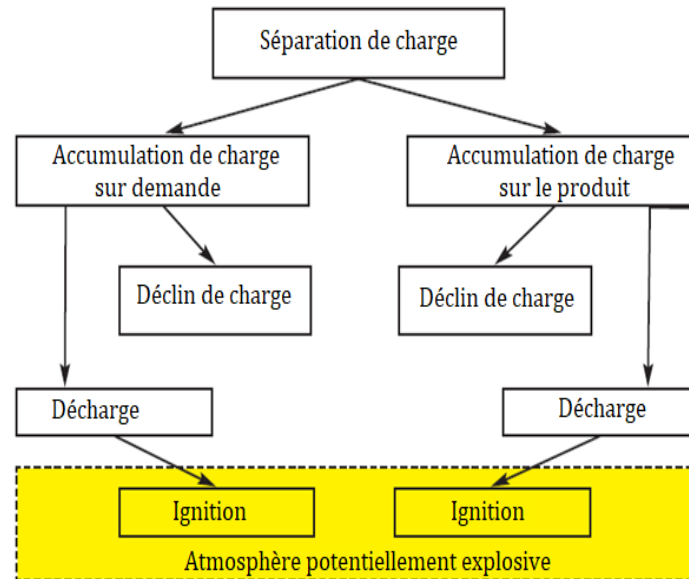


Figure I-11. Représentation schématique des étapes électrostatiques menant à l'inflammation d'une atmosphère potentiellement explosive [63].

Souvent nous ressentons un picotement lorsque nous touchons la porte d'une voiture. Ce picotement est causé par le courant de décharge électrostatique. Ce courant circule de la voiture vers le sol à travers le corps humain ou inversement. La décharge engendrée lors de ce stress est similaire au phénomène de la foudre mais à une moindre échelle (en effet lors d'un orage, les nuages sont chargés en particules négatives qui sont attirées par les particules positives de la terre). Les charges positives et négatives sont isolées par l'air (le caractère d'isolant électrique tient au fait qu'un gaz ne contient aucune particule chargée libre). L'accumulation de charges négatives crée une différence de potentiel électrique qui augmente jusqu'à l'apparition de la foudre. Cette différence peut atteindre jusqu'à 100 millions de Volts causant une expansion brutale de l'air par dégagement de chaleur [64].

La nature électrique de la foudre a été démontrée par Benjamin Franklin en 1750 avec la célèbre expérience du cerf-volant [65]. La foudre constitue la représentation du phénomène ESD (ElectroStatic Discharge) dans sa forme la plus spectaculaire. De manière générale, une décharge électrostatique est définie comme un phénomène rapide qui transfère une quantité finie de charges entre deux corps.

Une décharge électrostatique survient lorsque la différence de potentiel entre deux corps isolés dépasse la valeur du champ disruptif (se dit de la décharge qui éclate avec étincelle) du milieu dans lequel ils se trouvent. Nous allons maintenant décrire les phénomènes de déclin de potentiel.

I.2.1. Déclin de potentiel

Pour limiter les risques dus à l'électricité statique, il est nécessaire de comprendre des phénomènes liés à la génération de la charge électrique et à son évolution ainsi qu'au comportement d'un diélectrique préalablement chargé afin d'évaluer la

dangerosité potentielle de certains produits. Le déclin de potentiel de surface sur les polymères a été étudié expérimentalement et théoriquement au cours des décennies. Dans la plupart des cas, il a été analysé en mesurant le potentiel de surface résultant.

L'un des effets, qui a renforcé l'intérêt pour ce sujet, a été "*l'effet de croisement*" des caractéristiques de décroissance potentielles observées sur les films chargés avec décharge couronne par Ieda [66] et plus tard par d'autres chercheurs [67, 68].

Dans ce travail, sur le polyéthylène, il a été montré que les courbes de déclin de potentiel obtenues à divers niveaux de chargement par décharge couronne se croisaient. Autrement dit, le potentiel de surface de films chargés à une tension élevée déclinait plus vite que celui de films chargés à une tension inférieure (Fig. I-12) [69].

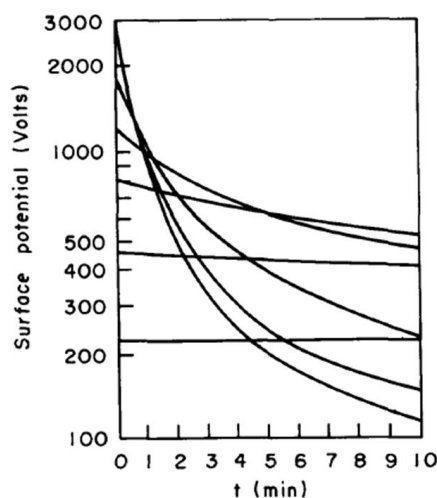


Figure I-12. Déclins de potentiels de surface pour des échantillons de polyéthylène illustrant l'effet du « crossover » [69].

❖ Mécanisme de déclin

Une fois déposé sur une surface d'un diélectrique. Ces charges électriques resteront pendant un certain temps déterminé par l'efficacité de processus de déclin.

Dans l'air en configuration de circuit ouvert, le déclin peut se produire par suite de trois mécanismes principaux, à savoir, la conduction en surface, la conduction en volume et la neutralisation par les ions présents dans la phase gazeuse (neutralisation des gaz) [70-72].

1) Neutralisation en volume

La neutralisation en volume représente la décroissance de la charge à travers le volume du matériau solide et peut être due à des processus de conduction intrinsèque, d'injection de charge et de polarisation [73]. L'efficacité de la conduction intrinsèque dépend des taux de génération et de recombinaison des porteurs de charge ainsi que de leur mobilité à l'intérieur des matériaux.

La décroissance due à l'injection de charge se réfère au transport en volume de charges injectées et la dynamique de ce processus est régie par plusieurs facteurs

physiques, tels que la dérive dans le champ électrique, le piégeage, le décrochage et la recombinaison entre charges de polarité opposée [74, 75].

La plupart des modèles théoriques et interprétations de la décroissance de charge de surface ont supposé que le transport des charges injectées était le mécanisme dominant [76]. La contribution de la polarisation dipolaire à la décroissance de charge dépend principalement sur l'intensité des processus de polarisation lente dans le matériau considéré [73]. Une fois que les charges ont été déposées sur la surface du matériau, le champ électrique résultant déclenche la polarisation du matériau en volume qui tend à éliminer la charge de surface et conduit à une diminution apparente du potentiel mesuré.

2) Conduction en surface

La conduction surfacique est une autre cause du déclin de potentiel en surface, en particulier dans le cas des polymères épais vieillis [77]. Les charges se déplacent sur les couches primaires de la surface, ce phénomène se manifeste surtout sur les polymères en dehors de conditions particulières d'activation (par la température, le champ et le rayonnement) [78].

3) Neutralisation de gaz

Le terme "*neutralisation de gaz*" est généralement utilisé pour indiquer une compensation ou une neutralisation des charges de surface par des ions libres attirés par la surface chargée à partir de l'environnement gazeux environnant [79]. Les ions libres sont toujours présents dans l'air atmosphérique en raison de plusieurs processus d'ionisation. Etre exposé au champ électrique produit par les charges de surface, certains ions peuvent être attirés par l'interface gaz-solide et occuper des surfaces libres piégées. Ces ions interagissent avec ceux qui sont déposés pendant la charge en les filtrant ou en se recombinant avec eux [80].

Dans tous les cas, l'effet macroscopique est vu comme une réduction de la charge de surface (ou de potentiel). Les facteurs critiques qui déterminent l'efficacité de la décroissance de charge due à la neutralisation du gaz sont les concentrations d'ions présents dans la phase gazeuse, l'intensité du champ électrique au voisinage de la région chargée définissant le volume de capture et la profondeur d'énergie des états de surface. Comme certains des facteurs dépendent des distributions du champ électrique dans la configuration expérimentale et dans son voisinage, une quantification générale de ce mécanisme est plutôt compliquée.

I.2.2. Techniques de neutralisation

Le chargement des matériaux granulaires isolants ou poudreux est une opération cruciale dans divers processus électrostatiques comme la séparation [5], la filtration [81, 82], et l'électro-photographie. Dans ces applications et d'autres, le processus de charge peut être réalisé par plusieurs techniques, telles qu'un effet triboélectrique, une décharge couronne ou une exposition aux rayons X. Quelle que soit la technique

employée, les particules isolantes sont susceptibles d'acquérir et de conserver une charge très importante, ce qui est essentiel dans la plupart des cas pour le fonctionnement efficace de l'installation électrostatique.

Cependant, dans certains cas, cette charge peut être à l'origine de problèmes liés à la performance et la sécurité de l'application. En effet, une quantité de charge importante peut provoquer des chocs électriques ou générer des forces électrostatiques. Les décharges électriques dues à des particules fortement électrisées peuvent endommager les circuits électroniques et avoir des conséquences graves dans un environnement inflammable [9].

Les forces électrostatiques résultant de niveaux de charge élevés, peut provoquer l'adhérence de granules isolantes lorsqu'elles sont en contact avec une surface conductrice ou la fixation de fines particules sur le tuyau lors du transport pneumatique de poudres [83]. Par conséquent, la surveillance (et le contrôle) des charges électriques à la surface des matériaux isolantes est nécessaire non seulement pour améliorer les performances des applications électrostatiques mais également pour des raisons de sécurité. Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour neutraliser la charge sur les surfaces des matériaux granulaires que nous exposons brièvement dans le paragraphe suivant.

Les moyens de lutter contre l'électricité statique nuisible sont nombreux et variés, on peut cependant s'intéresser aux principaux rencontrés dans l'industrie en général. Pour éviter l'accumulation de charge sur des isolants ou des conducteurs isolés, il existe une méthode à la fois très simple et très efficace qui consiste à augmenter le taux d'humidité de l'air. En effet, une très légère augmentation de l'humidité peut parfois résoudre les problèmes, toutefois, il n'est pas toujours possible de le faire.

Pour certains matériaux, ceci peut être réalisé en permettant à la charge de se dissiper naturellement par conduction via une connexion terre/terre. Pour ce qui est des parties métalliques, il convient de s'arranger pour établir l'écoulement des charges électriques statiques à la terre, ceci suppose qu'elles soient connectées entre elles et à la terre de manière équipotentielle pour éviter la présence de conducteurs isolés qui peuvent être dangereux.

Cependant, pour de nombreux matériaux, ce processus est beaucoup trop lent pour être pratique. La seule méthode pratique pour neutraliser la charge statique sur la plupart des isolants est l'ionisation de l'air.

❖ Ionisation de l'air

Ces dernières années, le nucléaire (radio-isotope), ultra-violet, radiographie molle, et des ioniseurs par décharge couronne [84] ont été utilisés pour l'ionisation du gaz, tels que résumés dans le tableau I-2.

Les schémas des processus de neutralisation de la charge sont présentés sur la figure I-13. Les ions bipolaires ont été générés par des procédés d'ionisation basés sur des ioniseurs. Les ioniseurs à courant alternatif nécessitent d'une configuration « point-

plan », l'électrode couronne est relié à une source de haute tension alternative, et une plaque métallique relié à la terre pour la génération d'ions bipolaires. Les rayons X ou UV ne sont capables de générer des ions bipolaires que dans des pressions de gaz réduites.

Tableau I.2. Processus de la neutralisation de la charge électrique [74].

Types de sources d'ions (Processus d'ionisation)	Moyens de transport d'ions	Facteurs influents
Décharge couronne DC Décharge couronne AC Ionisation par rayon X Ionisation par UV Radio-isotope	Champs électrique Flux d'air	Intensité du champ électrique Débit du flux d'air Température Pression Géométrie de particules

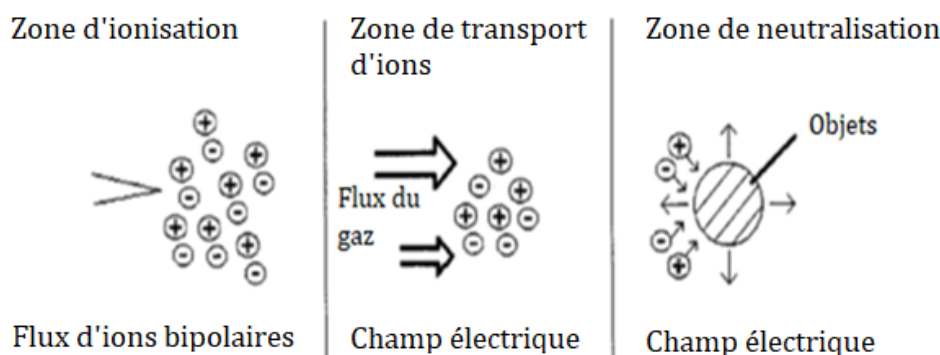


Figure I-13. Représentation schématique du processus de neutralisation des particules chargées [85].

Les ions générés seront transportés à travers un champ électrique externe ou un flux de gaz, puis la neutralisation de la charge électrique des matériaux chargés sera effectuées comme indiqué sur la figure I.13.

Les facteurs d'impact tels que la pression du gaz, la température, la vitesse d'écoulement, le champ électrique, etc..., pour ces processus sont également résumés dans le tableau I.2.

Nous nous intéressons dans ce qui suit qu'à l'ionisation Alpha et l'ionisation par décharge couronne qui est le plus utilisé vue sa simplicité et surtout sa sureté de fonctionnement. Les ioniseurs utilisant la décharge couronne sont classés en deux types : passifs et actifs.

a) Ionisation Alpha

Les ioniseurs alpha utilisent une source nucléaire, le polonium 210, qui est un émetteur de particule alpha. La particule alpha, un noyau d'hélium, entre en collision avec des molécules d'air. Les molécules de gaz qui perdent des électrons deviennent des ions positifs. Les électrons délogés ne restent pas très longtemps avant d'être capturés par des molécules de gaz neutres, formant des ions négatifs (Fig. I-14) [85].

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

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

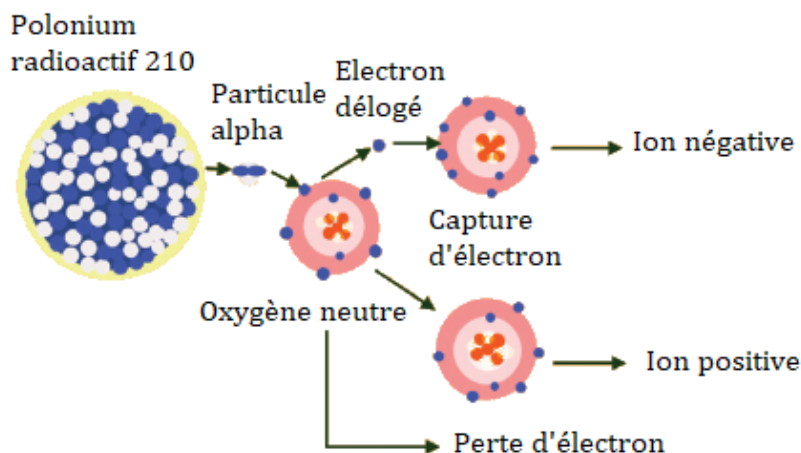


Figure I-14. Représentation schématique du processus de production des ions bipolaires [86].

Le processus est coûteux car les ioniseurs alpha perdent la moitié de leur force tous les 143 jours (la demi-vie d'une source radioactive) [85]. Habituellement, ils doivent être remplacés chaque année. Bien que les ioniseurs alpha aient plus de 25 ans de sécurité, ils sont soumis à la réglementation gouvernementale. Tout ce qui est radioactif rend les gens nerveux. Pour ces raisons, l'utilisation de l'ionisation alpha n'est pas aussi répandue que celle de l'ionisation par décharge couronne.

b) Ionisation par décharge couronne

D'un point de vue technique, il y a deux types de neutralisation par décharge couronne, plus généralement appelés "éliminateurs statiques", ceux qui utilisent le champ électrique pour déplacer les ions de la source vers l'objet chargé et ceux utilisant des gaz circulant (air) pour déplacer un nuage ionique bipolaire au voisinage d'un objet chargé, où le champ sélectionnera les ions appropriés pour réaliser la neutralisation [32, 86, 87].

Les ioniseurs Corona utilisent des champs électriques forts en appliquant une haute tension à une électrode de faible rayon de courbure pour déplacer les électrons. En raison de la désintégration des éléments radioactifs présents dans le sol et dans l'air, quelques électrons libres sont toujours présents dans l'atmosphère.

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

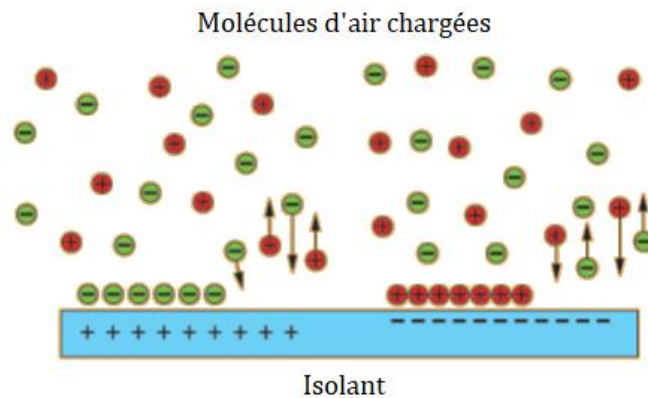


Figure I-15. Neutralisation d'une surface par ionisation d'air bipolaire.

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

I.3. CONCLUSION

Ce premier chapitre présente les deux mécanismes de création de charges électriques, l'effet triboélectrique ainsi que la décharge couronne, ces deux types de mécanismes étant caractérisés par différents phénomènes liés à leurs créations et à leurs développements.

Plusieurs techniques utilisées pour la neutralisation des particules isolantes, la neutralisation par décharge couronne des matériaux granulaires, celle qui nous intéresse dans le cadre de notre étude.

L'accumulation des charges électriques sur les matériaux issus des processus de séparation électrostatique peuvent causer des dégâts majeurs quoique ce soit pour la sécurité des opérateurs ou le matériel utilisé. Nous avons mis en évidence les mécanismes responsables du déclin du potentiel de surface en fonction du temps.

En ce qui concerne la modélisation et l'optimisation par la méthode de plan d'expériences, nous n'avons donné qu'un aperçu de ce type de modélisation qui doit être approfondi. Ces plans peuvent nous aider à optimiser le processus de neutralisation qui sera discuté dans les chapitres suivants.

Une étude expérimentale est réalisée afin d'atteindre l'objectif de ce travail. Les installations réalisées ainsi que les démarches expérimentales effectuées dans le cadre de cette thèse seront présentées de façon détaillée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

INSTALLATIONS EXPERIMENTALES ET

METHODES D'ANALYSE

CHAPITRE II

INSTALLATIONS EXPERIMENTALES ET METHODES D'ANALYSE

Le contrôle de la charge électrique résiduelle acquise sur les matériaux granulaires traités dans diverses installations électrostatiques est une condition préalable au bon fonctionnement des équipements industriels respectifs.

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour neutraliser et contrôler cette charge. Parmi elles, la décharge couronne est largement utilisée car elle peut produire facilement et économiquement des ions bipolaires [88]. La décharge couronne en courant alternatif (AC) crée une zone ionisée à proximité du fil, de la lame ou électrode haute tension de type aiguille [89, 90].

Dans ce chapitre nous présenterons les caractéristiques des matériaux ayant faits l'objet de l'étude de la neutralisation. Par la suite nous exposons les bancs expérimentaux réalisés dans le cadre de cette thèse ce qui permet l'étude de l'efficacité de la neutralisation électrostatique de la charge électrique acquise sur les matériaux isolants issus de différents processus de séparation électrostatique, ainsi nous citons les dispositifs utilisés pour la charge des matériaux granulaires isolants par effet triboélectrique et par effet couronne. Ceci nous permet l'étude de la neutralisation avec les deux types de chargement.

Nous allons décrire le système de neutralisation utilisé dans cette étude, il s'agit d'un neutralisateur commercial connecté à des sources HT.

Un banc de mesure a été réalisé pour nous permettre l'acquisition de la charge électrique sur la surface de différents matériaux isolants chargés, à l'aide d'une cage de faraday relié à un électromètre (keithley électromètre 6514), pour plusieurs situations en faisant varier divers paramètres expérimentaux.

A la fin de ce chapitre, nous exposerons la méthode des plans d'expériences et les hypothèses utilisées qui ont permis la modélisation de certains processus de neutralisation électrostatique étudiés dans le cadre de cette thèse.

II.1. CARACTERISATION DES MATERIAUX ISOLANTS

II.1.1. Matériaux issus des DEEEs

La première série d'expériences réalisées dans le cadre de cette étude ont été établis sur plusieurs matériaux isolants granulaires (acrylonitrile butadiène styrène - ABS, polystyrène à haute résistance - HIPS, chlorure de polyvinyle - PVC, polycarbonate - PC et polyamide PA) issus du broyage des Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques (DEEE), fournis par la société APR2, Bonnières-sur-Seine, France. Ces matériaux ont été choisis grâce à leur large utilisation dans différents domaine, et leurs excellentes caractéristiques mécaniques tel que présentés dans le tableau II-1.

Tableau II-1. Caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux généraux [91].

	ABS	HIPS	PC	PA	PVC
Densité [g/cm³]	1.06	1.05	1.2	1.14	1.4
Couleur	Marron	Blanc	Orange	Bleu	Gris
Forme	Aléatoire	Aléatoire	cylindrique	Cylindrique	Aléatoire
Taille [mm]	∅ 2.5 x 4	∅ 2.5 x 4	∅ 3 x 3.6	∅ 2.5 x 3.4	∅ 2.5 x 3
Masse [mg]	25	25	20	20	30
Absorption d'eau à 23 °C HR 50 % [%]	0.3	0.2	0.15	3	0.2
Rigidité diélectrique [kV/mm]	20	60	30	20	40

Le PVC est une matière thermoplastique de synthèse composée de carbone, d'hydrogène et de chlore. La production industrielle du PVC remonte au début des années 1930. C'est un plastique très présent dans notre vie quotidienne car l'ensemble de ses propriétés mécaniques et physiques et son aptitude à être modifié selon les besoins en font un matériau adapté à de multiples usages. C'est la troisième matière plastique employée dans le monde, avec 20 % de la consommation mondiale totale des plastiques, soit de l'ordre de 28 millions de tonnes [92].

L'ABS est généralement utilisé dans la fabrication d'instruments de musique, de composants automobiles, notamment de pare-chocs, de boîtiers pour les assemblages électriques et électroniques, de bagages et d'étuis de protection [93].

Exposant des résistances électriques et à haute température, les polyamides PA sont considérés comme des plastiques hautes performances et sont largement utilisés dans les marchés de l'automobile et du transport, des biens de consommation et des applications électriques et électroniques, entre autres [94].

Le PC est utilisé dans la fabrication de certains composants extérieurs des automobiles. Le polystyrène à haute résistance HIPS est un thermoplastique obtenu par

la polymérisation de haute résistance aux chocs. Connue comme « Polystyrène choc », elle est utilisée comme matériau de support dans les impressions d'ABS ou de PLA. Bien que la plupart de ses propriétés mécaniques et physiques (rigidité, résistance à la traction et aux chocs, stabilité thermique, etc...) soient similaires à celles de l'ABS.

La taille et l'aspect des particules d'ABS, de PC, de PA, de PVC et de HIPS faisant l'objet de l'étude dans le cadre de cette thèse peuvent être examinés à la figure II-1.

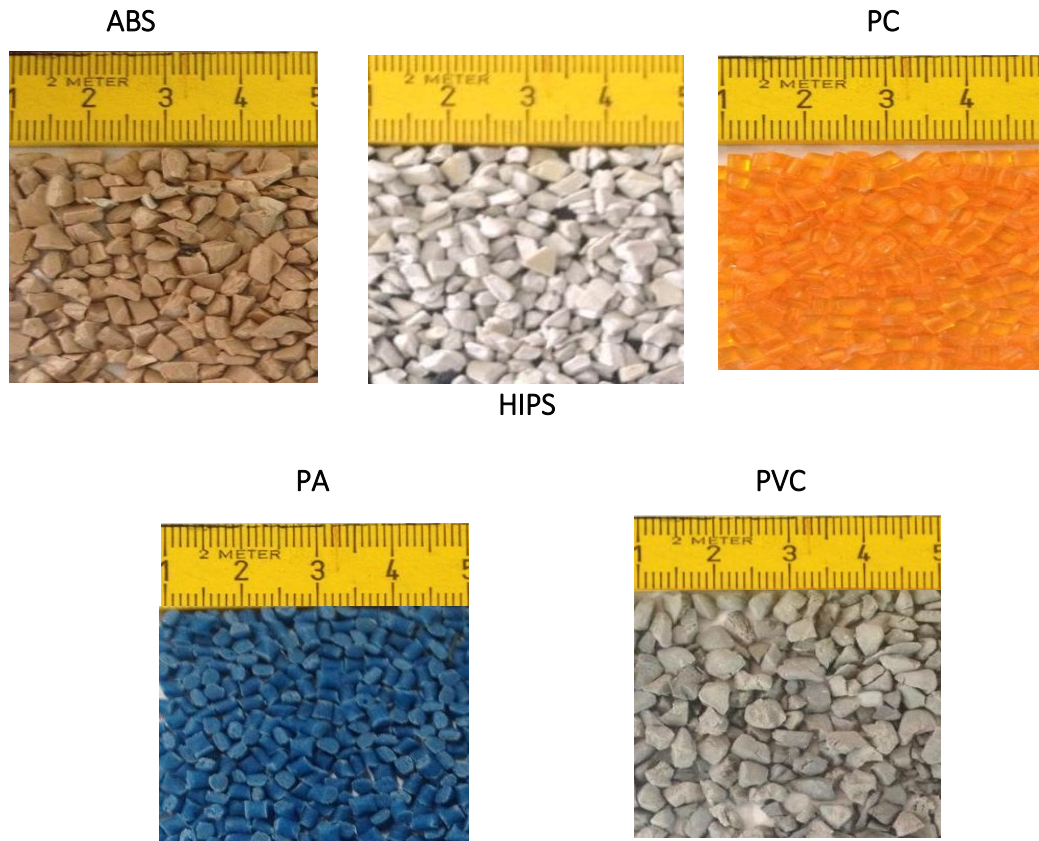


Figure II-1. Photographie de différentes particules utilisées dans l'étude (taille typique : 2-4 mm).

II.1.2. Câble électrique

Le câble électrique utilisé pour la transmission, la communication et le transport de l'électricité, de l'électronique et des communications augmente constamment en raison du développement industriel et de la courte durée de vie de ces équipements [95, 96]. Par conséquent, les procédés de recyclage ou les techniques de séparation de ces câbles sont également devenus un sujet important. Généralement, les câbles électriques sont constitués de conducteurs métalliques (cuivre ou aluminium) et d'isolateurs polymères (PVC : polychlorure de vinyle, XLPE : polyéthylène réticulé, PP : polypropylène, caoutchouc).

Cependant, ces mélanges de XLPE = PP ou de PVC = caoutchouc ayant une densité similaire sont difficiles à séparer par une méthode conventionnelle, et sont donc principalement remplis de terre ou restent accumulés dans le champ, entraînant une perte économique ainsi qu'une contamination environnementale [97, 98]. Notamment,

Le PVC entre les plastiques de couverture pollue l'environnement en générant le gaz HCl dangereux et dioxines.

L'ensemble des expériences réalisées dans le cadre de cette étude a été effectué avec des échantillons de particules isolantes de même masse $m = 20$ g provenant du broyage des déchets de câbles électriques fournis par l'Entreprise de Récupération de l'Ouest (Oran, Algérie) spécialisée dans le recyclage des câbles électriques et téléphoniques. Ce matériau a été choisi pour son qualité d'acquisition de la charge électrique, ce qui facilite l'analyse des résultats de la charge massique lors de l'étude des diverses conditions expérimentales. Ainsi leur forte utilisation dans le domaine de recyclage du DEEE.

L'aspect des particules utilisées, d'une taille granulométrique moyenne comprise entre 2 et 5 mm, est montré dans la figure II-2.



Figure II-2. Aspect et taille du produit utilisé dans les expériences.

La séparation électrostatique des matériaux granulaires isolants nécessitent un niveau de la charge plus élevé sur la surface de ces matériaux afin d'augmenter l'efficacité de ce processus.

Afin d'étudier le processus de neutralisation, le niveau de la charge élaboré pour ces expériences a été ajusté pour faire l'approche au séparateur électrostatique de type cylindre tournant qui sera étudié dans cette thèse.

II.2. INSTALLATIONS EXPERIMENTALES

La séparation des matériaux granulaires représente aujourd'hui un important domaine d'application industrielle de l'électrostatique, au même titre que la précipitation des poussières, le poudrage électrostatique ou la photocopie des documents [99, 100]. Le tri des matériaux granulaires dans les séparateurs électrostatiques est produit par plusieurs mécanismes physiques (induction électrostatique, décharge couronne et effet triboélectrique) qui agissent sur les particules chargées et qui se trouvent dans un champ électrique intense [101, 102]. Différents dispositifs (plaque, tambour, chute libre, deux convoyeurs, tapis, etc...) sont utilisés pour la séparation des différents mélanges métalliques et isolants composant les déchets.

Des séparateurs électrostatiques à effet de couronne, sont utilisés avec succès à l'heure actuelle pour le tri sélectif des matériaux conducteurs et non conducteurs à partir d'une large gamme de DEEE granulaire [103].

L'intérêt de l'industrie pour le développement de ces applications justifie l'étude des phénomènes physiques déterminant le comportement des granules isolants en champ électrique intense, notamment les processus de charge couronne et par effet triboélectrique [104, 105].

❖ Description de l'installation utilisée

Le premier travail est effectué sur l'installation expérimentale, que nous avons réalisée au laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès, permet de tester l'efficacité de la neutralisation électrostatique de la charge électrique sur des petites quantités de particules de taille millimétriques. L'étude de la neutralisation des différents matériaux granulaires isolants chargés est principalement basée sur la quantification de la charge électrique acquis sur leurs surfaces, avant et après la neutralisation.

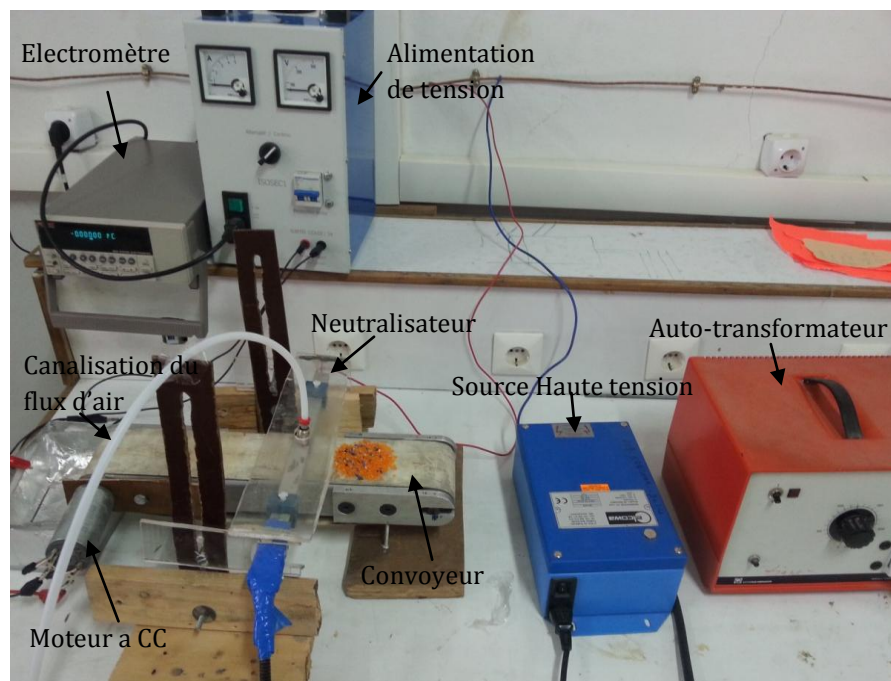


Figure II-3. Photographie du dispositif expérimental.

Les matériaux granulaires sont chargés puis déposés sur la surface du convoyeur mis en mouvement, qui joue le rôle d'une électrode reliée à la terre. Ce convoyeur est entraîné par un moteur électrique pas à pas à courant continu d'une puissance de 120 W. Une fois qu'ils sont exposés à la décharge couronne, ils sont transférés vers le poste de mesure.

La technique utilisée comprend pour son fonctionnement trois phases. La figure II-4 illustre l'ensemble de ces phases ainsi que les instruments utilisés.

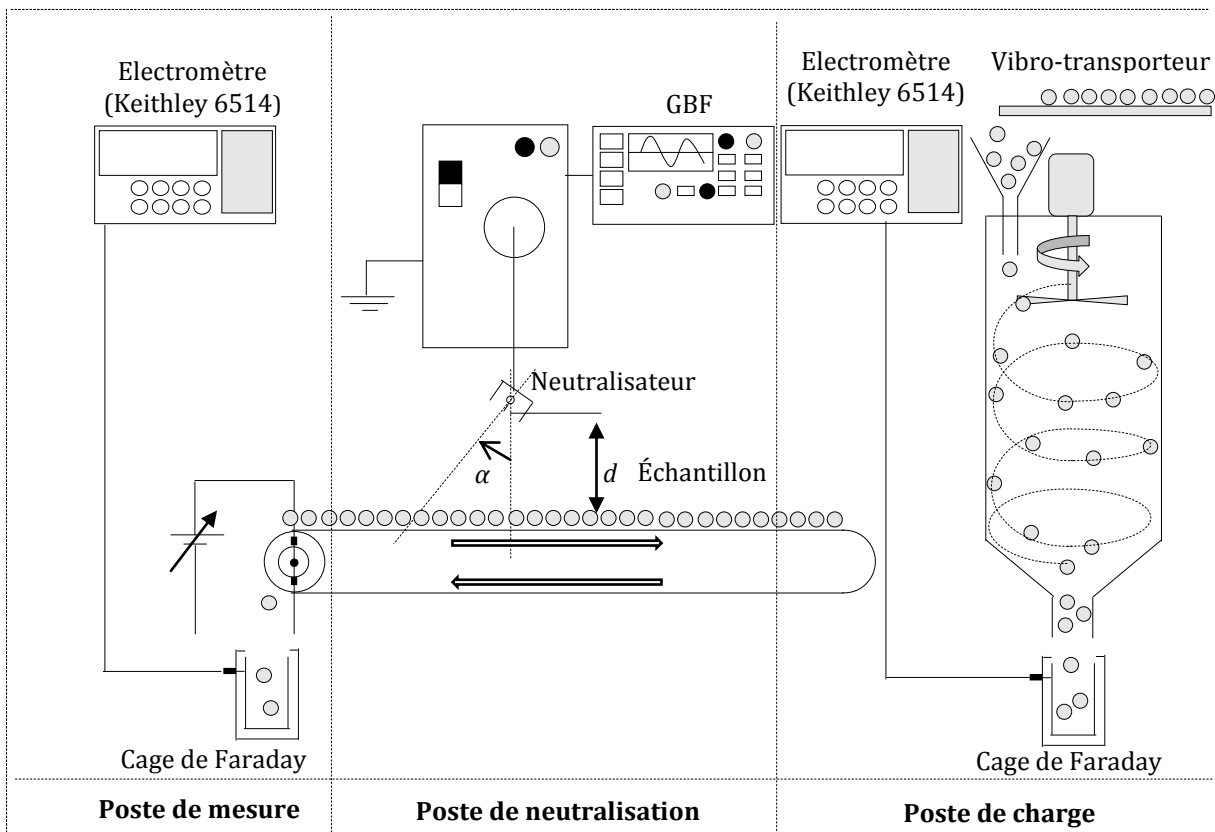


Figure II-4. Schéma du banc expérimental pour la neutralisation des matériaux isolants par la mesure de la charge électrique.

Dans la première phase, la charge des matériaux granulaires par effet triboélectrique se fait à l'aide d'un tribo-chargeur à hélice réalisé au niveau de laboratoire APELEC. Ce dispositif permet de garantir un bon niveau de charge électrique pour toutes les sortes des matériaux utilisés afin de bien voir l'influence de la neutralisation.

La deuxième phase est l'élimination de cette charge électrique sur ces matériaux en utilisant un système de neutralisation et en évaluant son efficacité. Les échantillons chargés sont transférés, à l'aide d'un transporteur à bande, vers la décharge couronne.

La mesure de la charge électrique est la dernière phase qui se fait par une cage de Faraday reliée à un électromètre placé à l'extrémité du tapis roulant, la cage de Faraday est placée sur une balance électronique pour la mesure de la masse des particules.

Les principaux paramètres, retenus pour évaluer l'efficacité de la neutralisation des matériaux granulaires isolants, sont le niveau et la polarité du potentiel appliqué au neutralisateur, la distance entre le neutralisateur et la surface extérieure du convoyeur, l'angle d'inclinaison du neutralisateur par rapport à l'axe vertical et la vitesse du d'écoulement d'air injecté dans le neutralisateur [106].

II.2.1. Phase de la charge des matériaux granulaire isolants

L'effet triboélectrique permet le chargement électrique des matériaux isolants granulaires ou pulvérulents à l'aide d'une grande variété de dispositifs mécaniques ou aérodynamiques (alimentations vibrantes, tubes rotatifs, lits fluidisé, etc...).

Afin d'étudier le processus de neutralisation, le dispositif expérimental de type hélice utilisé a été réalisé au laboratoire APELEC de l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès [52]. Les éléments constituant ce dispositif sont montrés sur la figure II-5.

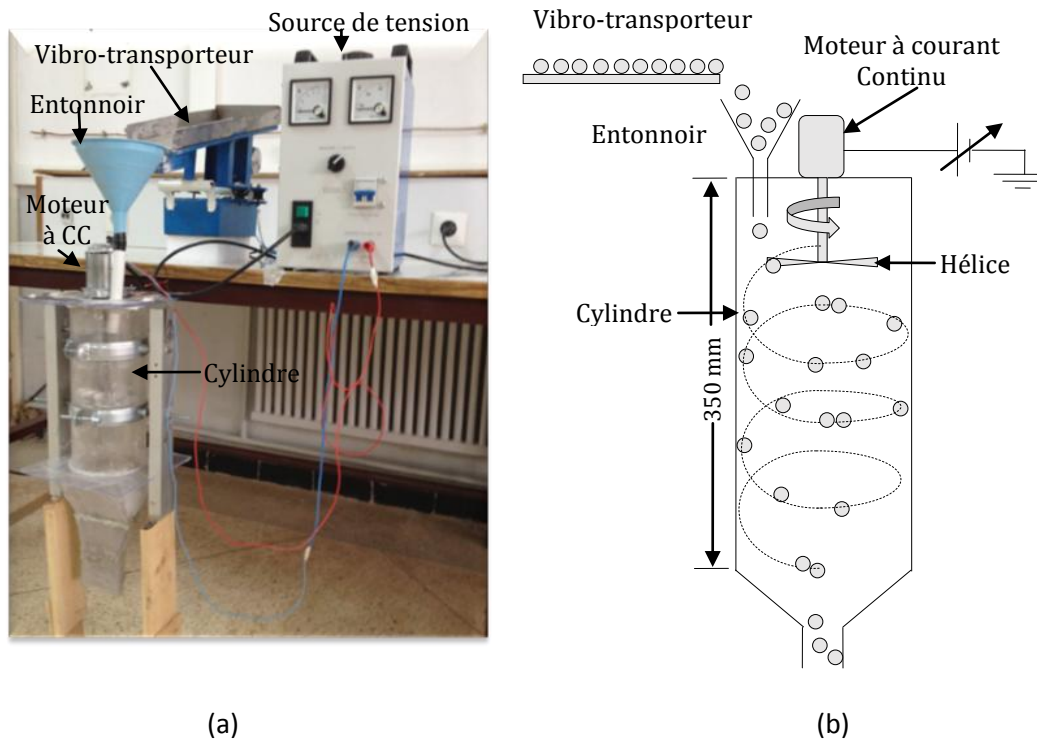


Figure II-5. Photographie (a) et représentation schématique (b) du dispositif de chargement Triboélectrique.

Le dispositif expérimental consiste d'un tube cylindrique en poly méthacrylate de méthyle (PMMA). A son extrémité supérieure, la chambre est munie d'une hélice coaxiale en PVC entraînée par un moteur électrique à courant continu à vitesse variable. La vitesse du moteur à courant continu a été réglée à une vitesse de $n = 2500$ tr/min. Ce dispositif entraîne les matériaux granulaires dans un mouvement hélicoïdal qui devrait favoriser leur chargement triboélectrique par trois types de collisions : granule à cylindre, de granule à granule et de collision de granule à hélice. Le débit massique dans l'appareil est de l'ordre de 10 g/s (la capacité maximale de cette installation de laboratoire). Le signe et la grandeur de la charge de chaque granule ont été déterminés par l'action combinée de ces trois mécanismes physiques.

Les matériaux granulaires sont introduits dans le tribo-chargeur par un dispositif d'alimentation dont nous contrôlons le débit d'alimentation.

Les expériences de chargement ont été réalisées avec des échantillons de plusieurs matériaux isolants : PC, PA, ABS, PVC et HIPS, granulométries allant jusqu'à 3 mm de

diamètre, issus du déchetage des déchets d'équipements électriques, électroniques et informatiques.

II.2.2. Phase de la neutralisation

A) *Electrode commerciale de neutralisation de charge*

Plusieurs techniques peuvent être utilisées pour neutraliser la charge électrique résiduelle de tels produits, parmi lesquels la décharge couronne est la méthode la plus fréquemment utilisée, cette dernière peut produire facilement et économiquement des ions bipolaires [11]. Elle est produite entre deux électrodes fortement asymétriques, une électrode active (sous forme d'aiguilles métalliques, lames ou fils) connectée à une source de haute tension alternative AC, et une autre électrode mise à la terre (cylindre métallique ou plaque). Il existe plusieurs types de neutralisateurs qui utilisent la décharge couronne comme mécanisme de neutralisation dans l'industrie, tel que : des électrodes couronne de type « dual », les antistatiques commerciales.

Ce procédé de neutralisation s'effectue en exposant la surface des matériaux chargés directement par la décharge couronne générée par une électrode de neutralisation dédiée à ce travail. La figure II-6 présente une photographie du dispositif utilisé pour la neutralisation des matériaux granulaires isolants. Ce système se compose de neutralisateur commercial connecté à une source de haute tension alternative AC.



Figure II-6. Photographie du dispositif de neutralisation de la charge électrique.

Les éléments constituant ce neutralisateur sont montrés sur la figure II-7. Un tube en Aluminium (23 mm x 20 mm) en forme de U maintient une barre isolante, à travers laquelle passe un câble haute tension dans lequel sont insérés les points d'ionisation (distance entre deux points : 1 cm). Les points sont alimentés par une alimentation haute tension alternative (ELCOWA, modèle SC 04 B, 7 kV, 5 mA, 50 Hz). Le profil tubulaire agit également comme chambre d'expansion pour l'air comprimé utilisé pour assister le processus de neutralisation. De trous minces sont disposés dans le tube afin de générer un flux d'air homogène (le débit d'air varie de 1200 l/min à 2 bars jusqu'à 2750 l/min à 5 bars).

Le bombardement ionique représente le mécanisme le plus important de la neutralisation de charge des granules isolants dans l'industrie. Les ions bipolaires sont produits à proximité des points de couronne. Les forces de champ électrique conduisent ces ions à l'électrode en forme de U mise à la terre du dispositif, mais aussi à la plaque métallique reliée à la terre pour contenir les particules isolantes chargées à neutraliser. Le flux d'ions émis par la baguette est déterminé par le champ électrique local au niveau de la surface du fil de charge.

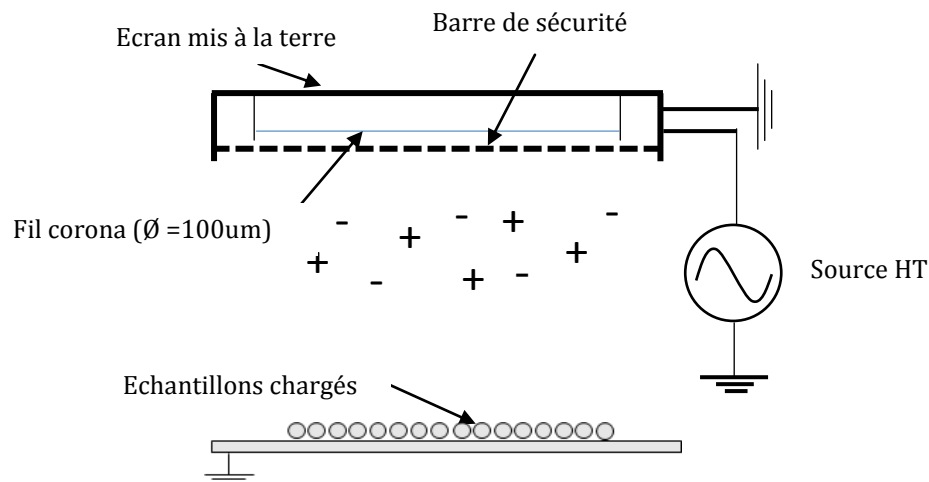


Figure II-7. Représentation schématique du dispositif de neutralisation de la charge électrique.

Ceci est, à son tour, déterminé par la courbure du fil corona qui, dans la pratique, peut s'avérer quelque peu non-uniforme, causant des variations du taux de dépôt de charge sur la longueur du chargeur corona. Excepté lorsque le fil corona a été endommagé ou a été sérieusement affecté par l'accumulation de poussière, ces petites variations du dépôt de charge peuvent être éliminées en variant l'orientation du chargeur corona et sa direction de déplacement.

Lorsque l'air comprimé est introduit dans le boîtier, ces ions sont également entraînés aéro-dynamiquement à la surface de la plaque. Les porteurs de charge de signe opposé sont attirés et partiellement neutraliser les particules chargées, tandis que celles du même signe sont repoussés.

B) Chambre d'expansion d'air

L'électrode de neutralisation commerciale dispose également d'une entrée d'air, et des trous minces disposés le long de l'électrode afin d'assurer une homogénéité du flux d'air (Fig. II-8 (a)). L'air comprimé injecté à l'intérieur du neutralisateur à l'aide d'un compresseur (Black & Decker CP 100/2) fournit un flux d'air d'un débit variable (Fig. II-8 (b)). Son principe de fonctionnement est simple : un moteur électrique fait tourner un cylindre qui comprime l'air dans une cuve où il est emmagasiné. Une fois que l'air est stocké à la bonne pression, le moteur s'arrête et l'outil est prêt à fonctionner. On peut alors utiliser l'air lui-même en le reliant à un pistolet à peinture.

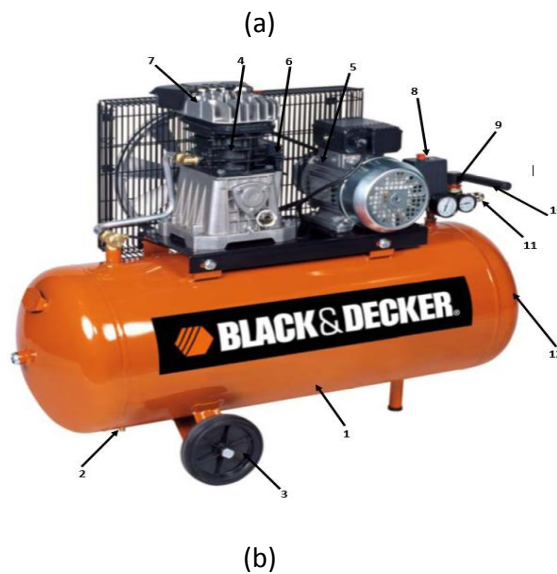
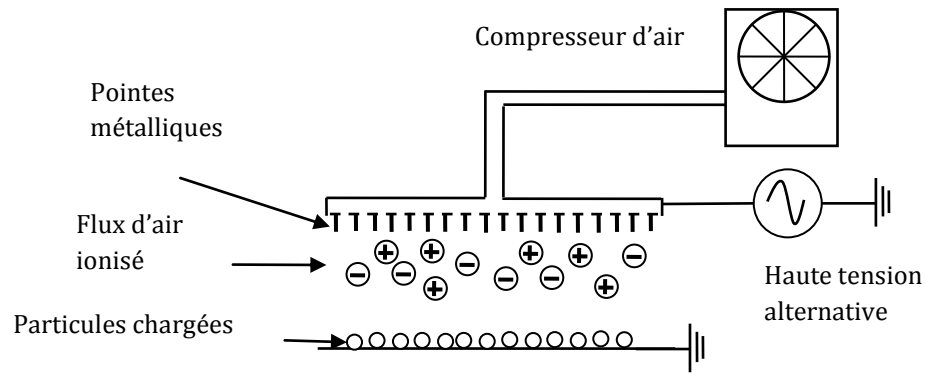


Figure II-8. Photographie du compresseur Black & Decker CP 100/2.

- 1- Réservoir
- 2- Evacuation condensation
- 3- Roue
- 4- Groupe compresseur
- 5- Tige de niveau d'huile
- 6- Filtre à air
- 7- Carénage de protection
- 8- Pressostat
- 9- Réducteur de pression
- 10- Poignée
- 11- Sortie air comprimé
- 12- Vanne de sécurité

C) Alimentation utilisée

L'amplificateur de haute tension utilisé dans les expériences de neutralisation modèle (Trek HV amplifier, 30/20) délivrant une tension réglable jusqu'à 30 kV avec un courant maximal de 20 mA commandé par un générateur de fonction numérique (Modèle FG300, Yokogawa) (Fig. II-9).

L'amplificateur de haute tension permet le contrôle du signal de la tension (sinusoïdal, carré ou triangulaire), et de varier l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée.

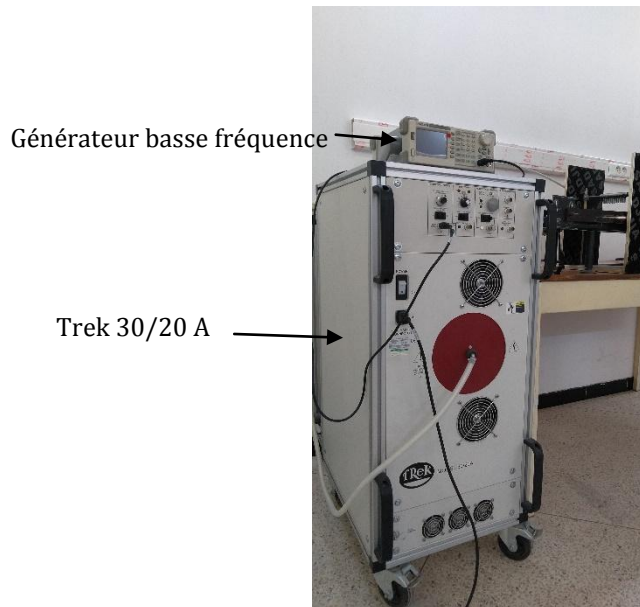


Figure II-9. Photographie d'un : Amplificateur Trek 30/20 A, générateur basse fréquence.

Les caractéristiques de l'alimentation (Trek HV amplifieur, 30/20) sont présentées dans le tableau II-2.

Tableau II-2. Caractéristiques générales de l'alimentation utilisée.

Fabricant	TREK
Modèle	30/20A
Plage de tension de sortie	0 à ± 30 kV DC ou pic AC
Plage de courant de sortie	0 à ± 20 mA DC ou pic AC
Plage de tension d'entrée	0 à ± 10 V DC ou crête AC
Impédance d'entrée	25 k Ω , nominal (option inverseur / différentiel)
Gain de tension DC	3000 V/V
Tension de décalage (offset)	Moins de ± 4 V
Bruit de sortie	Moins de 1.5 V rms *
Vitesse de balayage (10% à 90%, typique)	Supérieur à 350 V / μ s
Petite bande passante de signal (-3dB)	DC à plus de 30 kHz
Large bande passante de signal (distorsion de 2%)	DC à plus de 2.5 kHz
Dimensions	103.9 cm H x 43 cm L x 87 cm P
Poids	73 kg

II.2.3. Phase de mesure de la charge électrique

Une fois que les matériaux granulaires sont chargés, ils sont transférés vers le troisième poste dédié à la mesure de la charge électrique. Les mesures ont été réalisées

à l'aide d'une cage de Faraday reliée à un électromètre numérique modèle Keithley 6514 (Fig. II-10), placé à l'extrémité du tapis roulant. Les mesures ont été effectuées avant et après neutralisation.

Pour chaque essai, une série de mesures est effectuée dans les mêmes conditions prédéfinies et à chaque fois, après la mesure, l'échantillon est neutralisé par le neutralisateur commercial (Elcowa Inc., modèle SC 04 B) pour son utilisation dans des essais ultérieurs, de cette façon, les mêmes conditions d'opération ont été gardé pour l'ensemble d'expériences réalisées.



Figure II-10. Photographie de la cage Faraday et de l'électromètre 6514.

L'électromètre est un multimètre à courant continu capable de mesurer des tensions, en consommant un courant très faible grâce à une résistance d'entrée très grande ($> 10^{15} \Omega$);

- ✓ des courants très faibles (< 10 à 9 A et jusqu'à 10 à 17 A);
- ✓ des charges électriques jusqu'à 10 à 15 C ou moins.

La mesure de la masse est effectuée par une balance électronique Kern 440-47N d'une résolution de 0.1 g et portée 2000 g . Cette balance peut se connecter à un ordinateur pour effectuer des mesures en corrélation avec la charge électrique.

II.3. SEPARATEUR ELECTROSTATIQUE A CYLINDRE TOURNANT

La deuxième étude présentée dans cette thèse a été effectuée en utilisant un séparateur électrostatique corona à électrode cylindrique tournante, couramment utilisé pour la séparation des mélanges de particules plastique/métal contenus dans les déchets de câbles électriques [107].

Il permet de séparer un mélange granulaire isolant-métal avec des puretés très proches de 100% . La photographie de l'installation expérimentale utilisée dans ce travail est montrée sur la figure II-11.

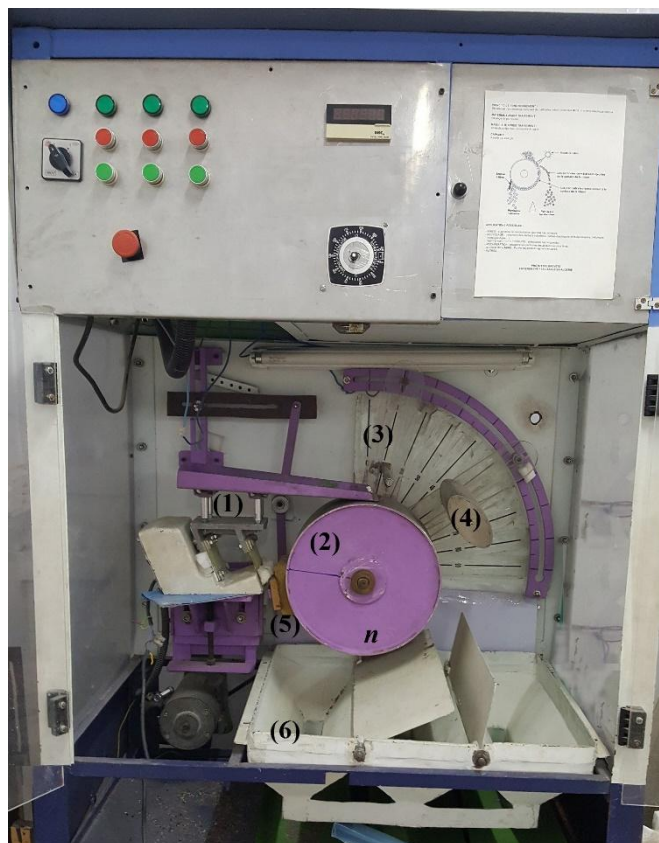


Figure II-11. Photographie du séparateur électrostatique à cylindre tournant (Modèle «SELMEG »).

- 1- Vibro-transporteur ;
- 2- Electrode cylindrique reliée à la terre ;
- 3- Electrode couronne reliée à une source de HT continue ;
- 4- Electrode statique reliée à la même source de HT continue ;
- 5- Brosse ;
- 6- Collecteur de particules.

Dans ce type de séparateur, le champ électrique est créé entre deux électrodes (3) et (4) connectées au générateur de haute tension et l'électrode tournante reliée à la terre. La goulotte oscillante (1) dépose le produit granulaire à séparer sur la surface de l'électrode (2), qui l'introduit dans la zone du champ électrique. Deux mécanismes de charge sont simultanément employés : *bombardement ionique* et *induction électrostatique*. Le premier est destiné aux particules isolantes ; le deuxième implique seulement les particules conductrices [108].

Chargées par *bombardement ionique* dans la zone de décharge couronne, les granules isolants adhèrent à la surface du tambour grâce à la force d'image électrique [4, 109]. Ils tombent dans la partie du collecteur (6) qui leur est réservée lorsque la résultante des forces de pesanteur et centrifuge l'emportent sur la force d'image électrique. Pour assurer la chute de ces particules, certains séparateurs électrostatiques industriels sont équipés par une autre électrode couronne, appelée électrode de

neutralisation (5), pour éliminer la charge acquise q . Les particules qui restent collées sont éliminées de la surface du tambour par une brosse (6).

Dans la zone de décharge couronne, les granules conducteurs perdent rapidement la charge à travers le cylindre relié à la terre. Ils acquièrent ensuite par induction électrostatique une charge de signe opposé au potentiel des électrodes haute tension et seront attirés par celles-ci. Ces granules se retrouvent finalement dans la partie droite du collecteur.

Le but de ce deuxième travail est d'analyser l'effet des différents paramètres influant sur le processus de la neutralisation à savoir : la forme du signal appliqué aux neutralisateurs (Sinusoïdal, Carré ou Triangulaire), la fréquence de ce signal, l'amplitude de la haute tension, le flux d'air injecté et la hauteur de neutralisateur au-dessus des matériaux granulaires.

L'idée de base consiste à mesurer la charge massique sur ce matériau après leur exposition à la décharge couronne générée par l'électrode duale Q_c . Par la suite ce même matériau chargé est exposé à une deuxième électrode de neutralisation Q_n .

II.3.1. Test de chargement par effet couronne

La décharge couronne, utilisée depuis longtemps pour charger des isolants, permet d'effectuer cette opération dans l'air et sans contact. Cette décharge électrique non disruptive et auto-entretenue se produit lorsque la différence de potentiel entre les électrodes d'une configuration asymétrique est assez élevée. Elle est largement exploitée pour tester des matériaux diélectriques et étudier leurs réponses à une charge d'espace [110-113].

Le processus de charge des particules isolantes par effet couronne a été étudié en utilisant la configuration du séparateur électrostatique tel que présenté sur la figure II-12.

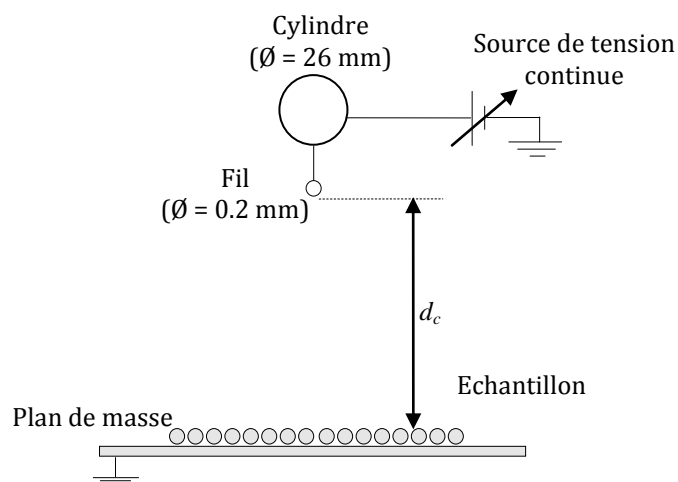


Figure II-12. Système de charge avec électrode de type « dual » à fil-plan.

L'échantillon pesé avec une balance électronique de précision 0.1 g est déposé sur le tambour à l'aide d'un vibro-transporteur, les granules se chargent alors par bombardement ionique grâce à une électrode couronne constituée d'un fil de tungstène de diamètre 0.2 mm fixé à un cylindre métallique de diamètre 25 mm. Le fil situé à une distance ajustable au-dessus de l'électrode tournante reliée à la terre est connecté à une alimentation DC haute tension réglable de polarité négative (Spellman, 40 kV, 6 mA).

Les granules chargés par bombardement ionique dans la première zone de champ électrique ionisant, collent à la surface du tambour grâce à la force électrique d'image jusqu'à ce qu'elles arrivent au niveau de la brosse où elles se détachent et tombent dans une cage de Faraday reliée à un électromètre sensible pour la mesure de la charge électrique placés sur une balance électronique Q_c .

Des essais préliminaires ont été effectués pour ajuster les valeurs de la tension U , la vitesse de la rotation du tambour n et la distance inter-électrodes d_0 relatives à l'électrode de chargement ionique. Pour ces expériences, la tension a été variée entre 12 et 15 kV pour 3 valeurs différentes de la distance d_0 (2, 3 et 4 cm).

L'alimentation en haute tension des électrodes couronne se fait dans une première série d'expérience à partir de deux générateurs de polarités opposées de la marque Spellman de 30 kV/15 W/0.5 mA (Fig. II-13). Les tensions appliquées peuvent varier de 0 V à 30 kV.



Figure II-13. Photographie du générateur de haute tension utilisé.

Notons que toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions climatiques stables : $T = 24 \pm 2$ °C et $RH = 50 \pm 5$ %.

II.3.2. Test de neutralisation

Les expériences de neutralisation électrostatique ont été effectuées sur le séparateur à tambour rotatif présenté sur la figure II-11. L'installation expérimentale utilisée dans ce travail est schématiquement représentée sur la figure II-14.

Les granules chargés par bombardement ionique dans la première zone de champ électrique ionisant [114], collent à la surface du tambour grâce à la force électrique d'image jusqu'à ce qu'elles arrivent au niveau de l'électrode de neutralisation où elles se détachent et tombent dans une cage de Faraday reliée à un électromètre sensible pour la mesure de la charge électrique Q_n . L'électrode de neutralisation (ELCOWA, Mulhouse, France) de longueur 250 mm est constituée de 25 pointes métalliques reliées à un

amplificateur de haute tension (Treck HV amplifier, 30/20) délivrant une tension réglable jusqu'à 30 kV avec un courant maximal de 20 mA commandé par un générateur de fonction numérique (modèle FG300, Yokogawa). L'électrode de neutralisation dispose également d'une entrée d'air à l'aide d'un compresseur d'air à débit variable.

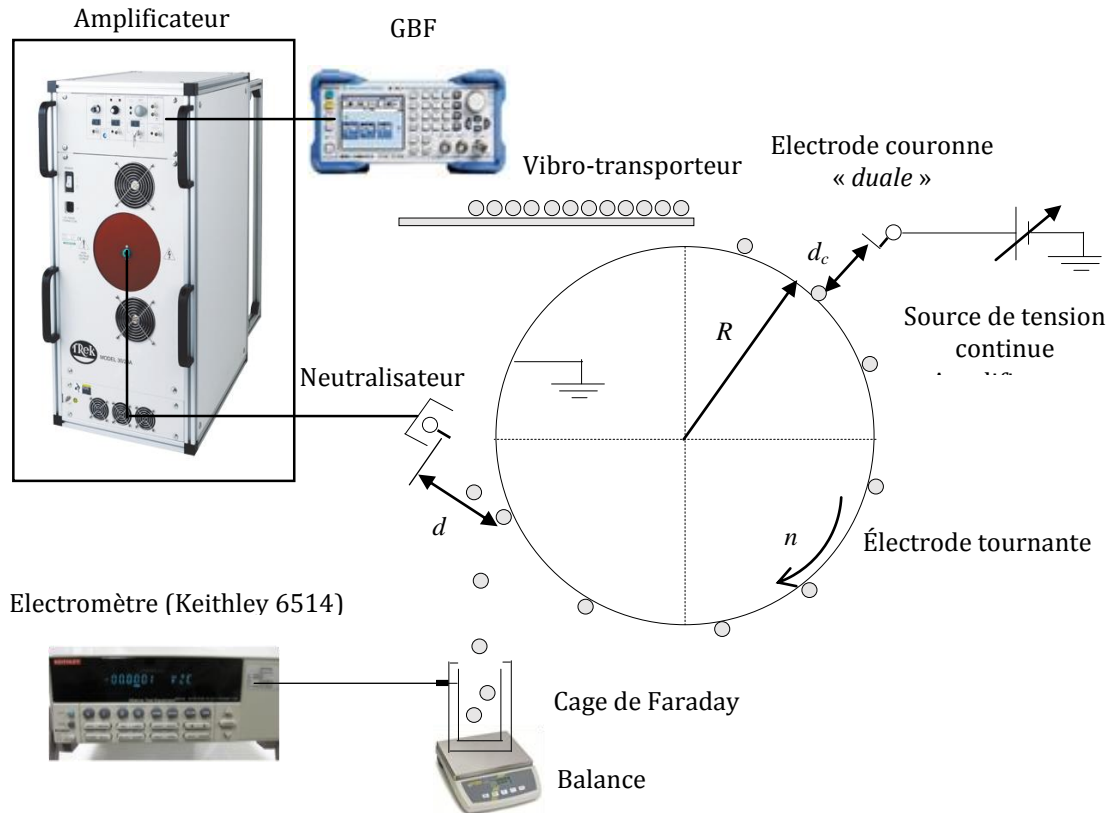


Figure II-14. Installation expérimentale utilisée pour le chargement par électrode couronne négative et la neutralisation par électrode couronne alternative.

L'amplificateur de haute tension permet le contrôle du signal de la tension (sinusoïdal, carré ou triangulaire), et de varier l'amplitude et la fréquence de la tension appliquée. Par ailleurs, la distance entre les pointes de l'électrode couronne de neutralisation et la surface de la couche granulaire chargée est variable.

Le processus de neutralisation est multifactoriel, et l'analyse expérimentale est effectuée en tenant compte de tous les facteurs possibles : la valeur de la haute tension U [kV], la forme du signal appliqué, la fréquence de ce signal f [Hz], et le débit d'air de la soufflante v [m/s].

L'efficacité de la neutralisation des particules chargées a été évaluée par l'estimation du rapport donné par la relation suivante :

$$N(\%) = (1 - Q_n/Q_c) * 100 \quad (\text{II-1})$$

Où : Q_n et Q_c représentent respectivement la charge électrique de l'échantillon après et avant neutralisation.

Toutes les expériences ont été effectuées dans des conditions ambiantes stables (humidité relative : 40 % à 50 %, température : 24 °C à 27° C).

II.4. METHODE DES PLANS D'EXPERIENCES

La méthode des plans d'expériences (*MPE*) est une technique de planification d'expériences et d'analyse des informations obtenues. La technique nous permet d'utiliser un nombre minimum d'expériences, dans lequel nous modifions systématiquement plusieurs paramètres expérimentaux simultanément pour obtenir des informations suffisantes. Sur la base des données obtenues, un modèle mathématique du processus étudié est créé. Le modèle peut être utilisé pour comprendre l'influence des paramètres expérimentaux sur le résultat et pour trouver un optimum du processus.

Un logiciel moderne est utilisé pour créer le plan d'expériences, pour obtenir un modèle et pour visualiser les informations générées.

La *MPE* peut être définie comme un moyen systématique de modifier les paramètres expérimentaux (facteurs) pour créer des résultats qui peuvent être analysés méthodiquement et qui fournissent des informations utiles sur le processus étudié. La figure II.15 fournit un aperçu des différentes étapes du flux de travail de la *MPE*.

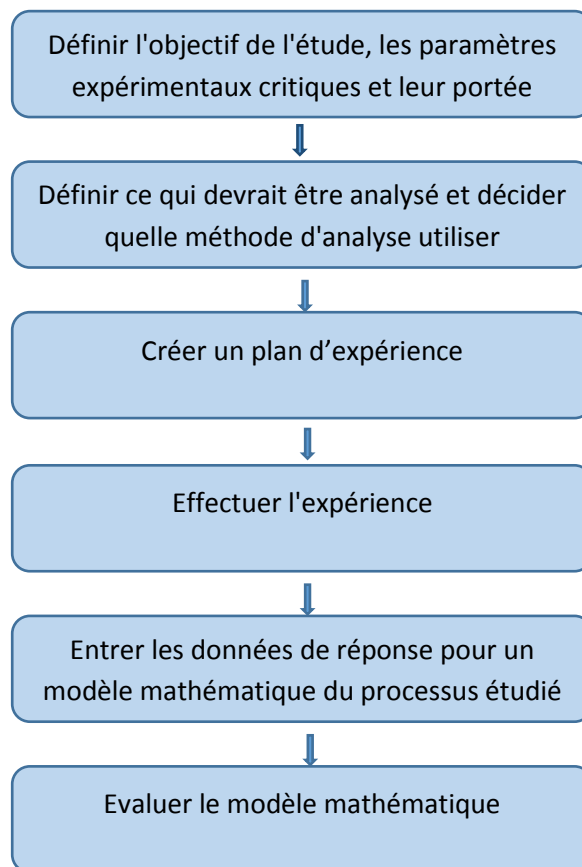


Figure II-15. Différentes étapes pour l'étude d'un processus avec la méthode des plans d'expériences.

II.4.1. Notion d'espace expérimental

Un expérimentateur qui lance une étude s'intéresse à une grandeur qu'il mesure à chaque essai. Cette grandeur s'appelle la réponse, c'est la grandeur d'intérêt. La valeur de cette grandeur dépend de plusieurs variables. Au lieu du terme "*variable*" on utilisera le mot "*facteur*". La réponse dépend donc d'un ou plusieurs facteurs. Le premier facteur peut être représenté par un axe gradué et orienté (Fig. II-16). La valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai est appelée niveau. Lorsqu'on étudie l'influence d'un facteur, en général, on limite ses variations entre deux bornes. La borne inférieure est le niveau bas. La borne supérieure est le niveau haut.

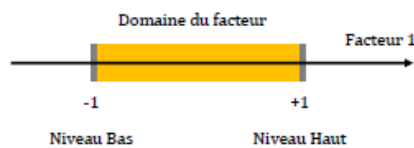


Figure II-16. Niveau bas du facteur est noté par -1 et le niveau haut par +1. Le domaine de variation du facteur est constitué des valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre le facteur entre le niveau bas et le niveau haut, s'appelle le domaine de variation du facteur ou plus simplement le domaine du facteur. S'il y a un second facteur, il est représenté, lui aussi, par un axe gradué et orienté. On définit, comme pour le premier facteur, son niveau haut, son niveau bas et son domaine de variation. L'axe représentant le second facteur est disposé orthogonalement au premier. On obtient ainsi un repère cartésien qui définit un espace euclidien à deux dimensions appelé l'espace expérimental [115].

II.4.2. Plans factoriels

L'étude d'un phénomène peut, le plus souvent, être schématisé de la manière suivante : on s'intéresse à une grandeur Y que nous appellerons *Réponse* qui dépend d'un grand nombre de variables, x_1, x_2, \dots, x_n , que nous appellerons *Facteurs*.

La modélisation mathématique consiste à trouver une fonction f telle que $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Une méthode classique d'étude consiste en la mesure de la réponse Y pour plusieurs valeurs de la variable x_i tout en laissant fixe la valeur des $(n-1)$ autres variables. On itère alors cette méthode pour chacune des variables. Ainsi, par exemple, si nous avons 4 variables et si l'on décide de donner 5 valeurs expérimentales à chacune d'elles, nous sommes conduits à effectuer $5^4 = 625$ expériences. Ce nombre élevé dépasse les limites de faisabilité tant en temps qu'en coût. Il faut donc réduire le nombre d'expériences à effectuer sans pour autant perdre la qualité des résultats recherchés. Le traitement de ces résultats se fait à l'aide du calcul statistique et de l'analyse de la variance.

II.4.3. Plans factoriels complets

Un plan factoriel complet est un plan dans lequel les chercheurs mesurent les réponses pour toutes les combinaisons de niveaux de facteurs.

Le nombre d'essais nécessaires dans le cadre d'un plan factoriel complet à deux niveaux est égal à 2^k où k correspond au nombre de facteurs. Plus le nombre de facteurs figurant dans un plan factoriel à deux niveaux augmente, plus le nombre d'essais nécessaires pour effectuer un plan factoriel complet augmente rapidement. Par exemple, un plan factoriel complet à 2 niveaux avec 6 facteurs requiert 64 essais ; un plan avec 9 facteurs requiert 512 essais. Un plan factoriel fractionnaire de fraction $1/2$ ne requiert que la moitié de ces essais.

Le modèle mathématique adopté à priori est un polynôme prenant en compte la moyenne, les effets de chaque facteur et toutes les interactions entre les facteurs pris deux à deux, trois à trois, quatre à quatre, ..., k à k .

$$y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij \dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-2})$$

Un plan 2^k comporte 2^k points expérimentaux qui se situent aux 2^k sommets d'un hyper cube de k dimensions. Le modèle mathématique contient 2^k coefficients qui sont les inconnues. L'ensemble des résultats d'un plan 2^k conduit donc à un système de 2^k équations à 2^k inconnues, si l'on ne tient pas compte des erreurs expérimentales. Ce système peut se mettre sous la forme matricielle :

$$y = Xa \quad (\text{II-3})$$

Avec : Y : vecteur ayant pour composantes les réponses de chaque essai, et représenté par une matrice colonne $(2^k, 1)$,

a : vecteur ayant pour composantes la moyenne, les effets des facteurs et toutes les interactions, et représenté par une matrice colonne $(2^k, 1)$; ces composantes sont les inconnues que l'on cherche à déterminer,

X : matrice carrée $(2^k, 2^k)$ composée de -1 et $+1$ selon les valeurs des niveaux x_i .

II.4.4. Plan composite

Les plans d'expériences complets sont les plus simples, ils sont aussi les plus utilisés. Les premiers résultats obtenus grâce à ces plans peuvent toujours être complétés par de nouvelles expériences permettant d'atteindre le degré de précision et d'information recherché.

Un plan comportant l'étude de k facteurs prenant chacun deux niveaux est désigné par la notation 2^k . Le domaine d'étude d'un plan 2^2 peut être représenté comme sur la figure II-17 [93].

La fonction de réponse y_i peut s'exprimer comme suit :

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + \sum a_{ij \dots k} x_i x_j \dots x_k \quad (\text{II-4})$$

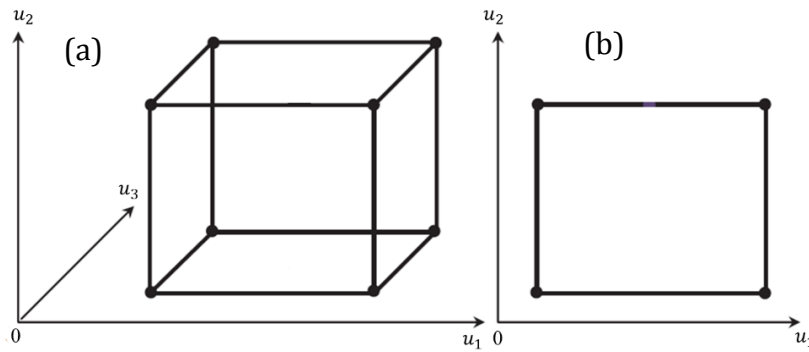


Figure II-17. Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences complet pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b).

La construction de plans composites centrés consiste à rajouter des points en étoile à partir d'un plan factoriel complet. Ces points sont positionnés à une distance $\pm a$ du centre du domaine suivant les axes des facteurs.

L'ensemble de ces points constitue un système au sein duquel on ne fait varier qu'un seul facteur à la fois. Il y a donc $2k$ points en étoile, k étant le nombre des variables du plan d'expériences (Fig. II-18).

$$y = f(x_i) = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ij} x_i x_j + \sum a_{ijl} x_i x_j x_l + \dots + a_{i..k} x_i \dots x_k \sum a_{ij} x_i^2 \quad (\text{II-5})$$

Le domaine de variation d'un facteur est représenté par un segment, tandis que le point de mesure est marqué par un point. L'étoile marque le centre du domaine total de la variation, correspondant à la valeur moyenne de chaque facteur. Le nombre total des essais N , pour k facteurs s'écrit alors :

$$N = 2^k + 2 \cdot k + 3 \quad (\text{II-6})$$

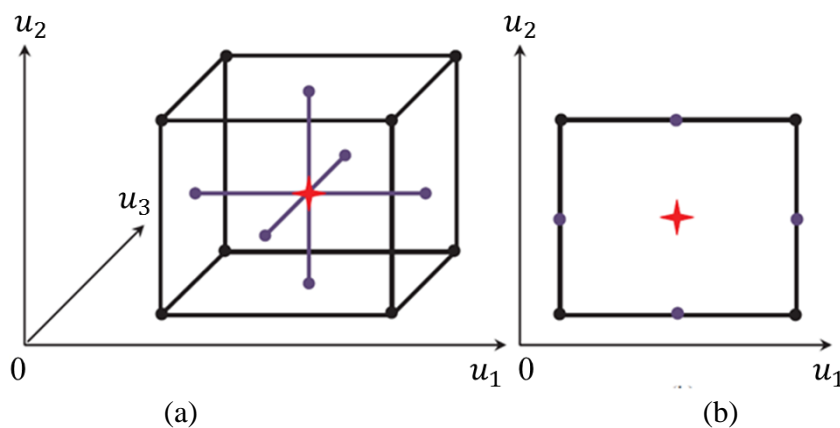


Figure II-18. Représentation graphique des points de mesures nécessaires pour un plan d'expériences composite pour un domaine défini par 3 facteurs (a) ou 2 facteurs (b).

II.4.5. Logiciels des plans d'expérience

Les logiciels de plan d'expériences [116, 117] possèdent des bibliothèques de plans classiques et ils permettent aussi de construire le plan le mieux adapté à l'étude, ces logiciels sont encore très marqués par leur origine statistique et peuvent rebuter

certaines utilisateurs. On peut réaliser le calcul des coefficients avec un tableur, mais cela nécessite de la programmation et du temps. Il est donc préférable d'utiliser un logiciel qui effectue non seulement le calcul des coefficients mais aussi tous les calculs statistiques permettant d'évaluer la qualité du modèle mathématique.

Les logiciels de plans d'expériences sont aussi programmés pour calculer des réponses dans tout le domaine d'étude, pour effectuer les analyses de variance, pour tracer des courbes d'iso-réponses, pour construire les surfaces de réponse et pour déterminer les zones d'intérêt. Cet ensemble de possibilités permet d'effectuer rapidement de multiples analyses et de regarder ses données sous tous les angles. On arrive ainsi à extraire, en peu de temps, toute l'information présente dans les résultats d'un plan d'expérience. Les logiciels de plans d'expériences sont devenus des outils absolument indispensables pour la construction de plan complexes et l'interprétation approfondie des résultats du plan. Néanmoins, ces logiciels nécessitent une bonne connaissance de la méthode des plans d'expériences et ne peuvent pas être utilisés sans une formation solide aux plans d'expériences.

Parmi ces logiciels on peut citer le logiciel MODDE de la société Umetrics, qui est un logiciel spécialisé pour la construction et l'analyse de plan d'expérience. Il permet de bâtir et d'analyser des plans criblage, des plans pour la surface de réponse, Taguchi de mélanges, etc... pour estimer les modèles, il utilise soit la méthode des moindres carrés usuels soit la méthode des moindres carrés partiels.



Figure II-19. Photographie de l'interface du logiciel MODDE exécuté dans un ordinateur.

II.5. CONCLUSION

L'étude d'un phénomène nécessite la collecte et l'analyse des données expérimentales. Pour cette raison, une description détaillée a été donnée aux dispositifs utilisés dans les expériences, en commençant par décrire les matériaux granulaires

isolants qui permettent la validation des différents procédés de neutralisation électrostatique pour l'industrie du recyclage.

Par la suite, les installations expérimentales faisant l'objet des essais de la neutralisation électrostatique sont décrites. Ce qui permet d'étudier plusieurs paramètres expérimentaux influents sur l'efficacité de la neutralisation.

La modélisation et l'optimisation de processus de la neutralisation électrostatique utilisant la méthodologie des plans d'expérience pourrait représenter une solution viable pour ajuster les différents paramètres influents sur ces processus, afin d'améliorer de façon importante la qualité de la séparation.

Dans le chapitre qui va suivre, nous présenterons les résultats expérimentaux des différents facteurs étudiés qui affectent le processus de la neutralisation. Finalement, ces résultats seront discutés et analysés pour la modélisation et l'optimisation à l'aide de la méthode des plans d'expériences.

CHAPITRE III

ETUDE DE LA NEUTRALISATION DE

MATERIAUX GRANULAIRES

ISOLANTS CHARGES

CHAPITRE III

ETUDE DE LA NEUTRALISATION DE MATERIAUX GRANULAIRES ISOLANTS CHARGES

L'étude de la neutralisation des matériaux granulaires isolants chargés présentée dans ce chapitre sera divisée en deux parties. Les mesures de la charge électrique réalisées en fonction des différents paramètres (amplitude de la haute tension, distances inter-électrodes, vitesse du flux d'air, etc...) sont présentées et discutées dans la première section de ce chapitre. Les mesures de la charge électrique avant et après l'exposition des particules chargées avec la décharge couronne nous permettent de connaître la valeur exacte de la charge éliminée, elles facilitent l'estimation du taux de neutralisation de celles-ci, ce qui nous permet de ressortir les paramètres susceptibles d'affecter le comportement des matériaux isolants. L'objectif principal est d'étudier l'influence des différents paramètres opératoires sur l'efficacité de la neutralisation avec un neutralisateur de charge commercial.

Le deuxième volet concerne l'utilisation de la méthode des plans d'expériences pour modéliser et optimiser le processus de la neutralisation des particules isolantes provenant des déchets d'équipements informatiques. Dans cette partie, nous exposons et nous analysons les prédictions données par le logiciel MODDE 5.0 utilisé pour le traitement des données des différents facteurs étudiés dans la première partie.

Ensuite, nous présenterons les résultats expérimentaux réalisés avec les mêmes conditions de neutralisation donnés par le logiciel MODDE 5.0 pour confirmer la qualité de ces réponses.

III.1. ETUDE DE LA NEUTRALISATION

Un niveau de charge plus élevé avec une distribution plus uniforme sur la surface des matériaux isolants préalablement chargés par effet couronne ou par effet triboélectrique augmente l'efficacité des différents processus électrostatiques telle que la séparation électrostatique utilisée dans le domaine industriel. Cependant, ces charges statiques s'accompagnent des nuisances électrostatiques dont la prise en compte est indispensable dès la phase de conception d'un nouveau procédé.

De ce fait, et afin d'étudier le processus de la neutralisation de ces charges, les particules ont été d'abord chargées par un tribo-chargeur de type hélice réalisé au laboratoire APELEC de l'Université Djillali Liabès de Sidi Bel-Abbès [47]. Ensuite, Ces particules chargées ont été soumises à la décharge électrique produite par un neutralisateur de charge commercial de 250 mm de long ECA 88 BS (ELCOWA, Mulhouse, France) (Fig. II-3).

III.1.1. Etude de chargement des matériaux granulaires isolants

L'histogramme présenté à la figure III-1 montre les résultats expérimentaux du rapport charge-masse en fonction de la vitesse de la rotation de l'hélice réalisé par le tribo-chargeur à hélice. Le but de cette étude est de trouver la vitesse convenable pour que les matériaux granulaires acquièrent une charge électrique proche à ceux obtenus après le processus de séparation électrostatique de type chute libre.

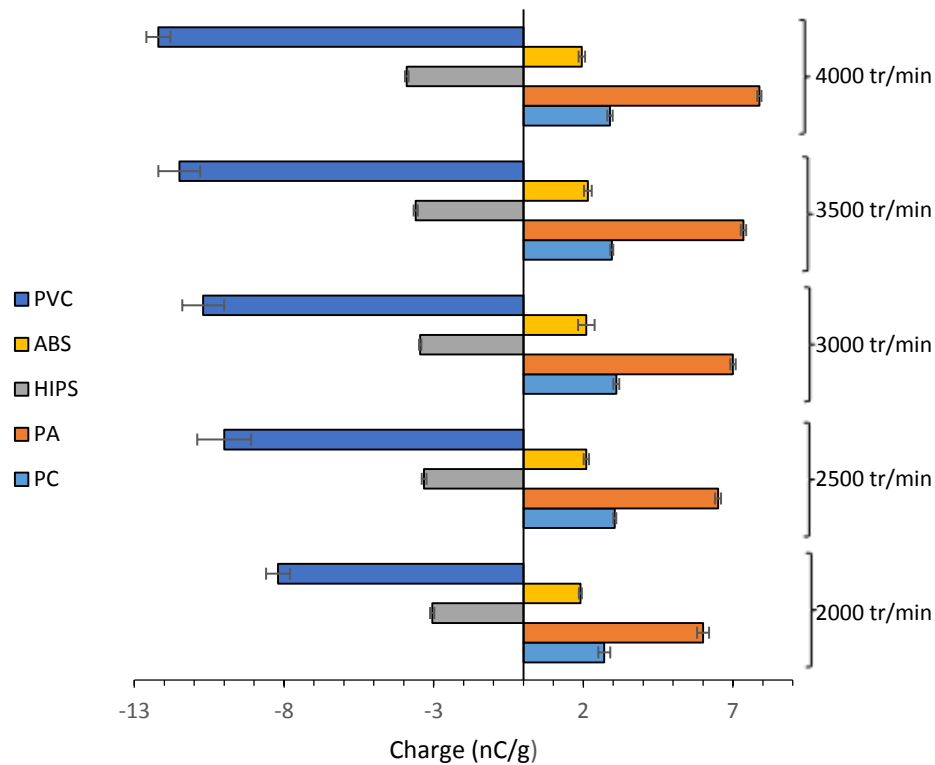


Figure III-1. Effet de la vitesse de l'hélice sur la charge pour différents matériaux avec le tribo-chargeur à hélice.

La figure III.1 montre qu'en augmentant la vitesse de rotation de l'hélice, l'échange d'énergie entre les particules et les pales des hélices et la paroi en PMMA augmentent, par conséquent, le rapport charge/masse augmente. Notons que, les particules de PC, PA et ABS sont chargées positivement, et les particules de PVC et de HIPS sont chargées négativement.

D'après ces résultats obtenus concernant la charge massique pour les différents matériaux granulaires utilisés dans ce travail, la vitesse de la rotation de l'hélice a été ajustée pour $n= 2500$ tr/min dans les expériences de neutralisation.

III.1.2. Protocole et configuration expérimentale

L'efficacité de la neutralisation du neutralisateur de charge commercial utilisé a été testée par plusieurs séries d'expériences effectuées sur l'installation présentée dans la figure II-3, l'idée de base consiste à mesurer la charge des matériaux granulaires isolants avant et après neutralisation.

Le but de cette étape consiste à étudier les différents facteurs susceptibles d'affecter le processus de la neutralisation des différents matériaux granulaires. Ces expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, par les mêmes opérateurs, en utilisant les mêmes échantillons, et dans les mêmes conditions climatiques d'humidité et de température, afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de neutralisation.

L'installation expérimentale utilisée pour l'étude de la neutralisation de charge est représentée schématiquement sur la figure III-2. Les échantillons de 10 g ont été chargés avec le tribo-chargeur à hélice, tournant à la vitesse de 2500 tr/min.

Les résultats obtenus concernant la charge (nC/g) pour les différents matériaux à l'entrée de la bande transporteuse sont reportés dans le tableau III-1.

Tableau III-1. Valeurs typiques de charge à déposer sur le convoyeur pour différents matériaux.

Matériaux	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
Q_c (nC/g)	3.05	-3.32	2.1	-10	6.5

Pour ces expériences de neutralisation, la méthode de travail a suivi les étapes suivantes : d'abord les matériaux granulaires sont chargés avec le tribo-chargeur à hélice, ensuite ces granules ont été récupérés dans une cage de Faraday reliée à un électromètre placé sous le tribo-chargeur, pour mesurer la charge électrique avant la neutralisation Q_c . La cage de Faraday est placée sur une balance électronique pour la mesure de la masse récupérée afin de calculer le rapport charge-masse de ces produits. Une fois les particules chargées, elles sont déposées sur la surface de la bande transporteuse du convoyeur de façon monocouche afin d'assurer une neutralisation homogène sur toute la surface des échantillons.

Les matériaux granulaires isolants chargés ont été soumis séparément à la décharge couronne générée par le neutralisateur commercial, en faisant varier l'un des

quatre facteurs principaux à la fois qui peuvent influencer le processus de la neutralisation et en maintenant les autres facteurs constants.

Il s'agit de l'amplitude de la haute tension qui alimente l'électrode de neutralisation, de la vitesse de flux d'air injecté à travers le neutralisateur, la distance entre le neutralisateur et la surface extérieure de la bande transporteuse du convoyeur, et enfin la position de l'angle du neutralisateur par rapport à la verticale.

Les granules continuent leur chemin jusqu'à la fin du convoyeur où ils sont recueillis dans une seconde cage de Faraday, également reliée à un électromètre, pour mesurer la charge résiduelle après neutralisation Q_n .

III.1.3. Effet de la vitesse d'écoulement d'air « v »

Les résultats expérimentaux obtenus, à savoir le taux de neutralisation des différents matériaux granulaires isolants pour différentes vitesses d'écoulement d'air sont montrés dans la figure III-2.

Les autres paramètres de neutralisation étaient réglés comme suit :

- Tension alternative U appliquée à l'électrode couronne à 5 kV.
- Angle d'inclinaison α de l'électrode de neutralisation par rapport à la verticale à 0° ,
- Distance d entre l'électrode de neutralisation et la bande transporteuse à 2 cm,
- Vitesse linéaire du convoyeur à 6 cm/s.

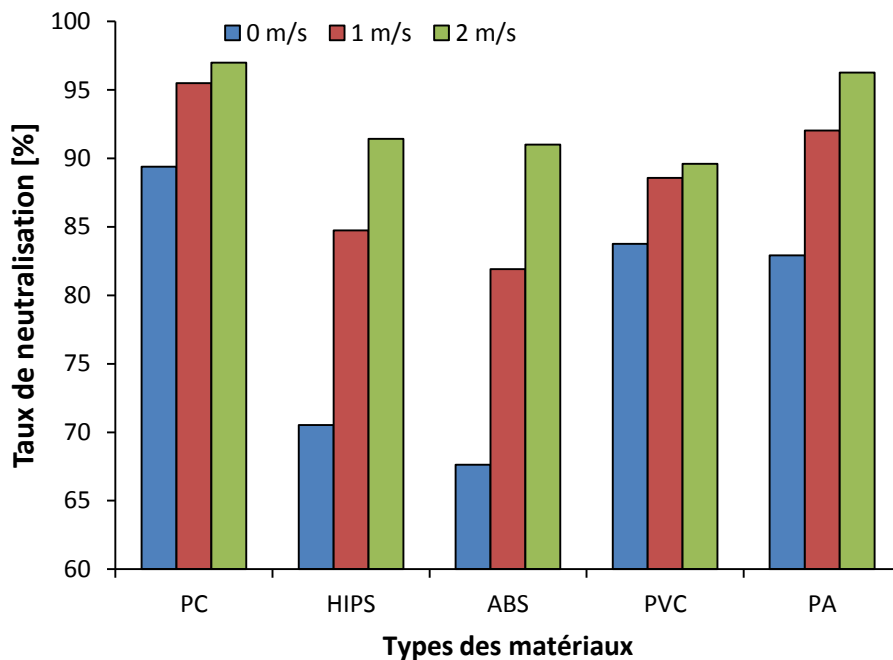


Figure III-2. Taux de neutralisation des différents matériaux pour trois vitesses d'air.

L'augmentation de la vitesse de d'écoulement d'air v était accompagnée d'une aérodynamique des particules, ce qui a amélioré le processus de la neutralisation des échantillons.

Les résultats obtenus (à savoir le taux de neutralisation pour les différents matériaux granulaires) présentés dans la figure III-2 confirment le fait que le flux d'air améliore la neutralisation pour toutes les particules étudiées. On remarque que la quantité de la charge neutralisée est proportionnelle à la vitesse du flux d'air injecté.

Le taux de neutralisation croît avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement d'air, cela est dû à une mobilité importante des porteurs de charge transportés vers l'objet chargé. C'est l'une des raisons majeures qui explique l'utilisation du flux d'air dans les neutralisateurs à courant alternatif dans l'industrie [119].

Les ions bipolaires sont produits à proximité des points de couronne du neutralisateur. Les forces de champ électrique conduisent ces ions vers la surface extérieure de la bande transporteuse du convoyeur relié à la terre qui transporte les particules isolantes chargées à neutraliser. Lorsque de l'air comprimé est introduit, les particules sont également entraînées aéro-dynamiquement à la surface du convoyeur. Les porteurs de charge de signe opposé sont attirés et partiellement neutraliser les particules chargées, tandis que ceux du même signe sont repoussés.

Pour des vitesses d'air élevées, une quantité importante des porteurs de charge positifs et négatifs créés sont poussés vers l'objet chargé. Par conséquent le nombre des particules neutralisées est important. Toutefois, des travaux sont faits par d'autres chercheurs montrent que le temps de déclin du potentiel pour des vitesses d'air élevé est inférieur par rapport à des vitesses d'écoulement d'air faible [119], tel que montré dans la figure III-3.

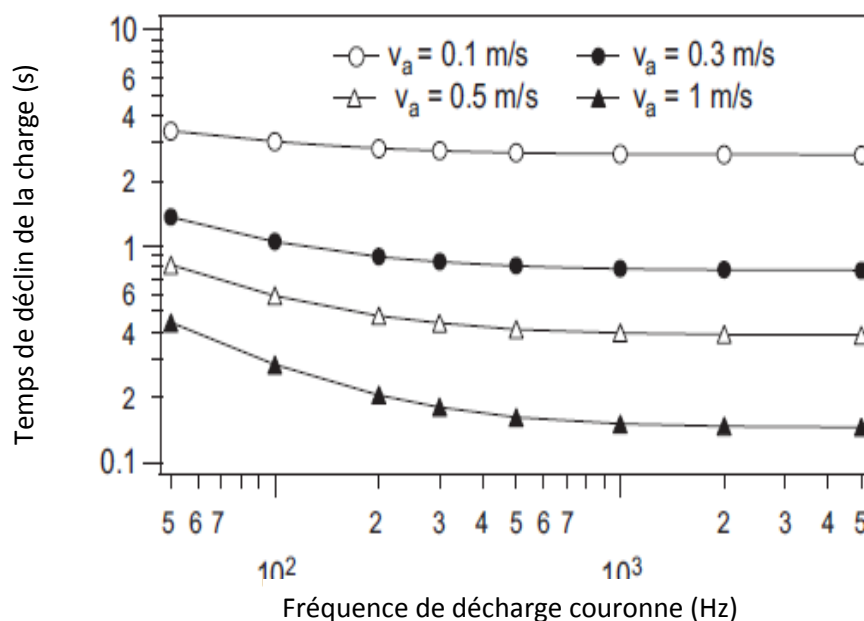


Figure III-3. Temps de déclin de la charge requis pour réduire le potentiel de l'objet de 1 kV à 100 V à différentes vitesses de flux d'air et de fréquences de décharge [119].

L'augmentation de la vitesse du flux d'air dans un ionisateur à courant alternatif se traduira par une réduction du temps de décroissance de la neutralisation, et un transport d'ions plus long. Ce qui explique les résultats trouvés dans notre travail. Cependant, une grande partie des ions créés sont perdus au voisinage de l'ionisateur, puisque ces ions créés sont retardés pour se déplacer vers l'objet par le champ électrique local créés par les ions eux-mêmes, plus le champ électrique externe créés par l'objet chargé. Avec des vitesses d'air élevées, le flux d'air injecté pousse ces ions vers l'objet chargé et réduit l'effet du champ électrique retardateur. Ce flux d'air peut plus facilement transporter de tels ions vers l'objet, ce qui entraîne une neutralisation efficace.

D'après les courbes présentées dans la figure III-3, on remarque que le temps de décroissance décroît non seulement avec la vitesse d'écoulement de l'air, mais aussi avec l'augmentation de la fréquence de la décharge couronne AC. Le temps de décroissance se démunie en fonction de l'élévation de la fréquence, cependant, au-delà d'une certaine fréquence élevée, le temps de décroissance se stabilise. La fréquence de cette saturation dépend de la vitesse du flux d'air qui augmente avec l'augmentation de la vitesse du flux d'air.

La quantité relative de la diminution du temps de décroissance avec l'augmentation de la fréquence de décharge est plus grande à des vitesses d'écoulement d'air plus élevées.

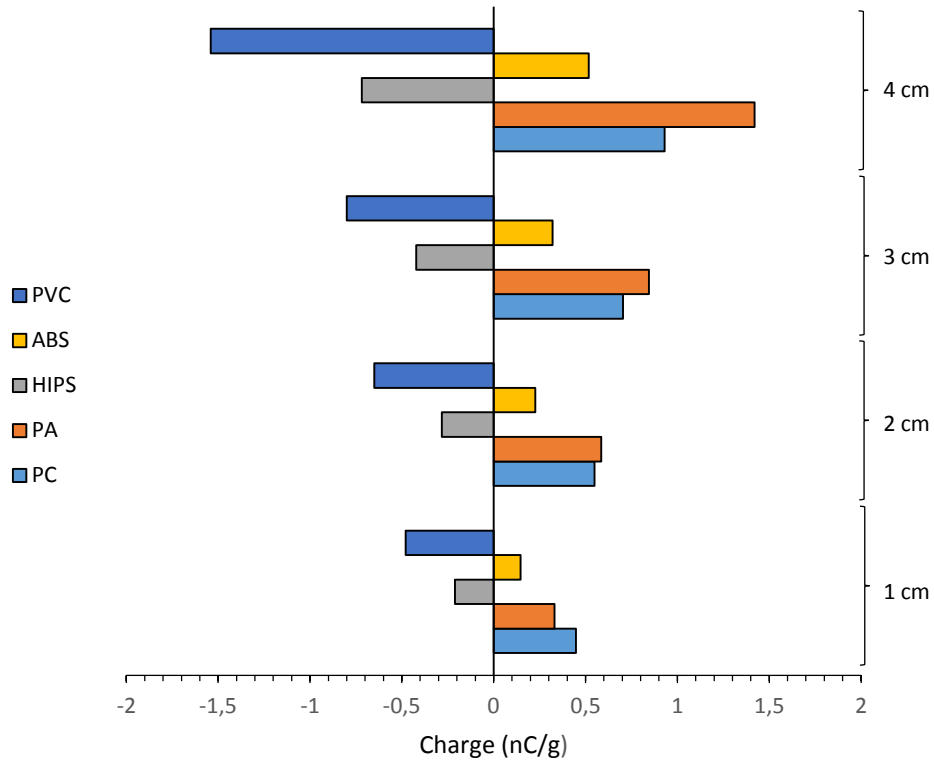
Par exemple, le temps de décroissance avec $v_a = 1$ m/s décroît plus vite par rapport aux autres faibles vitesses d'air. Toutefois, à de très faibles vitesses d'air ($v_a = 0.1$ m/s), le temps de décroissance est presque indépendant de la fréquence de décharge couronne tel que présenté dans la figure III-3.

III.1.4. Effet de la distance inter-électrodes « d »

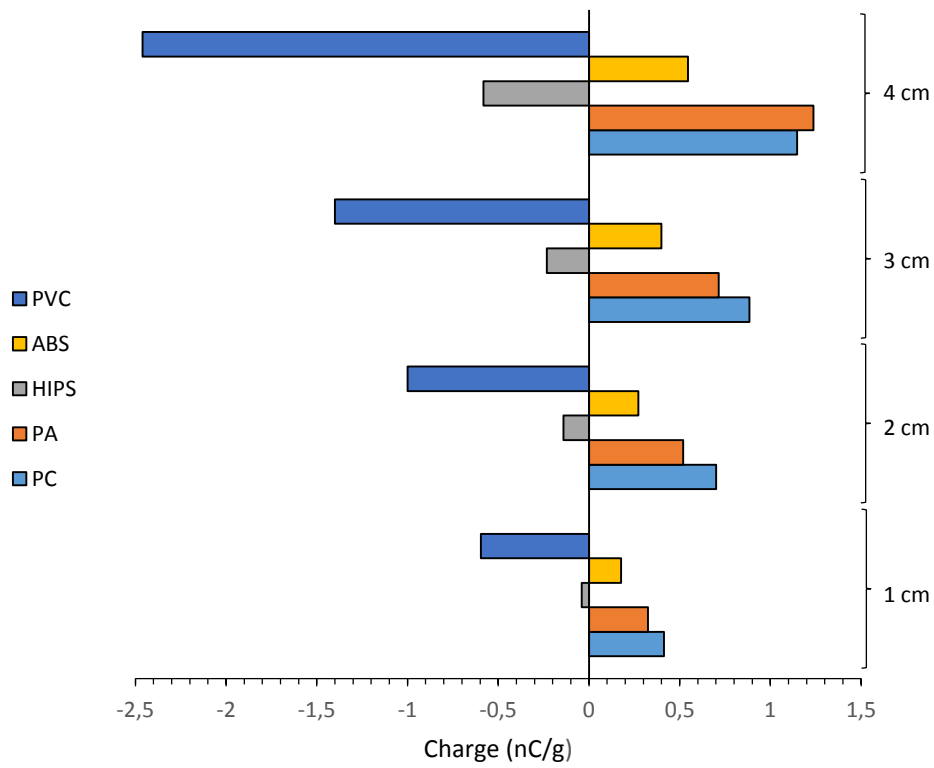
Les résultats expérimentaux obtenus à savoir la charge acquise sur les différents matériaux granulaires après la neutralisation en fonction de la distance entre le neutralisateur et la surface du convoyeur pour les deux vitesses d'air 0 et 2 m/s, sont montrés respectivement dans la figure III-4 (a) et (b).

Les autres paramètres de départ sont réglés comme suit :

- Tension alternative U appliquée à l'électrode couronne à 5 kV.
- Angle d'inclinaison α de l'électrode de neutralisation par rapport à la verticale à 0° ,
- Vitesse linéaire du convoyeur à 6 cm/s.



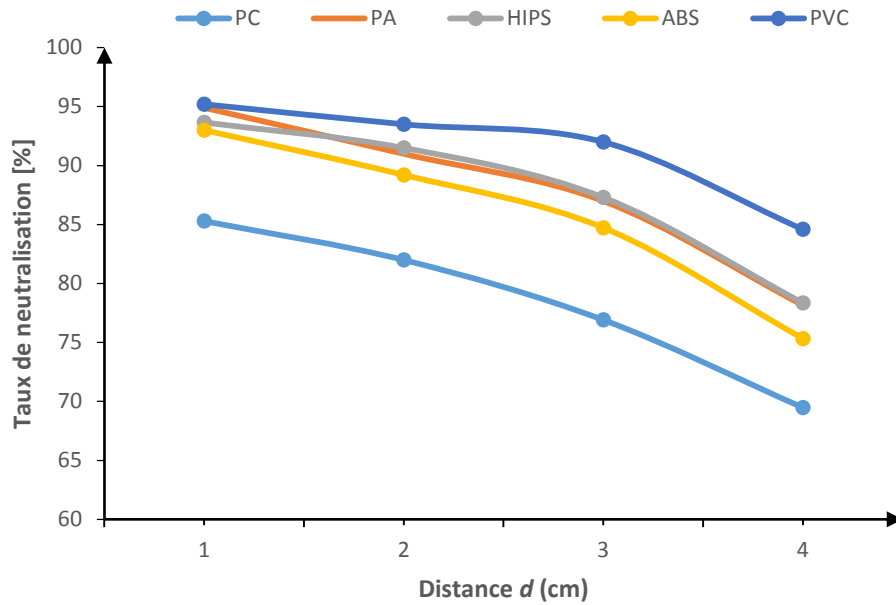
(a)



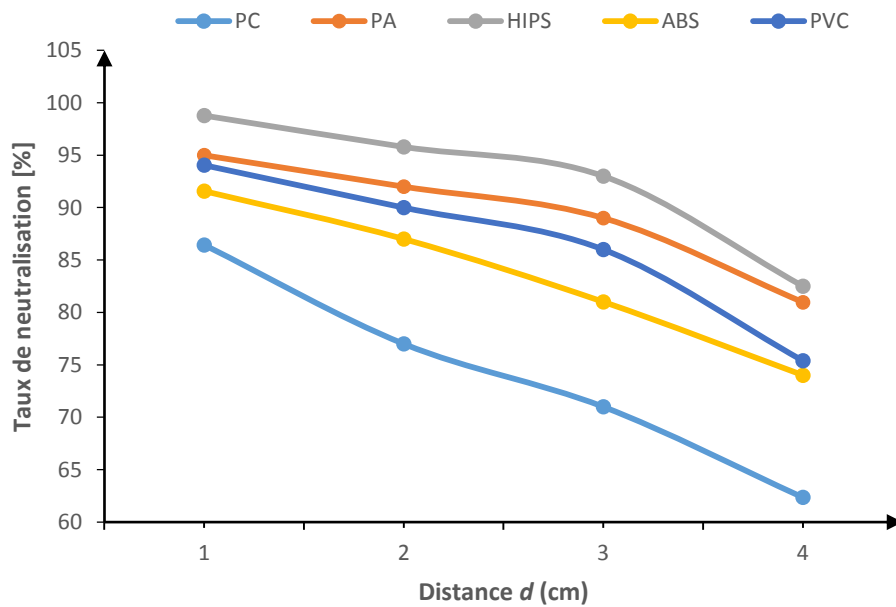
(b)

Figure III-4. Effet de la distance entre-électrodes sur la neutralisation pour différents matériaux granulaires purs ; (a) $v = 0 \text{ m/s}$, (b) $v = 2 \text{ m/s}$.

Ainsi l'histogramme du taux de neutralisation obtenu à partir des résultats de la charge présenté ci-dessus pour les différents matériaux granulaires est montré sur la figure III-5 (a) et (b).



(a)



(b)

Figure III-5. Taux de neutralisation en fonction de la distance entre-électrodes d pour différents matériaux pour (a) $v = 0$ m/s, (b) $v = 2$ m/s.

La distance d entre l'électrode de neutralisation et la surface extérieure du convoyeur a un effet remarquable sur l'efficacité de la neutralisation comme le montre la figure III-5 (a) et (b). Pour des distances faibles ($1 \text{ cm} \leq d \leq 2 \text{ cm}$) le taux de neutralisation est pratiquement élevé pour tous les matériaux utilisés, environ 85 % pour la vitesse de 0 m/s et 95 % pour la vitesse de 2 m/s. Cela peut s'expliquer par l'intensification du champ électrique produit à ces distances faibles, ce qui améliore l'efficacité de la neutralisation.

D'autre part, il est important de noter que la réduction de la distance d diminue la tension critique d'apparition des étincelles V_c , elles apparaissent plutôt principalement dans l'espace situé entre le neutralisateur et la bande métallique reliée à la terre qui transporte les particules chargées. L'augmentation excessive de l'intensité du champ électrique à des distances plus faible s'accompagne d'une décharge couronne sur la surface de l'échantillon, ce qui pourrait affecter l'efficacité de la neutralisation.

En effet, l'intensification locale du champ électrique à l'interface entre les particules et l'électrode mise à la masse peut s'accompagner de la génération d'ions dont la polarité est opposée à celle du courant neutralisant, ce qui réduit son efficacité. Ainsi, pour des faibles distances la douche du flux ionique généré par le neutralisateur couvre une surface réduite par rapport à des grandes distances, ce qui augmente le temps de processus de la neutralisation.

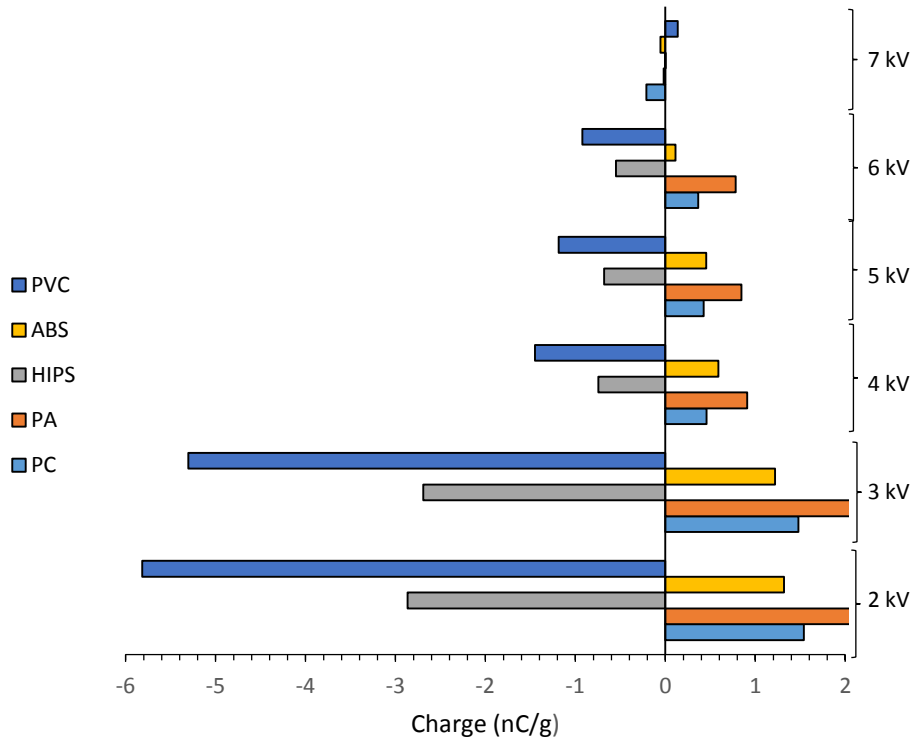
On en conclut que le choix de la distance entre-électrodes d est un facteur clé pour avoir une neutralisation efficace et homogène de la charge électrique disposée sur la surface des matériaux granulaires isolants [120].

III.1.5. Effet de l'amplitude de la tension « U »

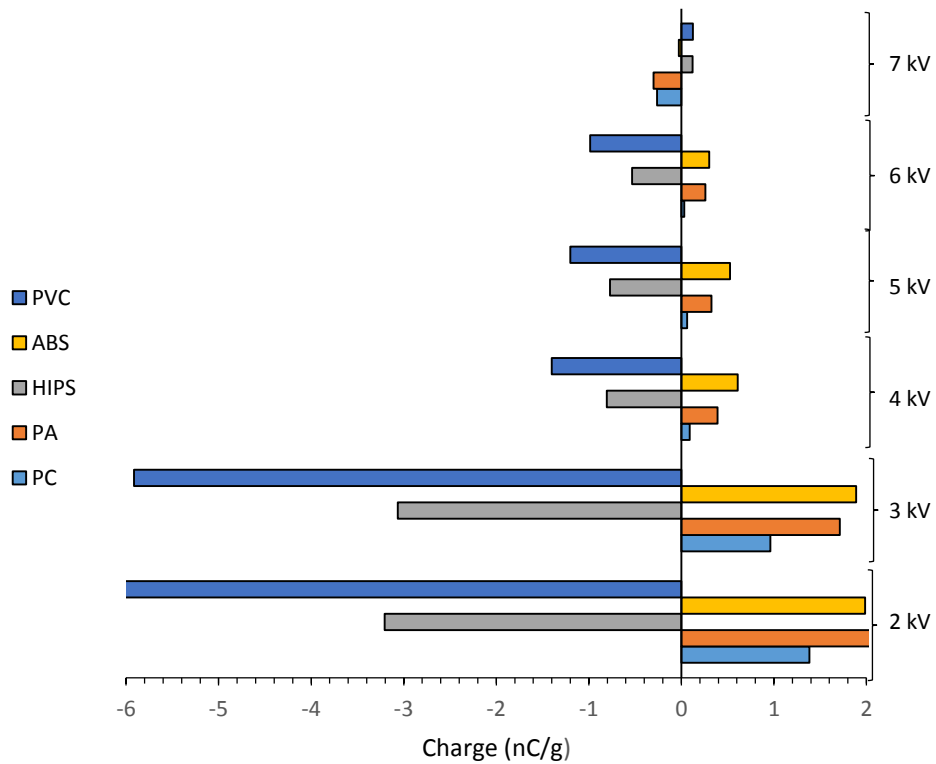
Les rapports de la charge massique enregistrée après neutralisation pour une amplitude de la haute tension U variable sont montrés respectivement sur la figure III-6 (a) et (b), le premier avec une vitesse du flux d'air de 0 m/s et le deuxième pour une vitesse de 2 m/s. Dans les conditions d'environnement de température et d'humidité relative stables : ($T = 12.9 \text{ °C}$ et $H = 58.9 \%$).

Les autres paramètres de départ sont réglés comme suit :

- Angle d'inclinaison α de l'électrode de neutralisation par rapport à la verticale à 0° ,
- Vitesse linéaire du convoyeur à 6 cm/s.
- Distance d entre l'électrode de neutralisation et la bande transporteuse à 2 cm,



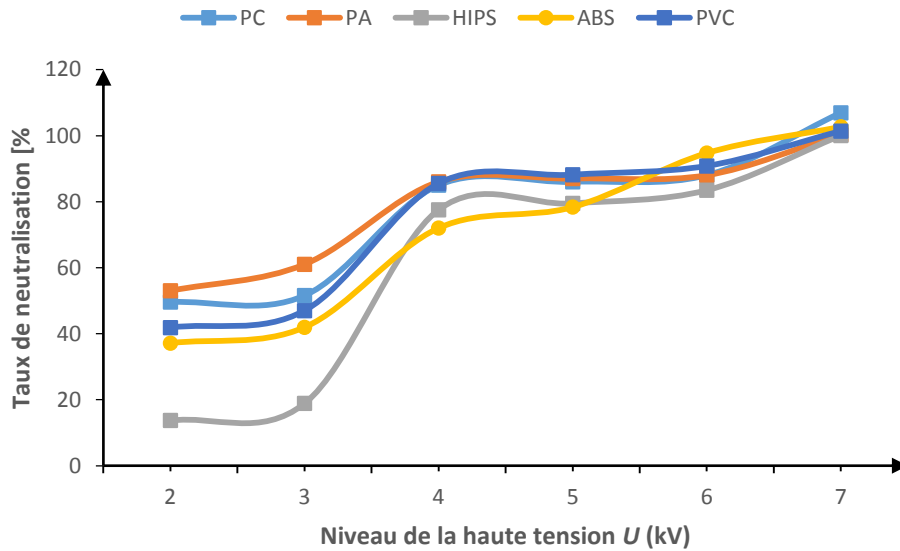
(a)



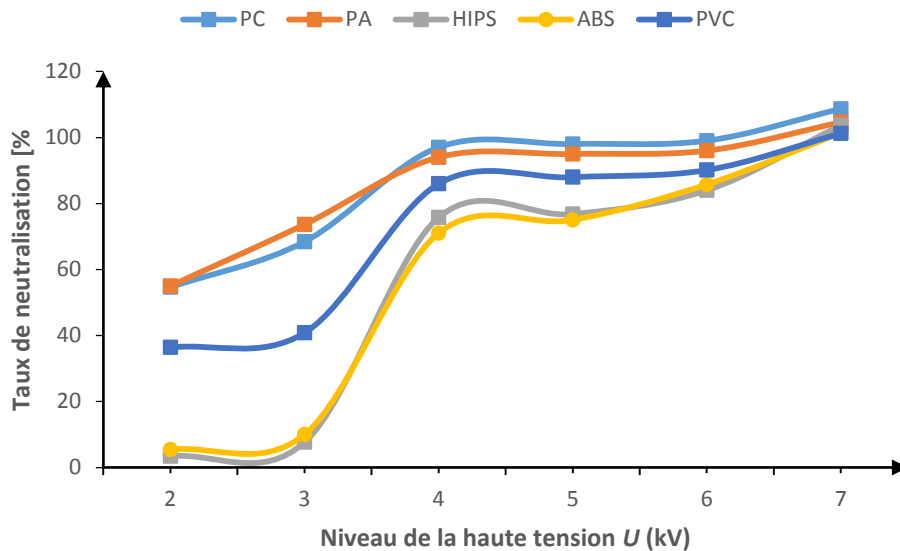
(b)

Figure III-6. Effet de la tension appliquée à l'électrode de neutralisation sur la neutralisation de différents matériaux granulaires pour : (a) $v = 0$ m/s, (b) $v = 2$ m/s.

Les courbes du taux de neutralisation des matériaux granulaires chargés calculé à partir des résultats de la charge électrique présenté ci-dessus pour différents matériaux granulaires sont montrées sur la figure III-7 (a) et (b).



(a)



(b)

Figure III-7. Taux de neutralisation en fonction de de la tension appliqué à l'électrode de neutralisation U de différents matériaux pour (a) $v = 0$ m/s, (b) $v = 2$ m/s.

La figure III-7 (a) et (b) montre l'évolution du taux de neutralisation en fonction de la haute tension sinusoïdale appliquée à l'électrode de neutralisation pour deux vitesses d'air $V = 0$ et 2 m/s. On remarque que pour des basses tensions ($2 \text{ kV} \leq U \leq 4 \text{ kV}$), la neutralisation est pratiquement faible pour tous les matériaux. Cela est dû au nombre réduit d'ions produits et aussi de la faible intensité de champ électrique généré.

Le taux de neutralisation est d'environ 40% à 3 kV pour $v = 0$ m/s ; et 50 % à 3 kV pour $v = 2$ m/s. Cependant, le taux de neutralisation croît avec l'augmentation de la haute tension appliquée à l'électrode de neutralisation. Pour des tensions entre $U = 5$ kV jusqu'à 6 kV et pour $v = 0$ et 2 m/s, les charges sont efficacement éliminées et les matériaux deviennent complètement neutralisés. Cela peut s'expliquer facilement par l'intensité du champ électrique générée pour des tensions élevées, ce qui induit à une augmentation de la quantité des charges positive que négative créées.

Toutefois, pour des niveaux de hautes tensions supérieures à 6 kV et pour les deux vitesses du flux d'air $v = 0$ et 2 m/s, le taux de neutralisation dépasse les 100 %, cela est due par la longue durée du demi-cycle des deux alternances positif et négatif, la surface de l'échantillon pendant la neutralisation est alternativement chargée positivement et négativement suivant l'alternance de la tension. Les ions générés par le neutralisateur ont non seulement le temps de neutraliser la charge existante mais aussi de charger l'échantillon avec une polarité opposée. Puisque l'échantillon est en mouvement, la charge déposée lors de la première alternance de la décharge corona n'est pas neutralisée lors de la deuxième alternance de la polarité opposée.

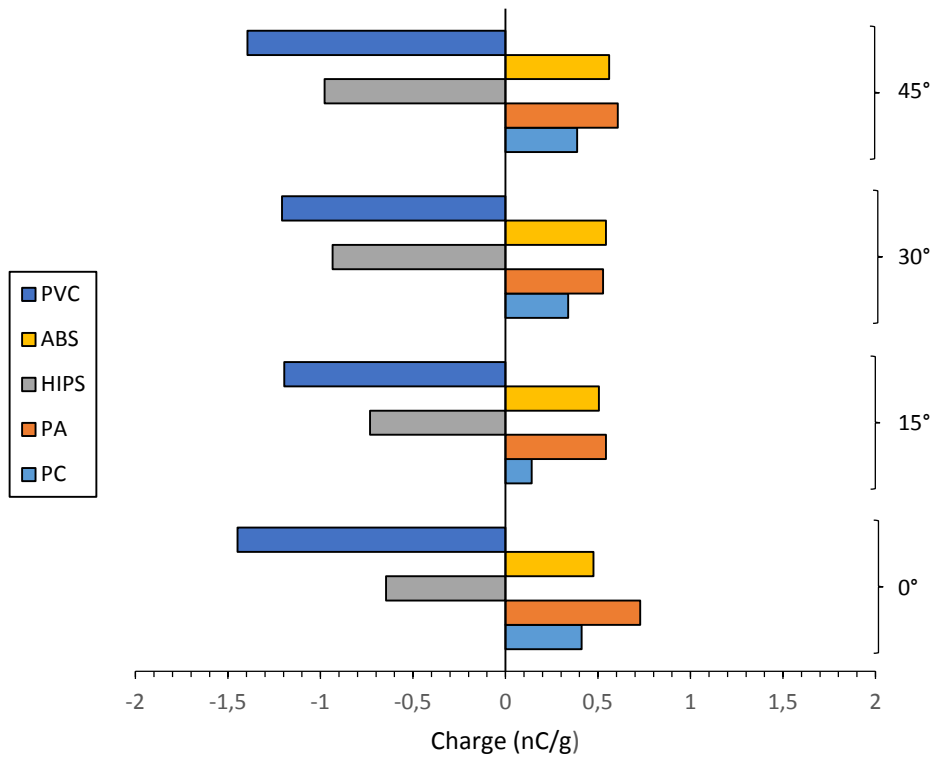
L'intervalle de la haute tension pour une neutralisation efficace des matériaux granulaires chargés devrait donc être limité entre 4 à 6 kV. Le taux de neutralisation est d'environ 82%, à cet intervalle de tension pour $v = 0$ m/s ; et 97 % pour $v = 2$ m/s.

III.1.6. Effet de l'angle d'inclinaison « α »

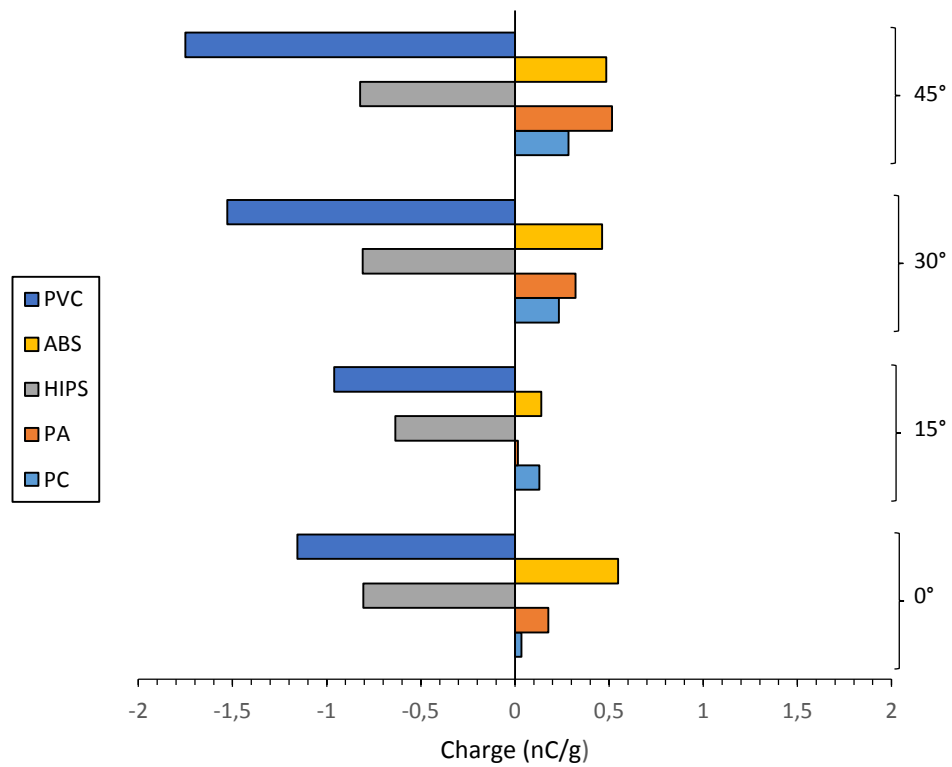
Les rapports de la charge massique enregistrée avant et après neutralisation pour un angle d'inclinaison α variable sont montrés respectivement sur la figure III-8 (a) et (b), le premier avec une vitesse du flux d'air 0 m/s et le deuxième pour 2 m/s. Dans des conditions d'environnement de température et d'humidité relative stables : ($T = 12.9$ °C et $H = 58.9$ %).

Les autres paramètres de départ sont réglés comme suit :

- Tension alternative U appliquée à l'électrode couronne à 5 kV.
- Angle d'inclinaison α de l'électrode de neutralisation par rapport à la verticale à 0°.
- Vitesse linéaire du convoyeur à 6 cm/s.



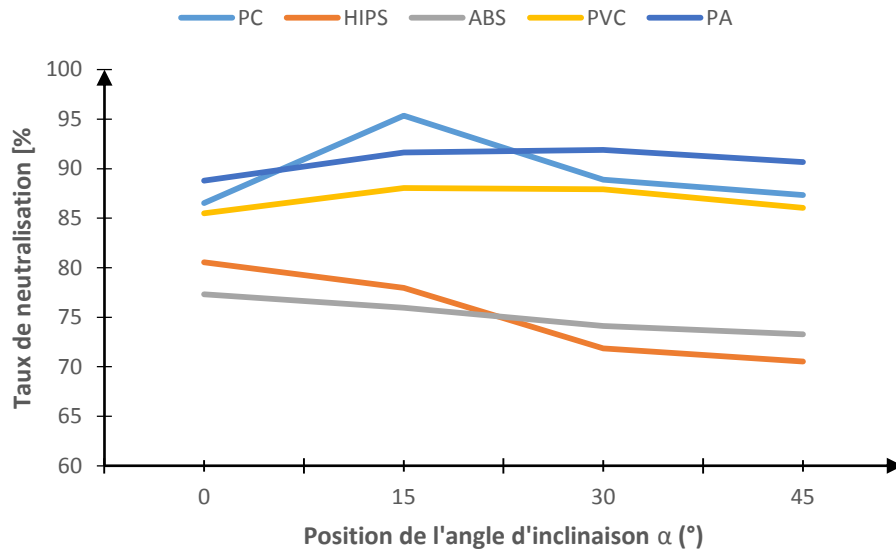
(a)



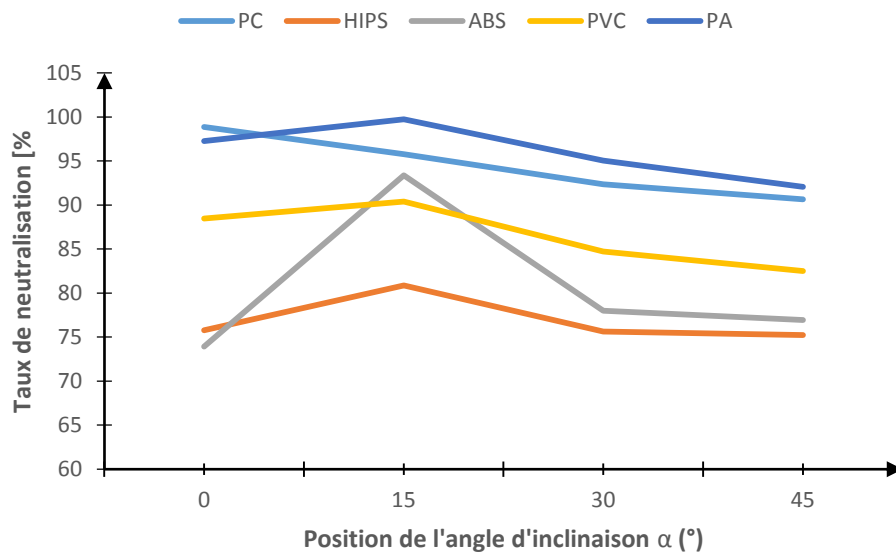
(b)

Figure III-8. Effet de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale sur la neutralisation de différents matériaux granulaires pour ; (a) $v = 0 \text{ m/s}$, (b) $v = 2 \text{ m/s}$.

La figure III-9 (a) et (b) présente les courbes du taux de neutralisation des différents matériaux granulaires en fonction de l'angle d'inclinaison pour $v = 0$ m/s et $v = 2$ m/s respectivement.



(a)



(b)

Figure III-9. Taux de neutralisation en fonction de de l'angle d'inclinaison par rapport à la verticale α de différents matériaux pour (a) $v = 0$ m/s, (b) $v = 2$ m/s.

Concernant l'effet de l'angle d'inclinaison du neutralisateur, les résultats obtenus montrent que plus l'angle du neutralisateur par rapport à la verticale est petit, plus la neutralisation est efficace.

Pour des angles supérieure à 30° , le taux de neutralisation est faible pour les deux cas $v = 0$ et 2 m/s, environ 85 % pour $v = 0$ m/s et 95 % pour $v = 2$ m/s. cela peut

s'expliquer par le fait que le flux ionique n'agit que sur une surface de l'échantillon à neutraliser. D'autre part, plus l'angle d'inclinaison est grand plus la distance entre l'électrode et la surface de l'échantillon est grande, ce qui réduit l'intensité du champ électrique produit.

Par conséquent, les charges électriques éliminées sont réduites, ce qui diminue de manière remarquable le taux de neutralisation.

En effet, pour des angles d'inclinaison supérieurs à 30°, l'influence de la vitesse d'air a un effet réduit sur les particules. Par contre, lorsque l'angle de l'éliminateur est inférieur à 30°, le flux d'air provoque un déplacement important des ions bipolaires et une décharge efficace.

Lorsque l'angle est 45°, la décharge est inefficace car le mouvement des ions bipolaires créés est moindre et la surface de l'échantillon n'est pas bien neutralisée.

De plus, pour des vitesses de flux d'air élevées et des angles d'inclinaison faibles, le nombre des ions éjectés et le chemin d'ions est plus important. Les résultats similaires pour tous les matériaux granulaires étudiés montrent que la neutralisation des particules ne semble pas dépendre de la nature des particules.

Enfin, il devrait être intéressant de travailler avec des vitesses d'air afin d'augmenter l'efficacité du processus de la neutralisation des particules.

III.2. MODELISATION EXPERIMENTALE

III.2.1. Méthodologie expérimentale

Le but de l'étude expérimentale décrite dans les paragraphes suivants est de modéliser et d'optimiser le processus de la neutralisation en tenant compte de tous les facteurs présents à savoir :

- La tension AC U [kV] appliquée à l'électrode de neutralisation,
- La distance d [cm] entre l'électrode de neutralisation et le tapis roulant,
- L'angle d'inclinaison α [°] de l'électrode de neutralisation par rapport à la verticale,
- Vitesse d'écoulement de l'air v [m/s].

Plusieurs séries d'expériences ont été réalisées en premier lieu pour identifier le domaine de variation des quatre facteurs mentionnés plus haut. Les quatre facteurs ont un effet significatif sur la neutralisation. Leurs domaines d'études respectifs ont été établis de façon à ce qu'il n'y ait pas d'apparition d'arcs électriques (Tableau III-2).

Ces expériences ont toutes été réalisées sur la même machine, par les mêmes opérateurs, en utilisant les mêmes échantillons et dans les mêmes conditions climatiques d'humidité (entre 50 % et 60 %) et de température (entre 17° et 21°), afin d'éliminer toute cause de variabilité du processus de neutralisation, en respectant la même méthode de travail décrite dans les expériences précédentes.

La vitesse du convoyeur a été ajustée à 6 cm/s, ce qui a fixé le temps de séjour des particules dans la zone de neutralisation à environ 1 s.

Tableau III-2. Domaines d'étude des variables du processus de neutralisation.

	Minimum	Maximum
Tension U (kV)	2	4
Flux d'air v (m/s)	0	2
Angle α (°)	0	45
Distance d (cm)	1	4

L'utilisation de la méthode des plans d'expérience a permis de mesurer l'influence de ces quatre facteurs et de déterminer leurs valeurs optimales, tout en réduisant le nombre d'essais au strict nécessaire. Un modèle expérimental composite, consistant en 27 expériences [116], a ensuite été réalisé pour modéliser le processus de neutralisation et identifier les conditions optimales de fonctionnement de ce dispositif.

Le logiciel commercial MODDE 5.0 de la société UMETRICS [118], a été utilisé pour calculer les modèles du taux de neutralisation pour chacun des cinq matériaux granulaires étudiés. Le même logiciel calcule deux indices statistiques : le «bien de l'ajustement» R^2 et le «bien de prédiction» Q^2 de chaque modèle, un bon modèle est celui qui a les deux indices proches de l'unité.

III.2.2. Résultats et interprétations

Le plan d'expérience composite réalisé comporte 4 expériences au centre, 8 expériences sur les axes du domaine en plus des 15 expériences du plan factoriel complet, ce qui donne un total de 27 expériences. Chaque expérience est répétée trois fois où les valeurs moyennes des taux de neutralisation en (%) issues sont regroupées dans le tableau III-3 pour chaque produit.

Tableau III-3. Résultats du plan d'expérience composite.

Tension (kV)	Débit d'air (m/s)	Angle (°)	Distance (cm)	PC	HIPS	ABS	PVC	PA
4	0	0	1	86.17	67.25	73.33	81.71	78.92
6	0	0	1	89.31	75.22	70.27	86.86	80.86
4	2	0	1	94.72	87.73	99.18	94.26	97.55
6	2	0	1	92.86	93.55	97.99	94.62	95.93
4	0	30	1	87.76	66.25	71.15	86.84	88.27
6	0	30	1	92.68	76.67	74.23	89.57	89
4	2	30	1	98.49	80.47	93.45	95.9	96.55
6	2	30	1	99.3	82.14	91.78	95.79	97.33
4	0	0	3	90.11	60.53	54.44	81.82	84.62
6	0	0	3	95.38	72.56	66.67	88.15	89.42
4	2	0	3	94.05	84.73	79.39	88.11	97.63
6	2	0	3	95.72	88.93	80.23	91.75	96.83
4	0	30	3	88.59	63.26	59.43	79.92	84.77

6	0	30	3	95	80	74.74	87.89	90.2
4	2	30	3	95.47	76.94	68.89	84.12	89.04
6	2	30	3	99.12	87.76	81.41	90.44	93.16
4	1	15	2	95.46	74.1	85.28	86.3	91.37
6	1	15	2	97.24	87.22	87.15	91.79	92.38
5	0	15	2	88.76	69.67	64.68	84.59	86.57
5	2	15	2	95.03	89.55	88.12	90.71	97.65
5	1	0	2	96.11	84.8	79.29	94.82	91.41
5	1	30	2	98.71	78.4	82.73	95.71	93.9
5	1	15	1	90.11	85.28	80.83	86.71	90.83
5	1	15	3	91.57	80.89	72.46	84.47	88.44
5	1	15	2	94	84.21	76.96	89.55	91.22
5	1	15	2	95.23	84.5	81.55	88.57	91.73
5	1	15	2	94.84	84.17	83.91	90	92.82

III.2.2.1. Evaluation de la signification des facteurs

Dans cette partie, nous allons essayer d'établir une relation entre les grandeurs d'entrée (niveau de la haute tension U , la distance d , l'angle d'inclinaison α et la vitesse du flux d'air v) et la grandeur de sortie (le taux de neutralisation N des différents matériaux). Pour cela on a procédé à l'estimation des erreurs et des effets significatifs sur les cinq réponses obtenues après neutralisation.

Un effet sera significatif avec un risque de 5% avec $v = n - p = 27 - 15 = 12$ $t_{crit}(0.05 ; 12) = 2.179$ (voir l'annexe A), si son test statistique « t_i » est supérieur à 2.179.

Nous obtenons le tableau III.4 pour le premier matériau étudié PC,

Tableau III-4. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du PC.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PC	Constante	94.49		
	U	1.43	15.38	Significatif
	v	2.83	30.41	Significatif
	α	1.14	12.33	Significatif
	d	0.75	8.11	Significatif
	$U*U$	1.95	20.98	Significatif
	$v*v$	-2.5	26.83	Significatif
	$\alpha * \alpha$	3.01	32.36	Significatif
	$d*d$	-3.55	38.16	Significatif
	$U*v$	-0.96	10.37	Significatif

	$U * \alpha$	0.47	5.07	Significatif
	$U * d$	0.62	6.70	Significatif
	$v * \alpha$	0.74	8.03	Significatif
	$v * d$	-0.88	9.50	Significatif
	$\alpha * d$	-0.76	8.21	Significatif

Les résultats présentés dans le tableau III-4 montrent clairement que tous les facteurs étudiés ont un effet significatif sur le processus de la neutralisation. D'un autre côté, on remarque que la vitesse d'écoulement d'air est le facteur le plus important et le plus influent sur la neutralisation des particules isolantes chargées.

L'analyse de la variance consiste à comparer à l'aide d'un test, appelé test de *Fisher*, la somme des carrés des écarts due uniquement à la régression, avec la somme des carrés des résidus, on obtient le tableau III-5 d'analyse de variance.

Tableau III-5. Analyse de la variance pour la neutralisation du PC.

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
pureté de PVC	Liaison	339.49	14	24.25	103.49
	Résidus	2.81	12	0.23	
	Totale	342.30	26	13.16	

La table de *Fisher-Snédecor* (voir l'annexe B) donne pour $v_1=14$ et $v_2=12$, $F(\text{crit})=2.63$, pour un risque de 5%.

On a dans les cinq réponses : $F_{\text{obs}} > (F_{\text{crit}} = 2.63)$, donc on accepte l'hypothèse H_1 de linéarité du modèle.

En effectuant le même calcul pour les autres réponses (taux de neutralisation de PVC, HIPS, PA et ABS), on trouve les tableaux suivant.

Tableau III-6. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation du HIPS.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de HIPS	Constante	83.17		
	U	4.59	11.32	Significatif
	v	7.79	19.20	Significatif
	α	-1.30	3.20	Significatif
	d	-1.05	2.59	Significatif

	$U*U$	-1.95	4.80	Significatif
	$v*v$	-3.00	7.39	Significatif
	$\alpha * \alpha$	-1.01	2.49	Significatif
	$d*d$	0.47	1.16	Non significatif
	$U*v$	-1.54	3.79	Significatif
	$U* \alpha$	0.60	1.48	Non significatif
	$U*d$	1.11	2.75	Significatif
	$v* \alpha$	-2.39	5.88	Significatif
	$v*d$	0.21	0.54	Non significatif
	$\alpha *d$	1.21	2.98	Significatif

Tableau III-7. Analyse de la variance pour la neutralisation du HIPS.

Réponses	Variation due à	Somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Neutralisation du HIPS	Liaison	1854.63	14	132.47	29.74
	Résidus	53.45	12	4.45	
	Totale	1908.08	26	73.38	

Tableau III-8. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation de l'ABS.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de ABS	Constante	80.91		
	U	2.21	4.19	Significatif
	v	9.52	17.99	Significatif
	α	-0.16	0.31	Non significatif
	d	-6.36	12.02	Significatif
	$U*U$	5.24	9.90	Significatif
	$v*v$	-4.57	8.63	Significatif
	$\alpha * \alpha$	0.03	0.06	Non significatif
	$d*d$	-4.32	8.17	Significatif
	$U*v$	-1.06	2.01	Non significatif
	$U* \alpha$	1.27	2.41	Significatif

	$U*d$	2.73	5.16	Significatif
	$v* \alpha$	-2.25	4.26	Significatif
	$v*d$	-2.42	4.57	Significatif
	$\alpha *d$	0.86	1.64	Non significatif

Tableau III-9. Analyse de la variance pour la neutralisation du HIPS.

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F(obs)
Neutralisation de ABS	Liaison	2990.22	14	213.58	28.22
	Résidus	90.81	12	7.56	
	Totale	3081.03	26	118.50	

Tableau III-10. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation de l'ABS.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PVC	Constante	89.53		
	U	2.10	12.82	Significatif
	v	3.24	19.76	Significatif
	α	0.22	1.38	Non significatif
	d	-1.97	12.05	Significatif
	$U*U$	-0.57	3.48	Significatif
	$v*v$	-1.96	11.98	Significatif
	$\alpha * \alpha$	5.64	34.43	Significatif
	$d*d$	-4.02	24.54	Significatif
	$U*v$	-0.74	4.56	Significatif
	$U* \alpha$	0.08	0.54	Non significatif
	$U*d$	1.00	6.14	Significatif
	$v* \alpha$	-0.51	3.11	Significatif
	$v*d$	-1.18	7.21	Significatif
$\alpha *d$	-1.13	6.89	Significatif	

Tableau III-11. Analyse de la variance pour la neutralisation du HIPS.

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Neutralisation de PVC	Liaison	520.59	14	37.18	51.17
	Résidus	8.72	12	0.72	
	Totale	529.31	26	20.35	

Tableau III-12. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation de l'ABS.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation de PA	Constante	91.89		
	U	0.91	4.47	Significatif
	v	4.94	24.30	Significatif
	α	0.50	2.47	Significatif
	d	-0.06	0.30	Non significatif
	$U*U$	-0.01	0.05	Non significatif
	$v*v$	0.22	1.09	Non significatif
	$\alpha * \alpha$	0.76	3.77	Significatif
	$d*d$	-2.25	11.06	Significatif
	$U*v$	-0.65	3.20	Significatif
	$U* \alpha$	0.42	2.07	Non significatif
	$U*d$	0.73	3.59	Significatif
	$v* \alpha$	-1.89	9.30	Significatif
	$v*d$	-1.41	6.95	Significatif
$\alpha *d$	-1.82	8.97	Significatif	

Tableau III-13. Analyse de la variance pour la neutralisation du HIPS.

Réponses	Variation due à	somme des Carrés	DLL	Carré Moyen	F(obs)
Neutralisation de PA	Liaison	638.83	14	45.63	40.18
	Résidus	13.14	12	1.11	
	Totale	652.25	26	25.08	

On élimine les effets non significatifs, on obtient ainsi, les modèles mathématiques suivants :

- $N_{PC} = 94.49 + 1.43U + 2.83v + 1.14\alpha + 0.75d + 1.95U*U - 2.5v*v + 3.01\alpha*\alpha - 3.55d*d - 0.96U*v + 0.47v*\alpha + 0.62U*d + 0.74v*\alpha - 0.88v*d - 0.76\alpha*d$

Avec : $R^2 = 99.18 \%$ et $Q^2 = 97.09 \%$.

- $N_{HIPS} = 83.17 + 4.59U + 7.79v - 1.30\alpha - 1.05d - 1.95U*U - 3v*v - 1.01\alpha*\alpha - 1.54U*v + 0.6U*\alpha + 1.11U*d - 2.39v*\alpha + 1.21\alpha*d$

Avec : $R^2 = 97.20 \%$ et $Q^2 = 93.87 \%$.

- $N_{ABS} = 80.91 + 2.21U + 9.52v - 6.36d + 5.24U*U - 4.57v*v - 4.32d*d + 1.27U*\alpha + 2.73U*d - 2.25v*\alpha - 2.42v*d$

Avec : $R^2 = 97.05 \%$ et $Q^2 = 90.34 \%$.

- $N_{PVC} = 89.53 + 2.1U + 3.24v - 1.97d - 0.57U*U - 1.96v*v + 5.64\alpha*\alpha - 4.02d*d - 0.74U*v + 1U*d - 0.51v*\alpha - 1.18v*d - 1.13\alpha*d$

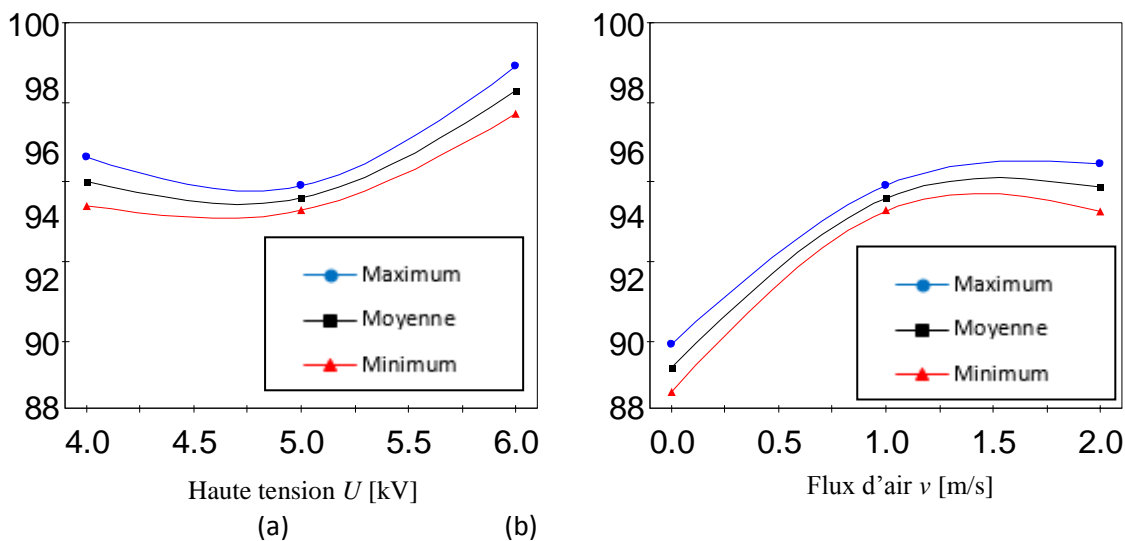
Avec : $R^2 = 98.35 \%$ et $Q^2 = 96.02 \%$.

- $N_{PA} = 91.89 + 0.91U + 4.94v + 0.5\alpha + 0.76\alpha*\alpha - 2.25d*d - 0.65U*v + 0.73U*d - 1.89v*\alpha - 1.41v*d - 1.82\alpha*d$

Avec : $R^2 = 97.84 \%$ et $Q^2 = 95.35 \%$.

III.2.2.2. Optimisation du processus de la neutralisation

Les modèles quadratiques déduits de ces expériences ont permis la prédiction des taux de neutralisation de la charge électrique sur les différentes particules étudiées dans diverses conditions de fonctionnement (Fig. III-10 à III-15).



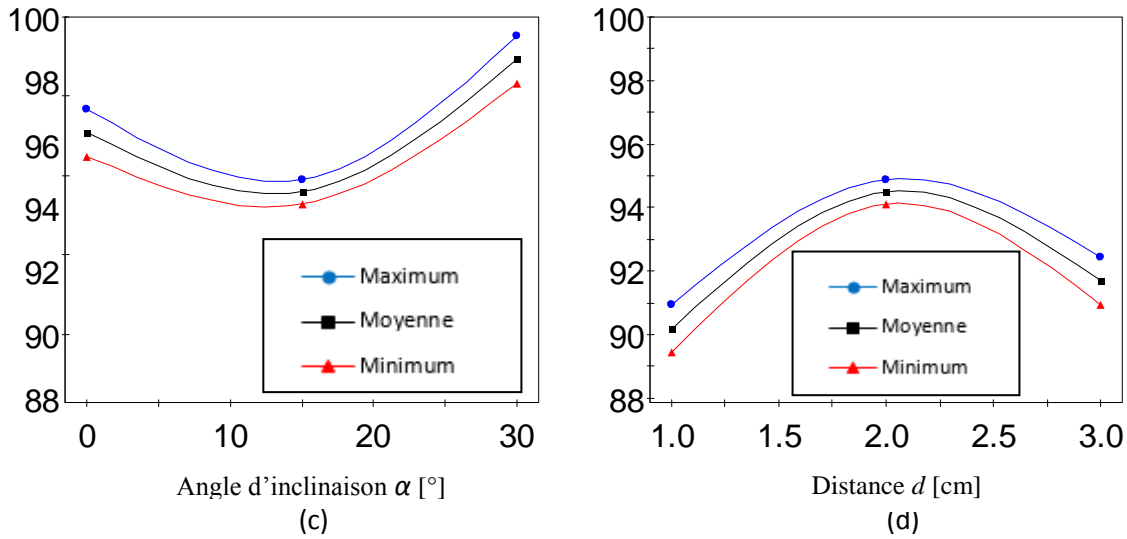


Figure III-10. Variation prédite du taux de neutralisation de PC, en fonction de : (a) la haute tension appliquée U [kV], avec $\alpha = 0^\circ$, $d = 2.2\text{cm}$, $v = 1.5\text{ m/s}$, (b) vitesse du flux d'air v [m/s], avec $\alpha = 0^\circ$, $d = 2.2\text{cm}$, $U = 6\text{ kV}$; (c) l'angle d'inclinaison α [°], avec $d = 2.2\text{cm}$, $v = 1.5\text{ m/s}$, $U = 6\text{ kV}$; (d) distance entre-électrode d [cm], avec $\alpha = 0^\circ$, $v = 1.5\text{ m/s}$, $U = 6\text{kV}$.

De manière assez surprenante, les effets de ces facteurs semblent être similaires sur les cinq sortes de matières plastiques étudiés.

C'est pourquoi seules les prédictions faites par MODDE 5.0 pour les granules PC sont présentés sur la figure III-11. La neutralisation est plus efficace aux petits angles α , car le champ électrique est plus intense et le flux d'air favorise le déplacement des ions générés dans la décharge corona. Sans surprise, le taux N atteint des valeurs proches de 100% pour des tensions plus élevées et des distances inter-électrodes plus courtes, ce qui correspond à des intensités de champ électrique plus élevées.

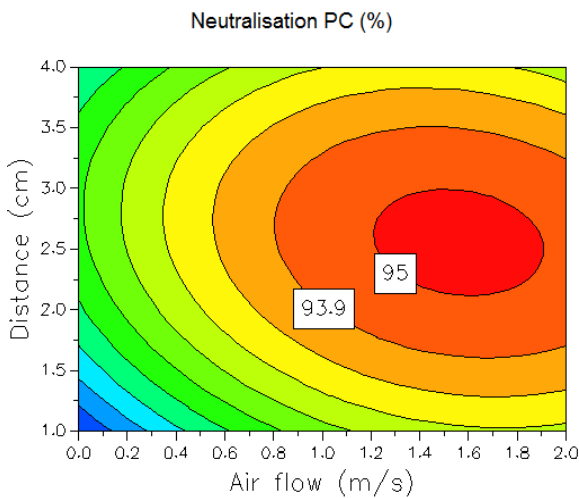


Figure III-11. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation prédit pour le produit PC en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air et de la distance inter-électrodes, avec $U = 5\text{ kV}$, $\alpha = 0^\circ$.

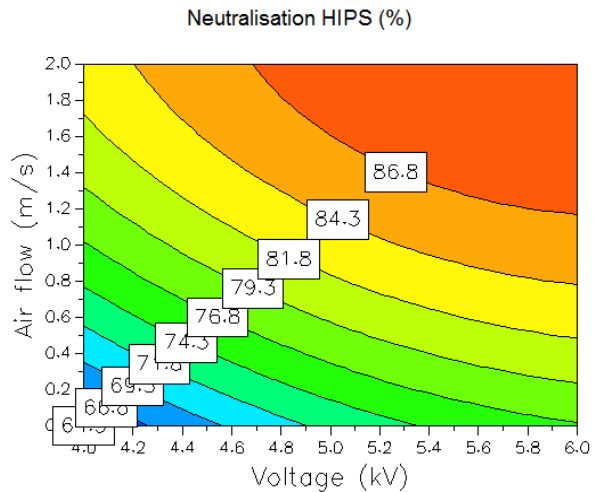


Figure III-12. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation prédit pour le produit HIPS en fonction de la haute tension appliquée et du flux d'air, avec $d = 2\text{ cm}$, $\alpha = 0^\circ$.

Dans tous les cas, le flux d'air intensifie l'effet neutralisant de la décharge couronne. Sur la figure III-12, les courbes supérieure et inférieure de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

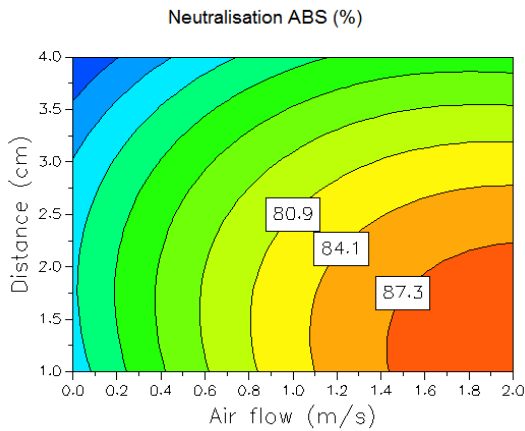


Figure III-13. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation prédit pour produit ABS en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air et de la distance inter-électrodes, avec $U = 5 \text{ kV}$, $\alpha = 0^\circ$.

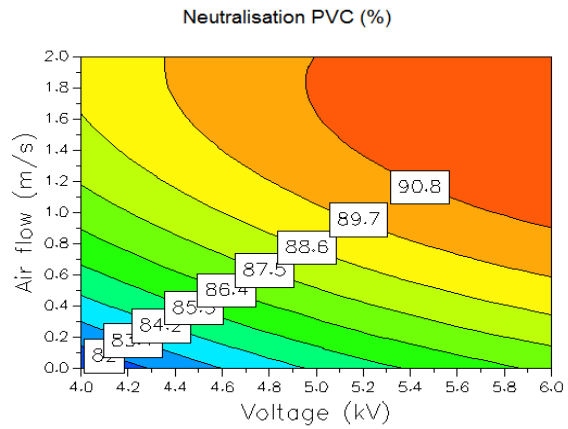


Figure III-14. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation prédit pour produit PVC en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air et de la haute tension appliquée, avec $d = 2 \text{ cm}$, $\alpha = 0^\circ$.

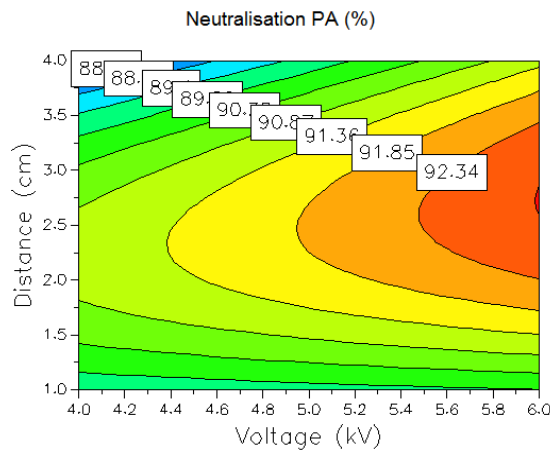


Figure III-15. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation prédit pour produit PA en fonction de la haute tension appliquée et de la distance inter-électrodes, avec $v = 1 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$.

La similarité du comportement de ces cinq matériaux peut être expliquée par les valeurs élevées des coefficients de corrélation (Tableau III-14) calculées pour les cinq séries de valeurs du taux de neutralisation des cinq matériaux présentés sur le tableau III-3.

Tableau III-14. Coefficients de corrélation entre les cinq séries de taux de neutralisation des charges du tableau III-2.

PC/HIPS	HIPS/ABS	ABS/PVC	PVC/PA	PA/PC	PC/ABS	PC/PVC	HIPS/PA	HIPS/PVC
0.60	0.79	0.81	0.77	0.75	0.58	0.75	0.76	0.71

Ces coefficients de corrélation indiquent que la nature des matériaux et les niveaux de la charge acquise n'ont aucune influence sur l'efficacité de la neutralisation. Et les

similitudes des propriétés électriques des différents matériaux montrés dans le tableau III-15 renforcent cette explication.

Tableau III-15. Propriétés électriques des matériaux.

Type des matériaux	ABS	PVC	HIPS	PC	PA
constant diélectrique	2.7 - 3.2	3.0 - 5.0	2.4 - 4.8	2.8 - 3.4	2.5 - 2.6
résistance diélectrique (kV/mm)	15 - 34	10-30	12-24	20	24 - 55
résistance à l'arc (sec)	60 - 120	60 - 80	20 - 100	0 - 120	70 - 130

Le logiciel MODDE 5.0 a permis le calcul d'un optimum global (Fig. III-16) :

- ✓ Haute tension appliquée $U = 6$ kV,
- ✓ Vitesse d'écoulement d'air $v = 1.81$ m/s,
- ✓ Angle d'inclinaison $\alpha = 0^\circ$,
- ✓ Distance inter-électrode $d = 1.91$ cm.

The screenshot shows the MODDE 5.0 software interface. The top part displays the software menu and toolbars. Below that, there are several panels: a factor table, a response table, and a main data table. The factor table lists Voltage, Air flow, Angle, and Distance. The response table lists PC, HIPS, ABS, PVC, and PA. The main data table shows the results of 11 iterations, with the optimal values highlighted in row 5.

Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit
1 Voltage	Free		4	6
2 Air flow	Free		0	2
3 Angle	Free		0	30
4 Distance	Free		1	3

Response	Criteria	Weight	Min	Target	Max
1 PC	Maximize	1	98.7048	99.99	
2 HIPS	Maximize	1	90.9103	99.99	
3 ABS	Maximize	1	99.4754	99.99	
4 PVC	Maximize	1	95.5049	99.99	
5 PA	Maximize	1	96.9734	99.99	

Iteration	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Voltage	Air flow	Angle	Distance	PC	HIPS	ABS	PVC	PA	iter	log(D)
1	6	1.91	27.1196	1.5452	100.623	85.5772	92.9915	95.7904	97.2361	143	1.5779
2	4.3271	2	0	1.244	94.6388	90.5004	97.0038	95.3777	98.1546	294	1.0296
3	6	1.8497	0.0001	2.0056	98.4264	90.6832	93.071	97.5288	98.0694	198	1.5659
4	5.9999	1.902	27.0548	1.5584	100.646	85.6195	92.9846	95.7658	97.1992	187	1.5788
5	6	1.8122	0.0072	1.9157	98.3855	90.6359	93.5049	97.577	97.6854	157	1.5114
6	4.0828	2	0	1.1872	95.195	89.5654	99.88	94.8415	98.1429	167	0.5309
7	4	1.9998	29.9999	1.0589	99.0366	78.7681	92.4907	95.581	97.5612	142	1.6435
8	6	1.8994	27.2503	1.5189	100.62	85.5247	93.0142	95.8623	97.2064	150	1.5752

Figure III-16. Résultat du MODDE-prédiction des valeurs optimales de taux de neutralisation [%] pour les produits étudiés.

Une expérience menée avec ces valeurs optimales des facteurs de contrôle a donné les résultats suivants : $N_{PC} = 98.88\%$, $N_{HIPS} = 90.63\%$, $N_{ABS} = 93.5\%$, $N_{PVC} = 97.57\%$ et $N_{PA} = 97.98\%$, qui sont très proches de la prédiction faite par MODDE 5.0.

Les expériences menées avec cinq polymères issus de déchets d'équipements électriques et électroniques ont permis de tirer les conclusions suivantes :

(1) Des taux de neutralisation supérieurs à 90% peuvent être obtenus en utilisant des électrodes ionisantes du commerce, alimentées par des alimentations haute tension AC standard, à 50 Hz, en ajustant de manière appropriée les divers facteurs de contrôle.

(2) L'injection d'air augmente significativement l'efficacité de la neutralisation. L'effet est plus fort pour les flux d'air perpendiculaires à la couche de granules.

(3) Les meilleurs effets de neutralisation sont obtenus pour des tensions plus élevées et des distances inter-électrodes plus courtes, qui fournissent des forces de champ électrique plus élevées dans la zone active du dispositif. L'effet de neutralisation ne dépend pas de manière significative de la nature des matériaux granulaires. Les conditions optimales déterminées pour un type de matériau peuvent être extrapolées aux autres, si les granules sont caractérisés par des formes et des tailles similaires, comme c'est le cas avec des échantillons qui ont fait l'objet de cette étude.

II.3. EFFET DE TYPES DE LA CHARGE SUR L'EFFICACITE DE LA NEUTRALISATION

Dans la première partie de ce travail, on a évalué l'efficacité de la neutralisation des matériaux granulaires isolants avec un neutralisateur de charge commercial, en fonction de la nature des matériaux traités, la distance entre le neutralisateur et la surface des échantillons, la position du neutralisateur par rapport à la verticale et la vitesse d'écoulement d'air.

Dans cette section, nous allons évaluer l'efficacité de la neutralisation de la charge électrique acquise sur la surface des matériaux granulaires isolant en fonction du mode de chargement des particules.

Dans la première série d'expériences, la surface de l'échantillon est chargée par une décharge couronne. Pour le second ensemble, l'échantillon est chargé par effet triboélectrique. La comparaison des résultats des deux expériences permet de déterminer l'influence de mode de la charge des particules sur l'efficacité de la neutralisation.

II.3.1. Protocole opératoire des expériences

Les expériences ont été réalisées sur des échantillons de PC, HIPS, PVC, PA et ABS. Dans l'air ambiant (température : 15 à 19 ° C, humidité relative : 45 à 55%).

Les échantillons ont été déposés sur le convoyeur de façon monocouche. La charge électrique des échantillons a été réalisée à l'aide d'un système d'électrode de type dual à fil (Fig. II-12) en face de la partie extérieure du convoyeur qui porte les échantillons. L'électrode de charge est alimentée à partir de l'alimentation haute tension continue de polarité négative ou positive réglable, 100 kV, 3 mA (modèle SL300 Spellman). Une fois les particules sont chargées, elles sont transférées vers le poste de mesure de la charge électrique Q_c .

Afin d'ajuster les paramètres de chargement des matériaux granulaires isolants, des expériences préliminaires ont été faits en variant la tension de 3 jusqu'à 9 kV avec

les deux polarités (positive et négative) afin de trouver les paramètres adéquats qui correspondent à des niveaux de la charge par le dispositif triboélectrique.

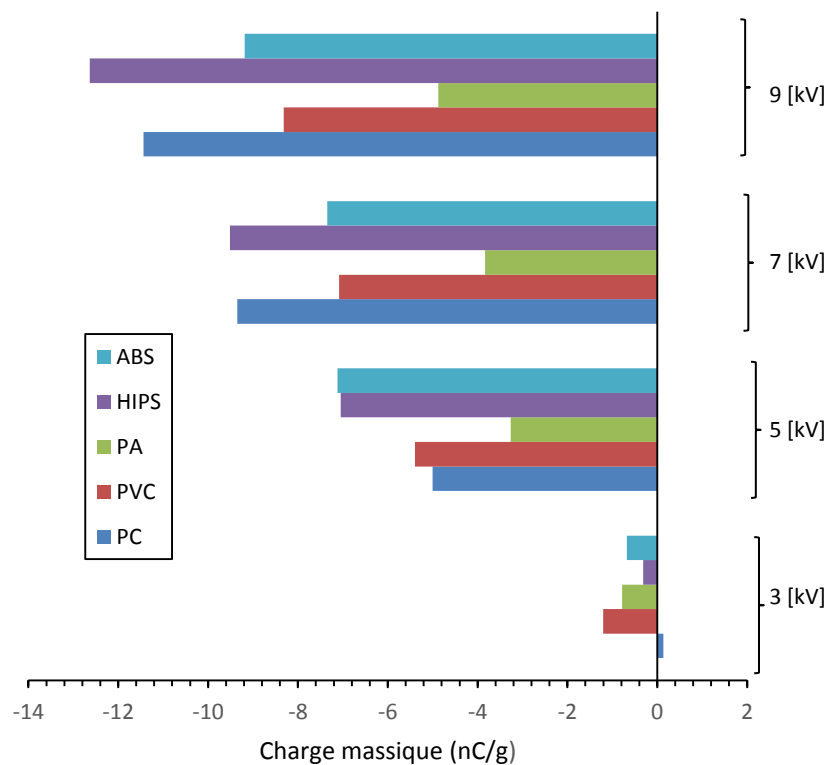
D'après les résultats montrés dans la figure III-17, et en comparant avec les résultats du chargement par effet triboélectrique, les expériences de neutralisation sont faites pour :

- Distance entre-électrode d_c de 3 cm.
- Tension appliquée à l'électrode de chargement U_c de ± 7 kV.

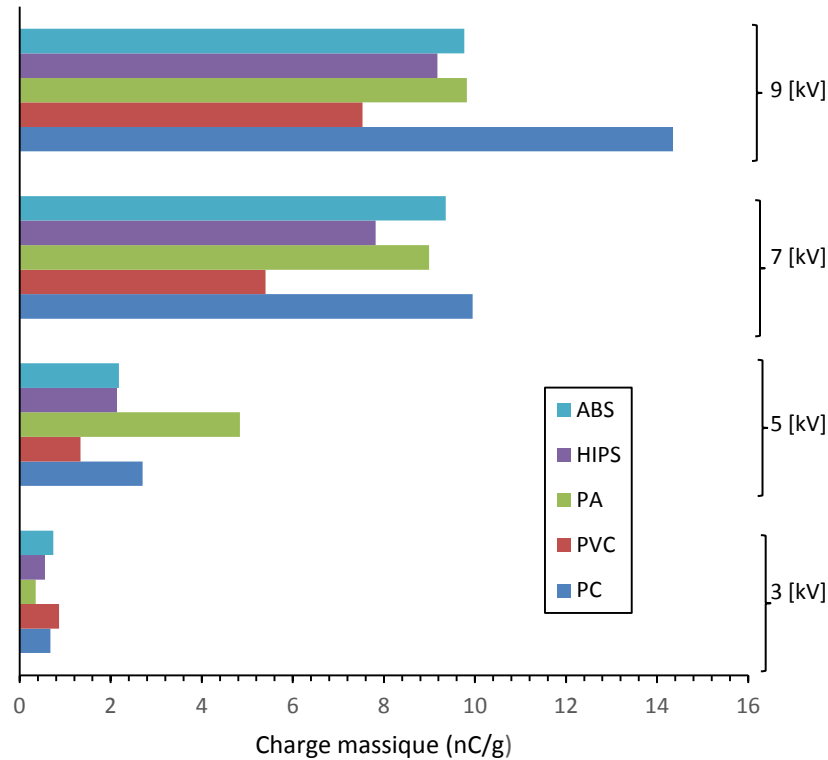
La neutralisation est effectuée, en utilisant le neutralisateur de charge commercial, connecté à un amplificateur haute tension 30 kV, 20 mA (modèle 30 / 20A, Trek Inc., Medina, NY).

Les paramètres de neutralisation sont ajustés selon les valeurs suivantes :

- ✓ Haute tension appliquée au neutralisateur $U_1 = 4$ kV et $U_2 = 6$ kV,
- ✓ Vitesse d'écoulement d'air $v = 0$ m/s,
- ✓ Angle d'inclinaison $\alpha = 0^\circ$,
- ✓ Distance inter-électrode $d = 3$ cm.



(a)



(b)

Figure III-17. Effet de la tension appliquée pour le chargement de différents matériaux granulaires avec : (a) polarité positive, (b) polarité négative.

La charge électrique après neutralisation est mesurée avec la méthode décrite précédemment. Dans les séries d'expériences, la durée de chargement est maintenue constante à $T_c = 10$ s, mais la neutralisation effectuée avec l'échantillon en mouvement à une vitesse constante (6 cm /s) à travers la zone de décharge couronne AC.

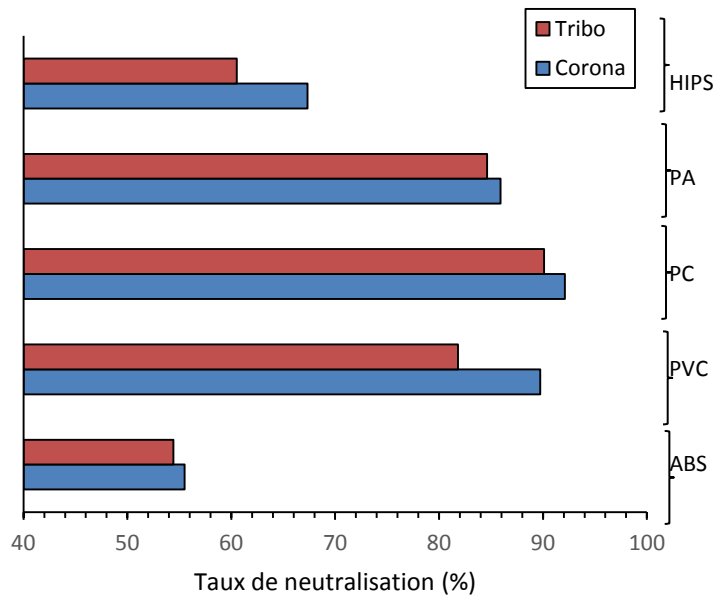
Le taux de neutralisation N est exprimé en fonction de Q_c et Q_n , qui sont les valeurs mesurées de la charge électrique sur l'échantillon respectivement avant et après neutralisation (voir l'équation III-1).

Dans la première série d'expériences, la charge des particules est effectuée par le chargeur de type hélice. Pour la deuxième série d'expériences la charge des particules est effectué par la décharge couronne. La comparaison des résultats des deux expériences permettent de déterminer l'influence de types de la charge sur l'efficacité de la neutralisation.

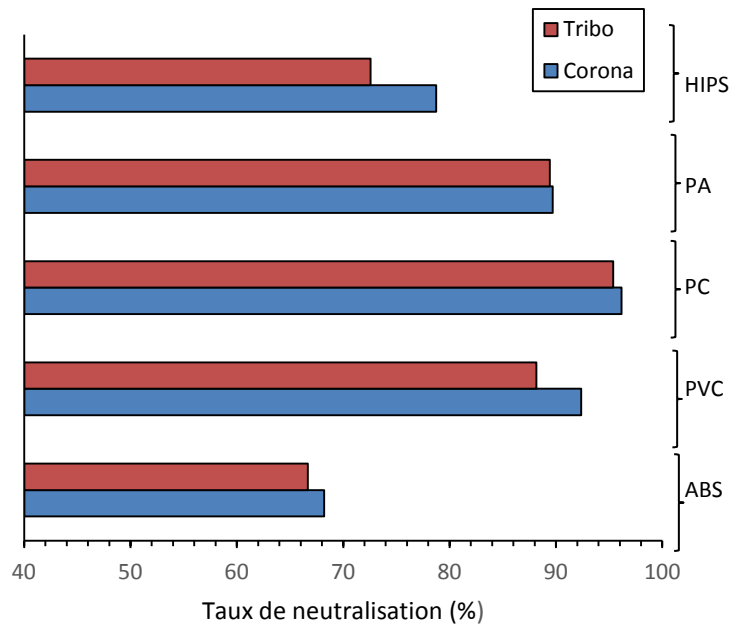
II.3.2. Résultats et interprétation

La figure III-18 montre la variation du taux de neutralisation en fonction du mode de la charge des particules pour deux valeurs de la tension de neutralisation : $U = 4$ kV, et 6 kV. En analysant ces résultats, il parait évident que le moyen utilisé pour le chargement des particules isolantes influe sur l'efficacité de la neutralisation.

On remarque que la neutralisation des charges électriques déposées sur la surface des matériaux granulaires isolantes par décharge couronne, est plus efficace par rapport à celle chargées par effet triboélectrique. Cela peut expliquer par la répartition de la charge électrique dans la surface des échantillons.



(a)



(b)

Figure 18. Taux de neutralisation des particules chargées par décharge couronne et par effet triboélectrique pour : (a) $U = 4$ kV et (b) $U = 6$ kV.

Dans le cas de la charge par effet couronne, la décharge n'agit que sur la surface exposée au bombardement ionique. Lorsque ces échantillons sont exposés à la décharge couronne AC générée par le neutralisateur, ces charges électriques sont totalement éliminées, ce qui explique la valeur élevée du taux de neutralisation (près de 100%). Tandis que dans le cas de la charge par effet triboélectrique, les charges électriques sont réparties sur toutes les surfaces des particules, et le flux d'ions de la neutralisation n'agit que sur la partie supérieure de l'échantillon, ce qui explique la faible valeur du taux de neutralisation par rapport aux particules chargées par effet couronne.

III.4. CONCLUSION

Les mesures de la charge électrique, effectuées sur des différents échantillons de matériaux granulaires isolants, sont présentées en fonction des situations et des conditions de neutralisation par décharge couronne AC. La modélisation et l'optimisation par l'utilisation de la méthode du plan d'expériences apportent des informations pratiques sur le processus de la neutralisation. Ainsi, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

1. Une neutralisation efficace de la charge électrique est possible par un neutralisateur commercial à la fréquence industrielle, en ajustant les paramètres du processus de neutralisation de manière appropriée.
2. Un taux de neutralisation près de 100% est possible pour une large gamme de produit, et différents niveau de charge et de signe de polarité avec les mêmes conditions de neutralisation.
3. Le type de la charge des matériaux isolants a un effet remarquable sur l'efficacité de la neutralisation.

Les résultats expérimentaux de la neutralisation de la charge électrique sur les câbles électriques broyés effectués sur le séparateur à tambour seront présentés dans le chapitre suivant, en étudiant d'autres paramètres expérimentaux tels que : la fréquence, la forme du signal, etc... Ces résultats seront discutés et analysés par la modélisation et l'optimisation à l'aide de la méthode des plans d'expériences.

CHAPITRE IV

NEUTRALISATION DES MATERIAUX

GRANULAIRES ISOLANTS CHARGES

PAR DIVERSES FORMES DE TENSION

CHAPITRE IV

NEUTRALISATION DES MATERIAUX GRANULAIRES ISOLANTS CHARGES PAR DIVERSES FORMES DE TENSION

Pendant certains processus électrostatiques, divers matériaux granulaires isolants acquièrent de grandes quantités de charges et les conservent plus longtemps que nécessaire. Ces charges statiques s'accompagnent des nuisances électrostatiques dont la prise en compte est indispensable dès la phase de conception d'un nouveau procédé.

Le but de ce travail est de modéliser et optimiser le processus de l'élimination de la charge statique résiduelle sur ces matériaux en appliquant la méthode des plans d'expériences. L'étude de la neutralisation est réalisée à l'aide d'un neutralisateur de charge commercial alimenté à partir d'un générateur de tensions alternatives sinusoïdales, carrées ou triangulaires pour plusieurs amplitude de tension, distances et fréquences. L'étude a été effectuée en utilisant un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante couramment utilisé pour la séparation des mélanges de particules plastique/métal contenues dans les déchets de câbles électriques. Les expériences ont été réalisées sur des échantillons de câble électrique broyé. Les échantillons ont été chargés, en utilisant un système d'électrode corona de type « *dual* » de polarité négative.

La neutralisation a été effectuée après le processus de charge, les échantillons collés à la surface de l'électrode tournante mis à la terre se déplaçant à une vitesse angulaire constante de 60 tr/min jusqu'à arriver dans la deuxième zone de décharge couronne générée par le neutralisateur de charge commercial.

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats expérimentaux, trouver les différents paramètres opératoires étudiés

(amplitude de la haute tension, distances inter-électrodes, vitesse du flux d'air, etc...). Les matériaux utilisés pour réaliser ces études expérimentales sont décrits dans le deuxième chapitre.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous allons modéliser et optimiser le processus de la neutralisation en termes de taux de neutralisation pour les trois formes d'onde à l'aide de la méthode des plans d'expériences. Dans cette partie, nous exposons et analysons les prédictions données par le logiciel MODDE 5.0 utilisé pour le traitement des données des différents facteurs étudiés dans la première partie.

Ensuite, nous présenterons les résultats expérimentaux réalisés avec les mêmes conditions de neutralisation données par le logiciel MODDE 5.0 pour confirmer la qualité de réponses obtenues.

IV.1. ETUDE DE LA NEUTRALISATION

Le but de ce travail est d'analyser l'effet des différents paramètres influents sur le processus de l'élimination des charges électriques acquises sur la surface des matériaux isolants. L'étude présentée dans ce travail a été effectuée en utilisant un séparateur électrostatique à électrode cylindrique tournante (§ II.2.2), couramment utilisé pour la séparation des mélanges de particules plastique/métal contenues dans les déchets de câbles électriques [109]. En mesurant simultanément la masse et la charge électrique du matériau récupéré.

L'idée de base consiste à mesurer la charge massique sur la surface des matériaux isolants avant et après leur exposition à la décharge couronne AC générée par le neutralisateur commercial, pour une haute tension sinusoïdale, carré ou triangulaire.

IV.1.1. Protocole expérimental

Les expériences ont été réalisées sur des échantillons de câble électrique broyé de masse 20 g, à la température ambiante (19.5 ° C à 23.5 ° C) et humidité relative (35% à 45%). L'équipement utilisé pour la mesure de la charge électrique et de la masse des produits neutralisés se compose d'une balance électronique (KERN, modèle PCB 2000-1) d'une résolution de 0.1 g, et d'une cage de Faraday connectée à un électromètre « Keithley Instruments 6514 ».

La méthode de travail utilisée pour la réalisation des expériences de neutralisation est donnée comme suit :

Dans un premier temps, l'échantillon est déposé sur le tambour à l'aide d'un vibro-transporteur, les granules se chargent alors par bombardement ionique grâce à une électrode couronne de type *dual* connecté à une alimentation réglable DC haute tension de polarité négative (Spellman, 40 kV, 6 mA).

Les granules chargés collent à la surface du tambour jusqu'à ce qu'ils arrivent au niveau de la brosse où ils se détachent et tombent dans une cage de Faraday reliée à un électromètre pour mesurer de la charge électrique placée sur une balance électronique Q_c .

Des essais préliminaires ont été effectués pour ajuster les valeurs de la tension de la charge des particules isolantes U_c , la vitesse de la rotation du tambour n et la distance inter-électrodes d_c relatives à l'électrode de chargement ionique. Pour ces expériences, la tension a été variée entre 12 et 15 kV pour 3 valeurs différentes de la distance d_c (2, 3 et 4 cm).

Les résultats obtenus concernant les valeurs du rapport charge/masse (nC/g) des expériences préliminaires effectuées avec l'électrode couronne de chargement ionique sont reportés au tableau IV-1.

Tableau IV-1. Valeurs du rapport charge/masse du Q [nC/g] obtenues par chargement couronne pour différentes valeurs de la tension U_c et de la distance inter-électrodes d_c .

Tension U_c (kV)	Distance d_c (cm)		
	2	3	4
12	-20	-28	-23
13	-20	-28	-21
14	-19	-31	-19
15	-24	-31	-21

D'après les résultats reportés dans le tableau IV-1, nous avons opté par la suite pour un intervalle $d_c = 3$ cm. La supériorité du taux de chargement pour $d_c = 3$ cm par rapport à $d_c = 2$ cm est due au fait que les lignes de champ électrique occupent une région plus grande permettant de mieux charger les particules malgré que le courant de couronne soit plus faible pour $d_c = 2$ cm (Fig. IV-1).

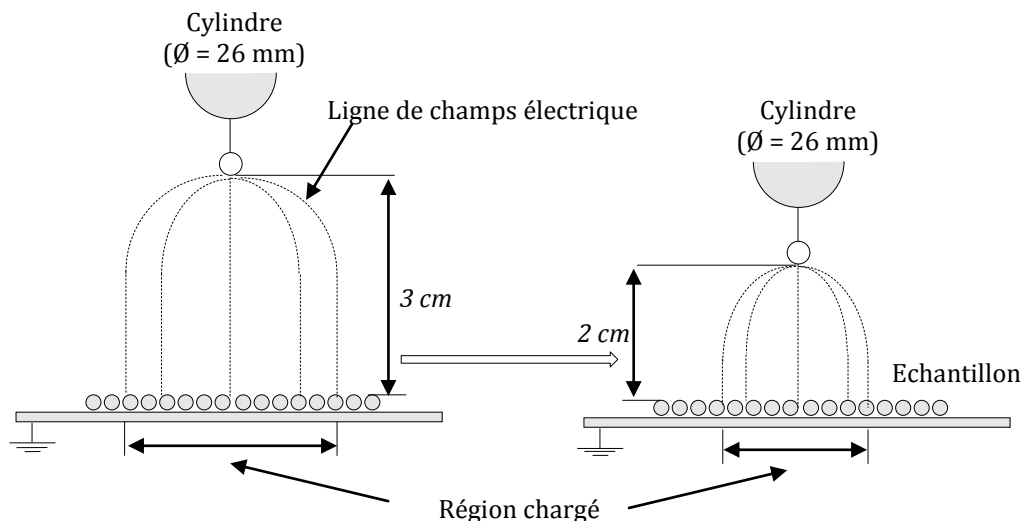


Figure IV-1. Représentation schématique de l'effet de la distance sur la charge des particules.

Dans une autre série d'expérience de neutralisation, les granules chargés par bombardement ionique dans la première zone de champ électrique ionisant, collent à la surface du tambour grâce à la force électrique d'image jusqu'à ce qu'ils arrivent au niveau de l'électrode de neutralisation où ils se détachent et tombent dans une cage de

Faraday reliée à un électromètre sensible pour la mesure de la charge électrique (Keithley, 6514) Q_n .

Le processus de la neutralisation dépend de plusieurs facteurs, l'étude expérimentale a été réalisée en prenant en considération les facteurs suivants :

- la fréquence de la tension f [Hz],
- l'amplitude de la haute tension U [kV],
- la distance entre-électrodes d [cm],
- le débit d'air v [m/s].

Toutes les expériences sont faites avec une haute tension sinusoïdale, carré ou triangulaire. L'efficacité de la neutralisation a été évaluée en calculant le rapport entre la charge massique avant et juste après la neutralisation.

Les variables du processus de neutralisation ont été fixées comme suit :

- 1) Distance inter-électrodes : $d_c = 3$ cm.
- 2) Vitesse angulaire du cylindre : $n = 60$ tr/min, rayon du cylindre : $R = 135$ mm.
- 3) Position angulaire de l'électrode couronne : $\alpha_1 = 20^\circ$.
- 4) Position angulaire de l'électrode statique : $\alpha_2 = 65^\circ$.
- 5) Taux d'alimentation des particules : $m = 40$ kg/h.
- 6) Inclinaison de l'électrode statique : $\beta = 65^\circ$.
- 7) Distance inter-électrodes de l'électrode statique (forme elliptique) : $d_2 = 70$ mm.

Toutes les expériences sont réalisées dans des conditions climatiques relativement stables : RH = 44-56 %, T° = 18-21 °C.

IV.1.2. Modélisation expérimentale

La mise en œuvre de la méthodologie des plans d'expériences a conduit à la détermination des facteurs influents et à l'identification du point optimal de fonctionnement d'un tel procédé.

Pour les facteurs considérés dans la présente étude, à savoir la haute tension de neutralisation U , la fréquence de la tension f , la vitesse du flux d'air v et la distance inter-électrodes neutralisante d , le modèle quadratique des réponses N , c'est-à-dire le taux de neutralisation des trois formes du signal prendra la forme suivante :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_{12}x_1x_2 + a_{13}x_1x_3 + a_{14}x_1x_4 + a_{23}x_2x_3 + a_{24}x_2x_4 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + a_{33}x_3^2 + a_{44}x_4^2 \quad (\text{IV-1})$$

Où y est la réponse du processus et x_i est la valeur centrée normalisée pour chaque variable u_i calculée par :

$$x_i = \frac{u_i - u_{ic}}{\Delta u_i} = u_i^* \quad (\text{IV-2})$$

Avec :

$$u_{ic} = \frac{(u_{imax} + u_{imin})}{2\Delta u_i} = \frac{(u_{imax} - u_{imin})}{2} \quad (IV-3)$$

Où x_i prend la valeur -1 , pour le niveau inférieur $u_{i \min}$ du facteur, et la valeur $+1$ pour le niveau supérieur du même facteur $u_{i \max}$.

Afin d'obtenir un tel modèle quadratique, la conception du plan composite centré a été utilisée pour la présente étude (Fig. IV-2). La particularité d'une telle conception est que les $(2k)$ points expérimentaux, situés sur l'axe du domaine expérimental (points en étoiles) sont ajoutés aux (2^k) expériences d'un plan factoriel complet (points d'angle). Trois à cinq répétitions supplémentaires (n_0) devraient être effectués au centre du domaine expérimental pour permettre l'évaluation de la signification statistique des effets et la validation du modèle quadratique [118, 119].

Donc le nombre total d'essais devront être menés est :

$$N = 2^k + 2.k + n_0 \quad (IV-4)$$

Où K est le nombre des facteurs étudiés.

Les données expérimentales ont été analysées avec le logiciel MODDE 5.0 [82], qui calcule les coefficients a_i du modèle, dessine les contours de réponse et identifie les meilleurs ajustements des paramètres pour optimiser le processus. De plus, le programme calcule deux critères statistiques importants : la «*qualité de l'ajustement*» : R^2 et la «*qualité de la prédiction*» : Q^2 .

Ce dernier est une mesure de la façon dont le modèle va prédire les réponses pour de nouvelles conditions expérimentales. Un bon modèle mathématique a les critères R^2 et Q^2 avec une valeur numérique s'approchant de l'unité.

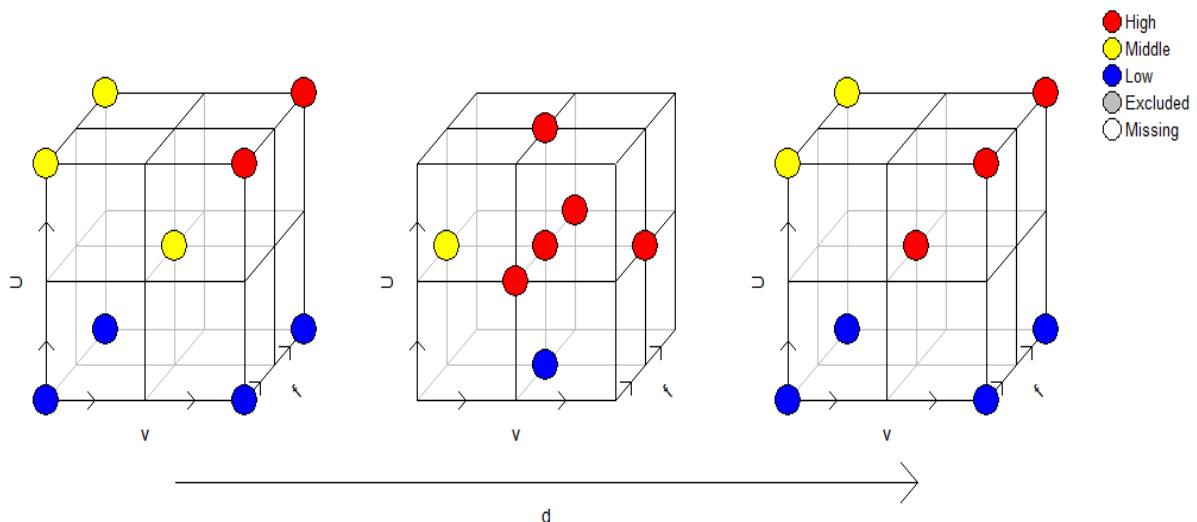


Figure IV-2. Représentation schématique d'un plan expérimental factoriel composite à quatre variables.

IV.1.3. Etude préliminaire

D'après les résultats de la neutralisation des matériaux granulaires chargés trouvés dans le troisième chapitre, le contrôle de la densité des ions neutralisants est le facteur clé pour une neutralisation efficace des particules isolantes chargées.

Les variables choisies dans ce deuxième travail pour le contrôle du courant de la décharge couronne, qui reflète la densité des ions neutralisants sont facilement contrôlables dans des conditions de laboratoire.

L'amplitude de la tension appliquée U serait probablement la principale variable de contrôle dans un environnement industriel. Cependant, afin de faciliter la manipulation de la neutralisation des matériaux granulaires chargés, la fréquence de la haute tension f et la distance inter-électrodes d par rapport à la couche de particules doivent être fixés.

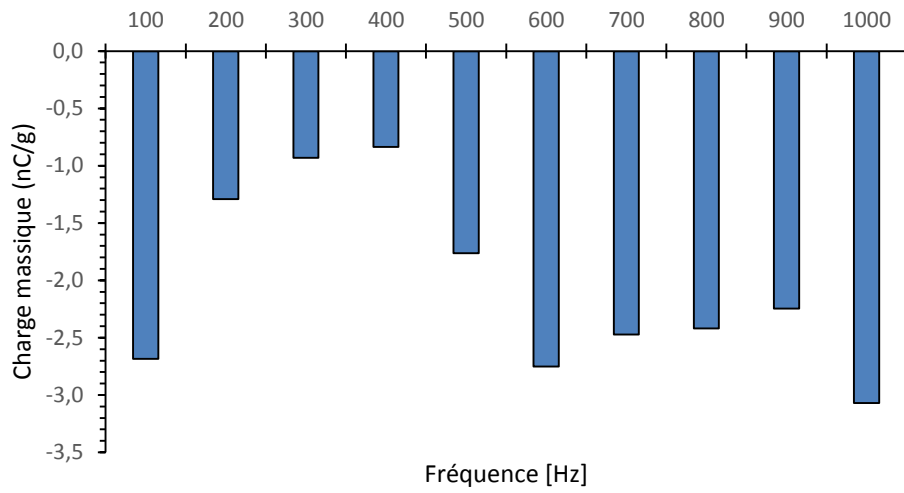
Enfin, le flux d'air et la forme du signal de la haute tension appliqué au neutralisateur est susceptible d'influencer le résultat de la neutralisation. Les expériences devraient guider le choix optimal de ces paramètres, afin d'éviter l'apparition des étincelles [121, 122], qui perturbe le processus de neutralisation.

IV.1.3.1. Effet de la fréquence de la haute tension

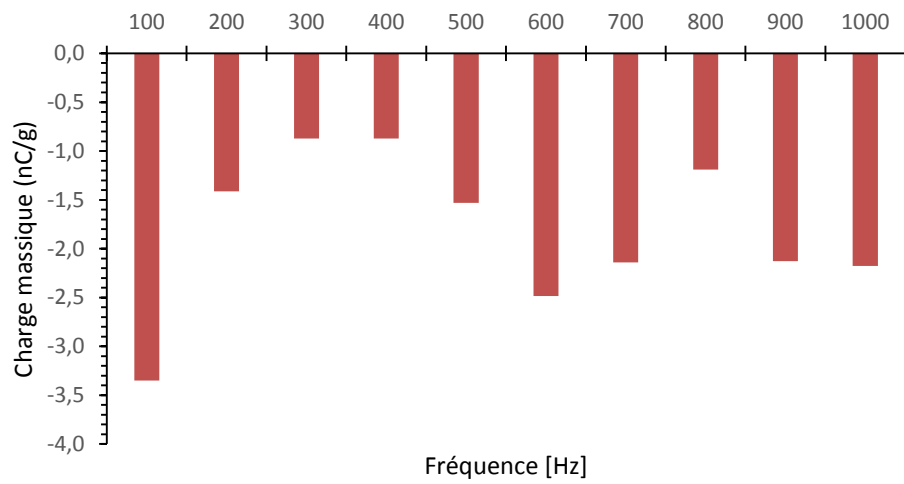
Dans cette partie, nous avons évalué l'efficacité de la neutralisation des charges électrique acquise sur la surfaces des échantillons chargées avec la configuration fil-plan en fonction de la fréquence de la haute tension appliquée au neutralisateur pour un signal sinusoïdal, carré ou triangulaire.

La valeur de la fréquence f a été variée de 100 Hz à 1 kHz, avec $U = 8$ kV, $d = 3$ cm et $v = 1$ m/s. Les résultats expérimentaux obtenus à savoir la charge électrique acquise sur le matériau isolant après neutralisation pour différentes fréquences et différents signaux sont montrés dans la figure IV-3.

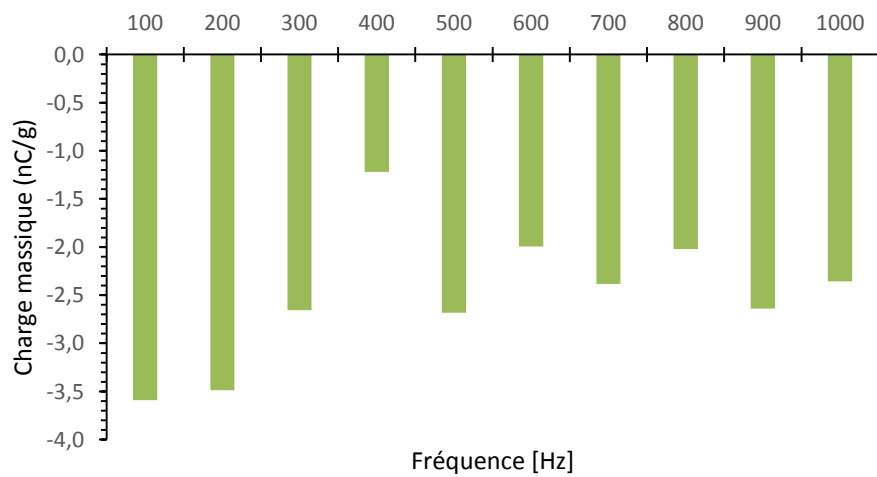
La variation de la charge massique présentée dans la figure IV-3 montre que la fréquence de la haute tension appliquée au neutralisateur a un effet significatif sur la neutralisation. La quantité de la charge électrique éliminée sur la surface des échantillons diminue avec l'augmentation de la fréquence de la tension jusqu'à $f = 400$ Hz. A la basse fréquence, et pour les trois formes de signal, la surface de l'échantillon, pendant la neutralisation, est alternativement chargée positivement et négativement suivant la polarité de la tension.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-3. Niveau de la charge massique sur la surface des particules chargées en fonction de la fréquence f , pour trois formes de signal : (a) Sinusoidal, (b) carré, (c) triangulaire.

Le mécanisme du processus de la neutralisation par décharge couronne AC est expliqué par la figure IV-4. Au fur et à mesure que l'échantillon se déplace, la région sous la couronne AC est soit neutralisée, soit rechargée en fonction de la polarité des ions émis du neutralisateur.

En supposant que les granules chargés négativement pénètrent dans la zone corona AC alors que l'électrode est excitée à la polarité positive, (1) le flux d'ions neutralisera la charge des granules et en tenant compte de la longue durée du demi-cycle, peut même modifier la polarité à la surface de l'échantillon. (2) Lorsque la polarité de l'électrode est inversée, la région rechargée de l'échantillon quitte la zone de décharge corona AC et (3) la région suivante acquiert des charges de signes opposés [123].

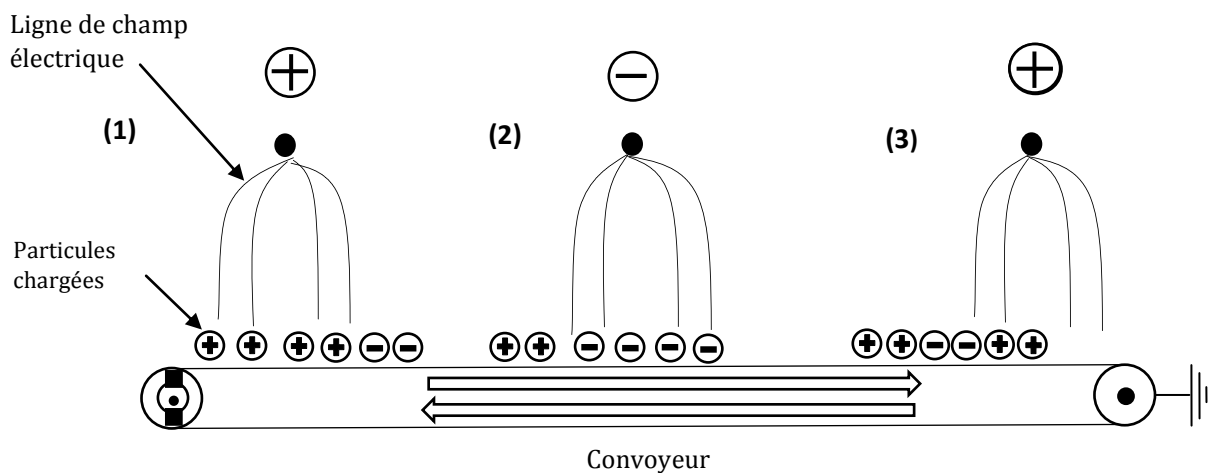


Figure IV-4. Représentation schématique du mécanisme du processus de la neutralisation dans les basses fréquences.

Cette constatation explique les faibles taux de neutralisation trouvés à des basses fréquences $100 \leq f \leq 300$. Plus la fréquence est faible, plus le temps de cycle de l'alternance positive ou négative est long, ainsi les particules risquent de se charger.

Le plus haut taux de neutralisation est enregistré à une fréquence de 400 Hz, où un taux de neutralisation respectif de 97.21%, 97.09% et 95.93% à un signal sinusoïdal, carré et triangulaire est obtenu (Tableau IV-2).

En effet, on remarque qu'au-delà d'une fréquence de 400 Hz, le taux de neutralisation commence à diminuer. Cela est dû au changement de la dynamique de la décharge couronne à haute fréquence. À des fréquences élevées, la dynamique de charge à la surface de la couche ne suit pas les variations de tension, quelques ions négatifs atteignent la surface de l'échantillon avant le changement de la polarité du champ électrique. Les charges ne sont pas complètement neutralisées ; la charge initiale négative est seulement réduite. Le taux de neutralisation N est diminué progressivement pour atteindre environ 89% à 1 kHz.

La gamme de fréquence typiquement utilisée dans les ioniseurs corona est dans le régime en basse fréquence [124] dans lequel les électrons et les ions peuvent suivre

instantanément le champ alternatif à la fréquence f , alors l'impédance des décharges est résistive. En outre, il est connu que le début de flux ionique ne diminue que légèrement lorsque la fréquence est augmentée [125].

D'un autre côté, on remarque que la forme du signal appliqué au neutralisateur a un effet remarquable sur le processus de neutralisation. Avec un signal carré l'élimination de la charge électrique acquise sur la surface des échantillons est importante par rapport au signal sinusoïdal. Par contre avec le signal triangulaire la neutralisation est légèrement faible par rapport au deux autres signaux.

Tableau IV-2. Taux de neutralisation en fonction de la fréquence f .

Fréquence (Hz)	Taux de neutralisation N [%]		
	Sin	Car	Tri
100	91.05	88.84	88.03
200	95.7	95.29	88.38
300	96.9	97.09	91.15
400	97.21	97.09	95.93
500	94.12	94.9	91.06
600	90.83	91.72	93.35
700	91.76	92.86	92.06
800	91.93	96.04	93.27
900	92.51	92.91	91.2
1000	89.77	92.74	92.15

IV.1.3.2. Effet de l'amplitude de la haute tension

Dans cette partie du travail, nous allons évaluer l'efficacité de la neutralisation en fonction de la tension avec plusieurs valeurs de fréquences. L'amplitude de la tension de neutralisation a été variée à trois niveaux : $U = 4, 6$ et 8 kV. La fréquence de tension a été ajustée à quatre valeurs $f = 50, 100, 200, 400$ Hz. Pour chaque combinaison (U, f) . Les expériences sont effectuées pour un signal sinusoïdal, carré ou triangulaire.

La figure IV-5 représente les histogrammes de la charge massique (moyenne d'au moins trois mesures) en fonction de la tension U pour une tension sinusoïdale, carré ou triangulaire. Les autres paramètres sont maintenus constants pendant toutes les expériences :

- La distance inter-électrodes à 2 cm.
- La vitesse du flux d'air à 0 m/s.

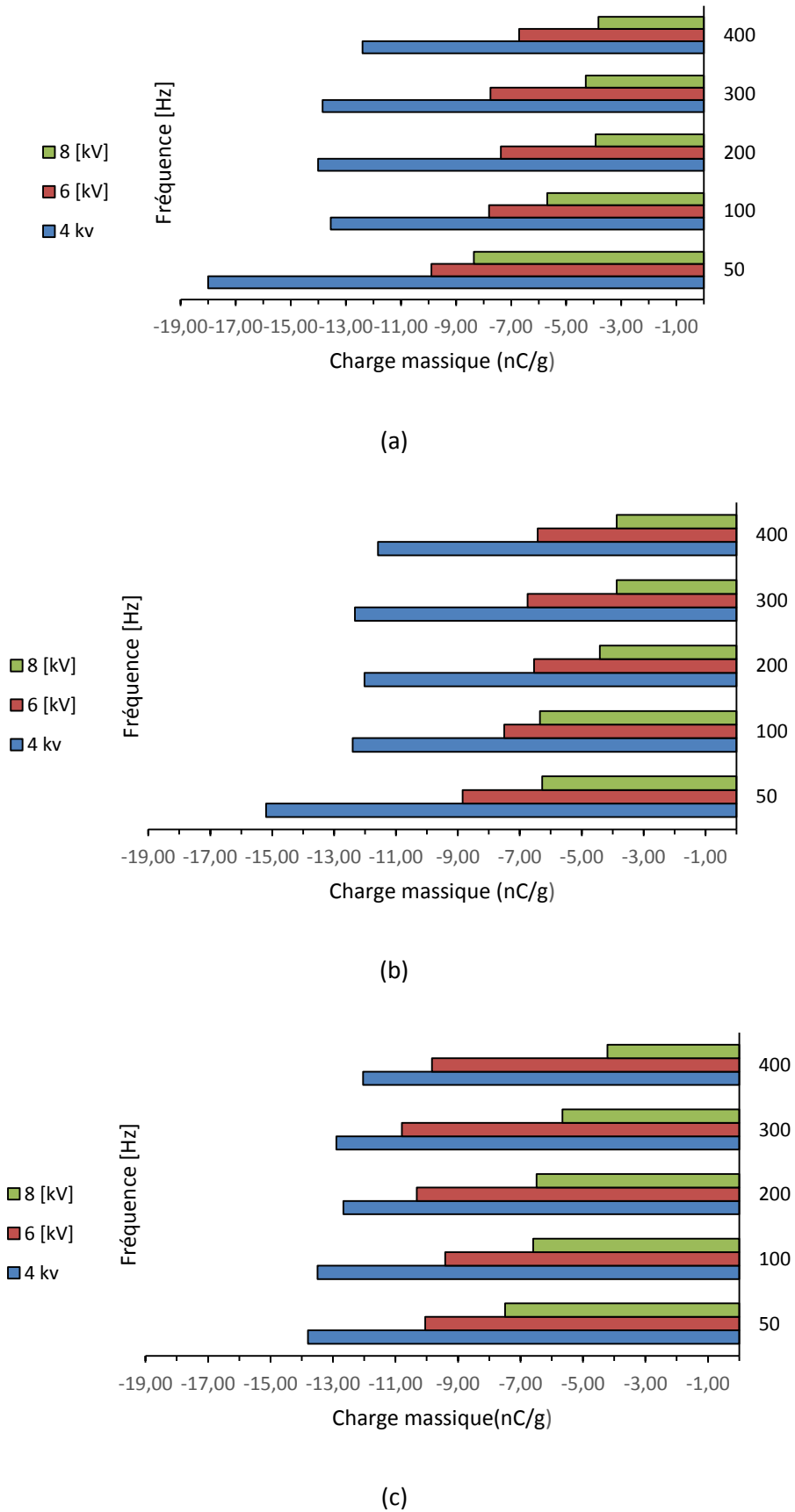


Figure IV-5. Niveau de la charge massique sur la surface des particules chargées en fonction de la fréquence f et la tension U , pour trois formes de signal : (a) Sinusoïdal, (b) carré, (c) triangulaire.

L'élimination de la charge électrique à la surface de la couche de particules isolantes dépend à la fois de l'amplitude de la haute tension et la fréquence appliquée au neutralisateur. En effet, le taux de neutralisation croît avec l'augmentation de l'amplitude de la haute tension sinusoïdale, carré ou triangulaire [126].

Pour la tension $U = 4$ kV avec toutes les fréquences, les formes de signaux la neutralisation est faible, car l'intensité du champ électrique généré à cette tension est faible. En revanche, pour une amplitude de 8 kV la situation est différente : la neutralisation est efficace. Le taux de neutralisation est d'environ 80%.

On peut noter que la neutralisation avec une haute tension sinusoïdale et carré nécessite des niveaux de tensions plus faibles qu'avec d'une haute tension triangulaire.

Le choix optimal de la tension appliquée peut conduire à d'excellents résultats de neutralisation même lorsque la fréquence de la tension appliquée est de 50 Hz, comme le montrent les résultats reportés sur la figure IV-5.

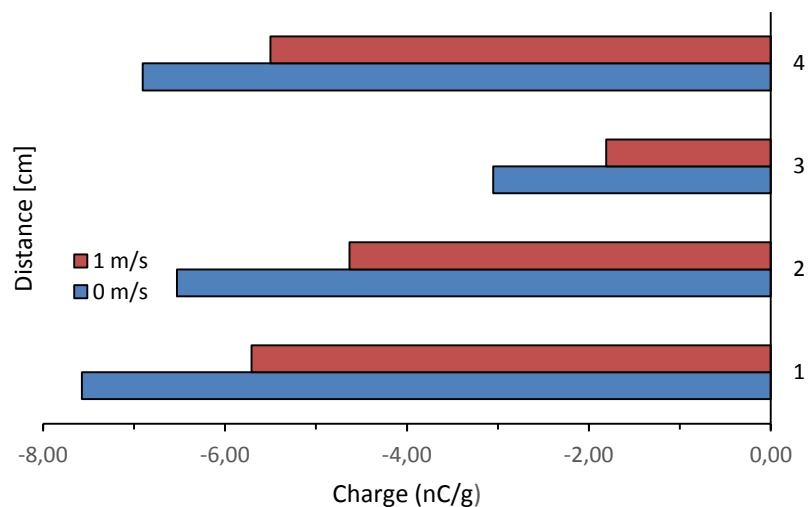
IV.1.3.3. Effet de la distance inter-électrodes d et la vitesse du flux d'air v

Dans cette section, nous allons analyser l'influence de la vitesse du flux d'air injecté et la distance entre le neutralisateur et la surface de l'échantillon sur l'efficacité de la neutralisation des matériaux isolants.

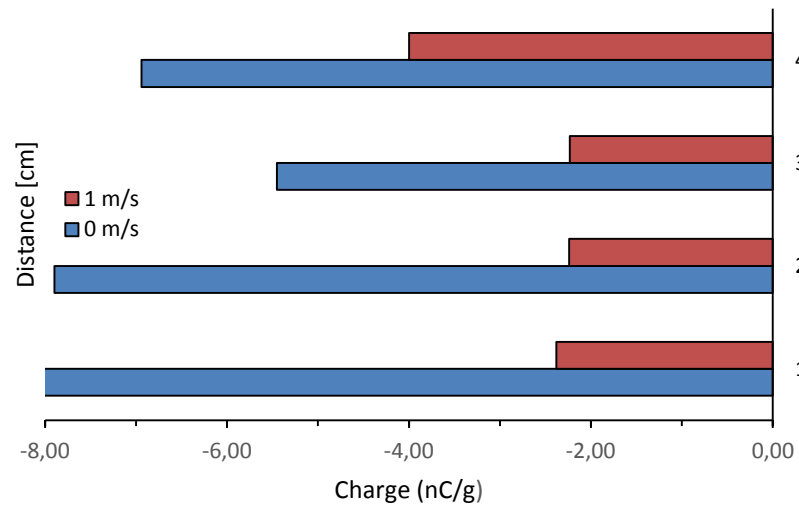
La distance inter-électrodes d a été variée de 1 à 4 cm pour deux vitesses d'air $v = 0$ m/s et 1 m/s. Les expériences sont faits pour un signal sinusoïdal, carré ou triangulaire.

La figure IV-6 représente les histogrammes de la charge massique (moyenne d'au moins trois mesures) en fonction de la tension U pour une tension sinusoïdale, carré ou triangulaire respectivement. Les autres paramètres sont maintenus constants pendant toutes les expériences :

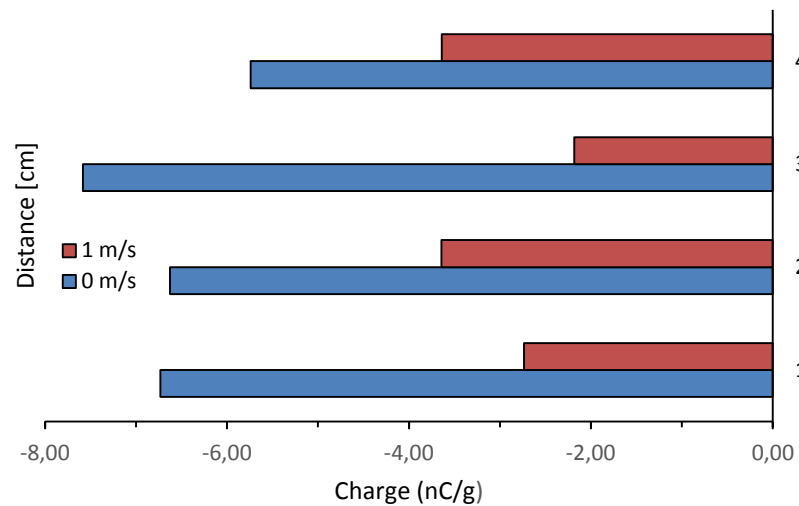
- La haute tension à 8 kV.
- La fréquence de la haute tension à 50 Hz.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-6. Niveau de la charge massique sur la surface des particules chargées en fonction de la distance d avec deux vitesses d'air, pour trois formes de signal : (a) Sinusoïdal, (b) carré, (c) triangulaire.

En analysant le niveau de la charge massique mesurée après neutralisation, il apparaît évident que la distance inter-électrodes et la vitesse du flux d'air influe sur l'efficacité de la neutralisation. On remarque que l'augmentation de la distance améliore la neutralisation, cela peut expliquer par l'intensification du champ électrique produit à ces distances, ce qui améliore l'efficacité du neutralisateur. En effet, à des distances plus grandes, la neutralisation est faible, cela est dû à la réduction du champ électrique.

D'un autre côté, l'effet de la vitesse de l'air est remarquable. La présence de l'air améliore l'efficacité de la neutralisation. Cela peut être expliqué que l'air injecté favorise le déplacement des ions électriques générés par la décharge couronne et augmente le nombre des charges éliminées.

Cependant, le signal appliqué à la neutralisation influe de façon remarquable sur la neutralisation, avec un signal carré, la neutralisation est beaucoup mieux par rapport aux deux autres signaux. Cela peut être facilement expliqué par la longue durée du demi-cycle : les ions générés par le neutralisant ont le temps de neutraliser la charge existante.

IV.2. MODELISATION EXPERIMENTALE

Le but de l'étude expérimentale qui seront décrites dans les paragraphes suivants est de comparer la faisabilité de la neutralisation des matériaux isolants en utilisant une haute tension sinusoïdale, carré ou triangulaire.

Le domaine de variation des quatre facteurs mentionnés plus haut, est identifié à partir des résultats préliminaires faits dans la première partie de ce chapitre :

- U [kV] : $U_{min} = 5$ kV et $U_{max} = 8$ kV;
- f [Hz] : $f_{min} = 200$ Hz et $f_{max} = 400$ Hz;
- d [cm] : $d_{min} = 1$ cm et $d_{max} = 3$ cm.
- v [m/s] : $v_{min} = 0$ m/s et $v_{max} = 2$ m/s.

Les valeurs des autres paramètres ont été maintenues constantes pour toutes les expériences, à savoir :

- Vitesse de rotation du tambour : 60 tr/mn.
- Masse d'échantillon : 20 g.
- Tension de chargement : -15 kV.
- Distance inter-électrodes : 3 cm.

Le plan d'expérience composite réalisé comporte 3 expériences au centre, 8 expériences sur les axes du domaine en plus des 16 expériences du plan factoriel complet, ce qui donne un total de 27 expériences. Chaque expérience est répétée trois fois où les valeurs moyennes des taux de neutralisation en (%) issues sont regroupées dans le tableau IV-3 pour chaque produit. La température ambiante et l'humidité relative étaient respectivement de $T = 21.4$ °C et $RH = 40.6\%$.

Tableau IV-3. Résultats du plan d'expérience composite.

Tension (kV)	Débit d'air (m/s)	Fréquence (Hz)	Distance (cm)	Sinusoïdale	Carré	Triangulaire
5	0	200	1	57.00	64.31	54.81
8	0	200	1	76.72	75.52	69.69
5	2	200	1	56.71	65.88	55.33
8	2	200	1	86.84	89.18	83.93
5	0	400	1	53.44	64.24	61.74
8	0	400	1	73.15	74.79	66.64

5	2	400	1	52.15	64.71	53.69
8	2	400	1	91.51	92.92	87.83
5	0	200	3	60.08	52.03	42.03
8	0	200	3	72.03	73.33	63.60
5	2	200	3	55.38	46.74	49.57
8	2	200	3	94.46	99.67	87.22
5	0	400	3	53.06	46.19	40.90
8	0	400	3	68.29	69.34	62.66
5	2	400	3	54.85	49.30	39.17
8	2	400	3	95.80	95.44	88.83
5	1	300	2	59.18	67.31	65.65
8	1	300	2	86.62	87.44	83.73
6.5	0	300	2	71.82	72.14	66.69
6.5	2	300	2	87.95	90.56	66.91
6.5	1	200	2	82.08	84.86	68.95
6.5	1	400	2	84.31	85.26	70.55
6.5	1	300	1	80.83	84.17	67.36
6.5	1	300	3	82.55	88.85	65.48
6.5	1	300	2	84.39	87.09	69.01
6.5	1	300	2	85.76	88.76	70.46
6.5	1	300	2	86.02	88.58	71.52

IV.2.1. Evaluation des effets des facteurs

La relation entre les grandeurs d'entrée (niveau de la haute tension U , la vitesse du flux d'air v , la fréquence f et la distance inter-électrodes d) et la grandeur du sortie (le taux de neutralisation N des différents signaux), doivent être analysées afin de mesurer l'influence des facteurs et des interactions sur les variations de la réponse.

La signification des effets a été analysée en utilisant le test « t » de Student, les résultats obtenus permettent donc de déterminer les facteurs et les interactions dont les probabilités sont inférieures à un niveau fixé arbitrairement. Selon ce niveaux de signification, ces termes peuvent être rejetés, c'est-à-dire supprimés de l'étude.

Un effet sera significatif au risque de 5% avec $v = n - p = 27 - 15 = 12$: $t_{\text{crit}}(0.05 ; 12) = 2.179$ (voir l'annexe A), si son test statistique « t_i » est supérieur à 2.179.

Où v est le degré de liberté, n est le nombre des expériences réalisés et p est le nombre de coefficients estimé à partir du modèle.

Nous obtenons le tableau IV-4, IV-5 et IV-6 pour la neutralisation avec un signal respectivement sinusoïdal, carré et triangulaire.

Tableau IV-4. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation avec une tension sinusoïdale.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation avec une tension sinusoïdale	Constante	83.94		
	U	13.53	26.00	Significatif
	v	5.00	9.62	Significatif
	f	-0.82	1.57	Non significatif
	d	0.45	0.87	Non significatif
	$U*U$	-10.31	19.82	Significatif
	$v*v$	-3.33	6.40	Significatif
	$f*f$	-0.02	0.04	Non significatif
	$d*d$	-1.52	2.93	Significatif
	$U*v$	5.18	9.96	Significatif
	$U*f$	0.90	1.73	Non significatif
	$U*d$	-0.11	0.21	Non significatif
	$v*f$	1.18	2.26	Significatif
	$v*d$	1.26	2.42	Significatif
$f*d$	-0.18	0.35	Non significatif	

Tableau IV-5. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation avec une tension de forme carrée.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation avec une tension carrée	Constante	87.28		
	U	13.16	17.67	Significatif
	v	5.70	7.64	Significatif
	f	-0.52	0.70	Non significatif
	d	-3.05	4.09	Significatif
	$U*U$	-9.48	12.72	Significatif
	$v*v$	-5.50	7.38	Significatif
	$f*f$	-1.79	2.40	Significatif
	$d*d$	-0.34	0.46	Non significatif
	$U*v$	5.27	7.08	Significatif

	$U*f$	-0.04	0.06	Non significatif
	$U*d$	4.39	5.89	Significatif
	$v*f$	0.72	0.97	Non significatif
	$v*d$	1.03	1.38	Non significatif
	$f*d$	-0.83	1.11	Non significatif

Tableau IV-6. Analyse de chaque effet du modèle pour la neutralisation avec une tension de forme triangulaire.

Réponses	Variables	Effets	t_i	Résultats
Neutralisation avec une tension triangulaire	Constante	71.06		
	U	12.85	17.87	Significatif
	v	4.65	6.47	Significatif
	f	-0.17	0.24	Non significatif
	d	-3.42	4.76	Significatif
	$U*U$	3.27	4.54	Significatif
	$v*v$	-4.62	6.43	Significatif
	$f*f$	-1.67	2.33	Significatif
	$d*d$	-5.00	6.96	Significatif
	$U*v$	5.43	7.56	Significatif
	$U*f$	0.48	0.67	Non significatif
	$U*d$	3.01	4.18	Significatif
	$v*f$	-0.52	0.73	Non significatif
	$v*d$	1.73	2.41	Significatif
	$f*d$	-1.06	1.48	Non significatif

Pour vérifier que le modèle est valide et qu'il reflète bien le fonctionnement du processus de la neutralisation électrostatique, une analyse de la variance a été réalisée. Celle-ci consiste à comparer à l'aide du test « F » de Fischer, que la valeur de F_{obs} est inférieure à la valeur de $F = 2.64$ lue dans la table de Fisher-Snedecor (Annexe B) pour les degrés de liberté connus (dll).

Les tableaux IV.7 à IV. 9 présentent les résultats trouvés pour l'analyse de la variance.

Tableau IV-7. Analyse de la variance pour la neutralisation avec une tension sinusoïdale.

Variation due à	Somme des carrés	dll	Carré moyen	F(obs)
Liaison	5415.33	14	386.81	52.9
Résidus	87.73	12	7.31	
Totale	5503.06	26	211.65	

Tableau IV-8. Analyse de la variance pour la neutralisation avec une tension de forme carrée.

Variation due à	Somme des carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	6081.63	14	434.4	28.98
Résidus	179.93	12	14.98	
Totale	6261.46	26	240.82	

Tableau IV-9. Analyse de la variance pour la neutralisation par tension triangulaire.

Variation due à	Somme des carrés	DLL	Carré moyen	F(obs)
Liaison	4640.50	14	331.64	23.75
Résidus	167.14	12	13.59	
Totale	4807.91	26	184.92	

La table de *Fisher-Snédecov* (voir l'annexe B) donne pour $v_1 = 14$ et $v_2 = 12$, $F(\text{crit}) = 2.64$ pour un risque de 5%.

Nous avons dans les trois réponses : $F_{\text{obs}} > (F_{\text{crit}} = 2.64)$, l'hypothèse H_1 de linéarité du modèle est donc retenu.

Ensuite, nous avons éliminé les effets non significatifs, ce qui a donné les modèles mathématiques suivants :

$$N_{\text{sin}} = 83.44 + 13.53U + 5v - 10.31U*U - 3.33v*v - 1.52 d*d + 5.18U*v + 1.18v*f + 1.26v*d \quad (\text{IV-5})$$

Avec : $R^2 = 98.41 \%$ et $Q^2 = 96.5 \%$.

$$N_{\text{car}} = 87.28 + 13.16U + 5.7v - 3.03d - 9.48 U*U - 5.5 v*v - 1.79 f*f + 5.27U*v + 4.39 U*d \quad (\text{IV-6})$$

Avec : $R^2 = 97.13 \%$ et $Q^2 = 93.8 \%$.

$$N_{\text{tri}} = 71.06 + 12.85U + 4.65v - 3.42d + 3.27U*U - 4.62v*v - 1.67f*f - 5d*d + 5.43U*v + 3.01U*d + 1.73v*d \quad (\text{IV-7})$$

Avec : $R^2 = 96.52 \%$ et $Q^2 = 92.5 \%$.

IV.2.2. Optimisation du processus de la neutralisation

A partir des modèles mathématiques obtenus, les réponses du taux de neutralisation pour les trois formes du signal prédites par le logiciel MODDE 5.0 sont représentées dans les figures IV-7, IV-8 et IV-9, ce qui illustre l'influence de chaque facteur (U, f, v et d) sur le résultat du processus.

Sur les figures IV-7, IV-8 et IV-7, les courbes supérieures et inférieures de chaque graphique indiquent les limites de l'intervalle de confiance à 95%.

Selon les résultats obtenus, il apparaît que la fréquence et la distance dans les limites de l'intervalle étudié ne sont pas des facteurs significatifs en comparaison avec la tension et la vitesse de l'air.

Le taux de neutralisation croît avec l'augmentation de la haute tension appliquée ; ce qui correspond à des intensités de champ électrique plus élevées.

Les résultats obtenus avec l'injection de l'air sont nettement meilleurs par rapport à la neutralisation sans l'air. Cela peut être expliqué que l'air injecté favorise le déplacement des ions électriques générés par la décharge couronne et augmente le nombre des charges éliminées.

Cependant, la forme d'onde appliquée influe remarquablement sur l'efficacité de la neutralisation. Le taux de neutralisation avec un signal sinusoïdal et carré est nettement meilleur par rapport à la neutralisation avec un signal triangulaire.

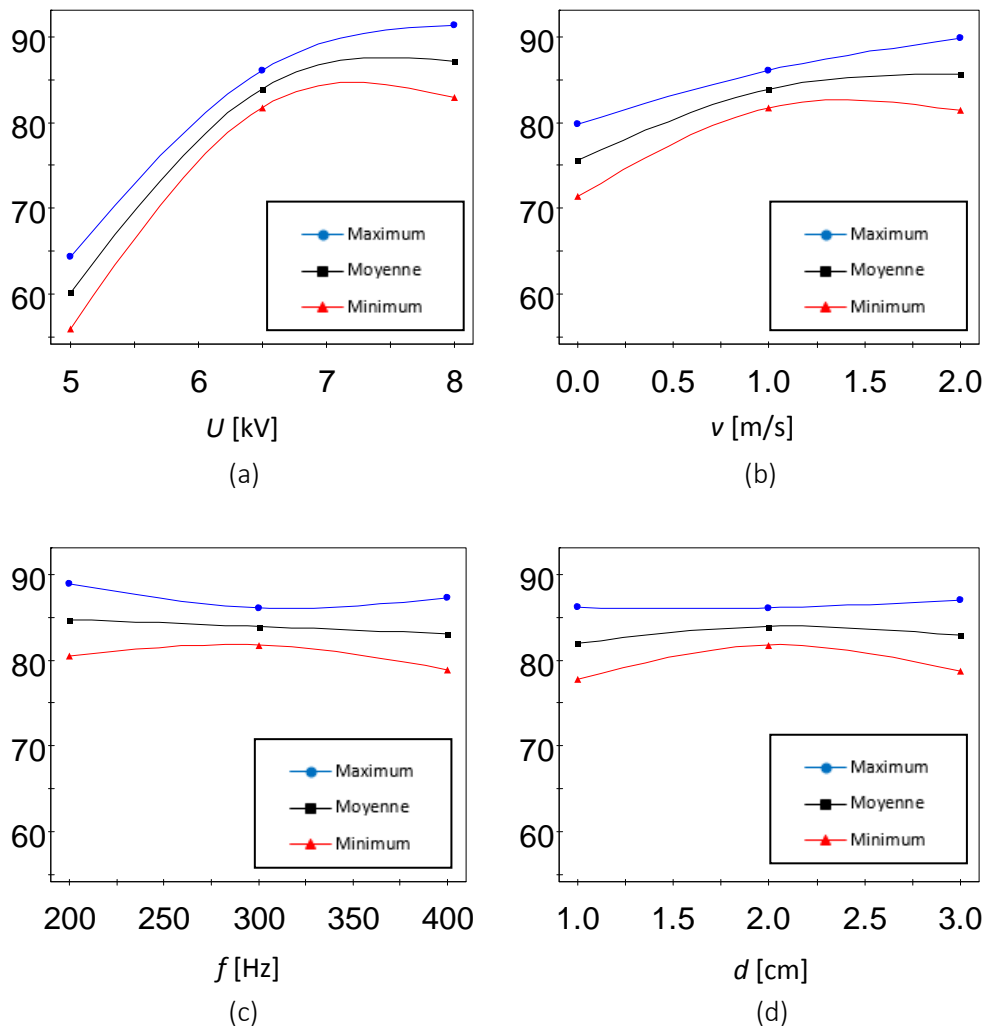


Figure IV-7. Variation prédite du taux de neutralisation sinusoïdale en fonction de : (a) la haute tension appliquée U [kV], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, (b) vitesse du flux d'air v [m/s], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $U = 6.5$ kV ; (c) la fréquence f [Hz], avec $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV ; (d) distance entre-électrode d [cm], $f = 300$ Hz, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV.

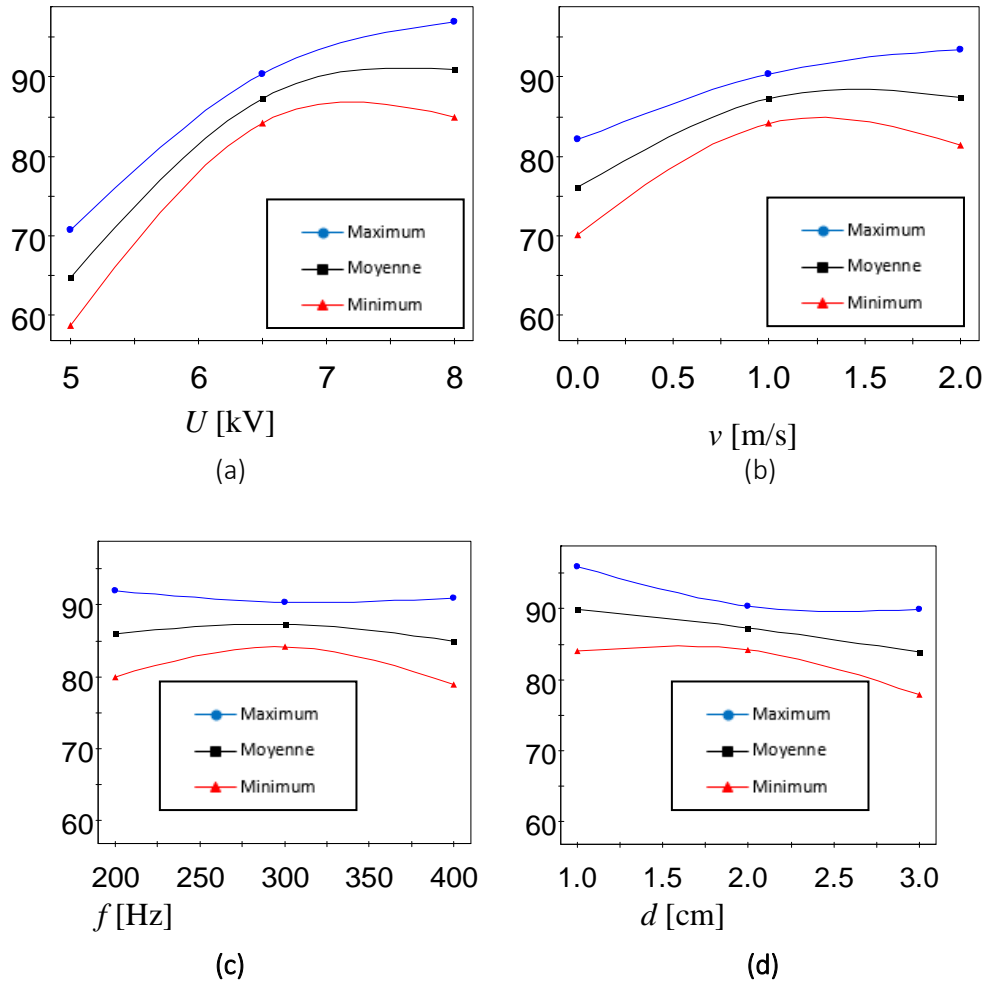
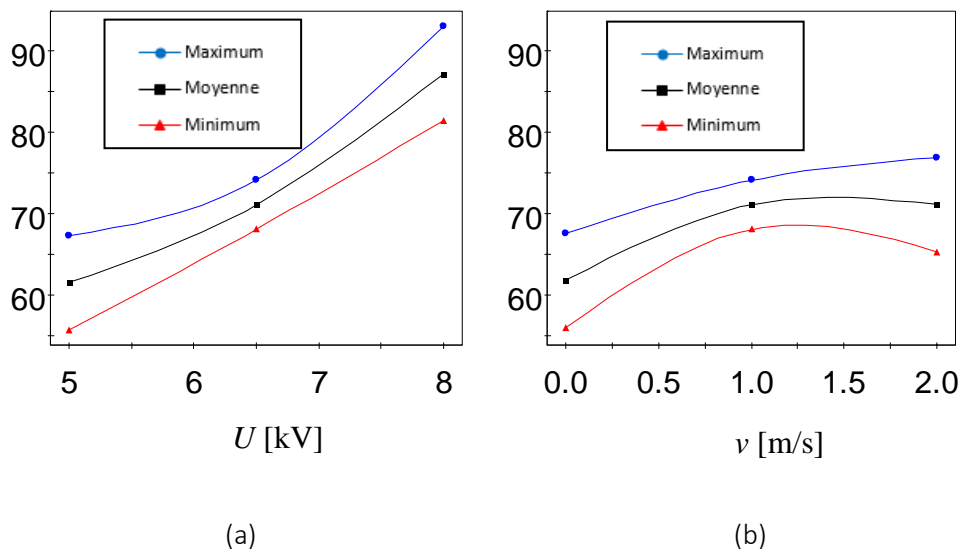


Figure IV-8. Variation prédite du taux de neutralisation carré en fonction de ; (a) la haute tension appliquée U [kV], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, (b) vitesse du flux d'air v [m/s], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $U = 6.5$ kV ; (c) la fréquence f [Hz], avec $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV ; (d) distance entre-électrode d [cm], $f = 300$ Hz, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV



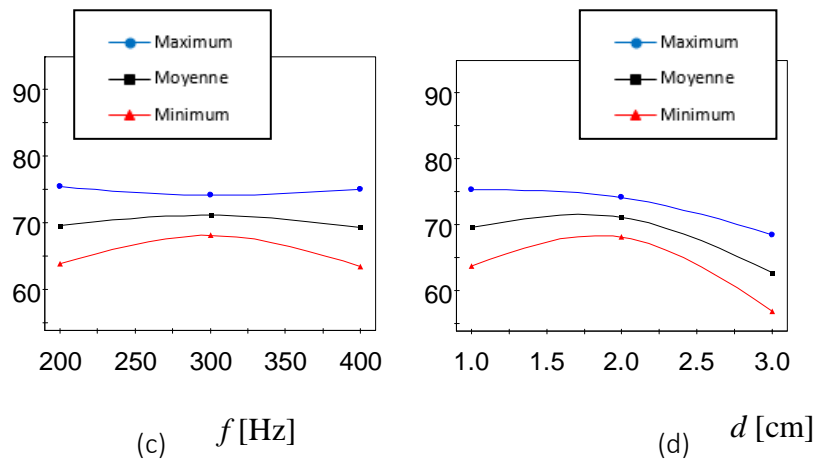


Figure IV-9. Variation prédite du taux de neutralisation triangulaire en fonction de ; (a) la haute tension appliquée U [kV], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, (b) vitesse du flux d'air v [m/s], avec $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, $U = 6.5$ kV ; (c) la fréquence f [Hz], avec $d = 2$ cm, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV ; (d) distance entre-électrode d [cm], $f = 300$ Hz, $v = 1$ m/s, $U = 6.5$ kV.

Selon le logiciel MODDE 5.0 [86], l'optimum du processus de la neutralisation (c'est-à-dire, obtenir un maximum de : N_{sin} , N_{car} , N_{tri}) en fonction de la haute tension appliquée et la vitesse du flux d'air sont montrés dans les figures IV-10 (a), (b) et (c) respectivement.

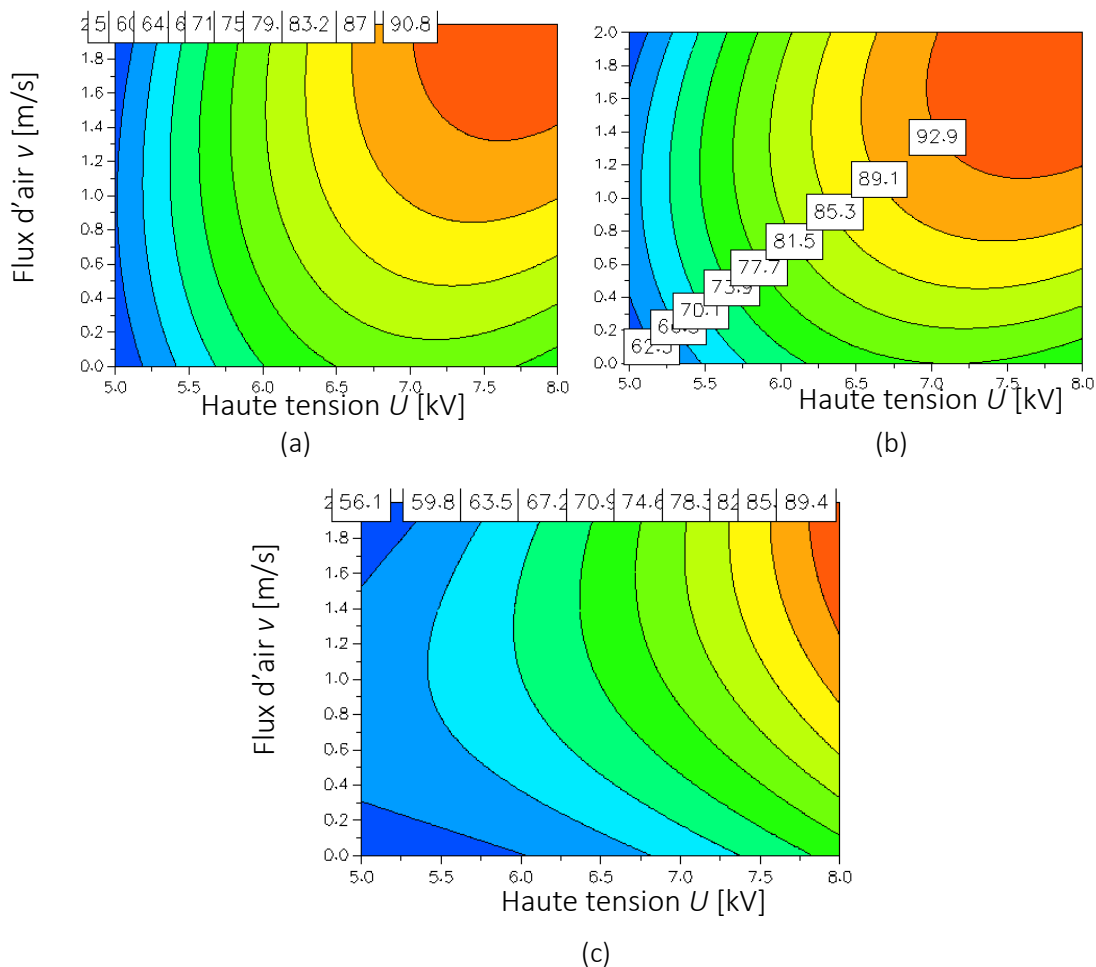


Figure IV-10. Courbes iso-critères exprimant le taux de neutralisation en fonction de la haute tension appliquée et du flux d'air, pour : $f = 300$ Hz, $d = 2$ cm, avec (a) Sinusoïdale, (b) carré et (c) triangulaire.

Selon le logiciel MODDE 5.0, le meilleur taux de neutralisation pour les différents signaux correspond aux valeurs optimales données dans le tableau IV-10.

Tableau IV-10. Résultats donnant les conditions optimales du taux de neutralisation.

	U (kV)	v (m/s)	f (Hz)	d (cm)	N (%)
Sinusoidale	7.92	2.00	399.98	2.39	95.60
Carrée	7.94	1.99	354.42	2.80	97.16
Triangulaire	7.92	2.00	320.00	2.39	90.79

Une expérience réalisée avec ces valeurs optimales obtenues a donné les mêmes résultats optimaux, ce qui est très proche de la prédiction faite par le logiciel MODDE 5.0.

Une expérience menée avec ces valeurs optimales des facteurs de contrôle a donné les résultats suivants : $N_{\text{sin}} = 95.32\%$, $N_{\text{car}} = 97.03\%$, $N_{\text{tri}} = 90.5\%$, qui sont très proches de la prédiction faite par MODDE 5.0.

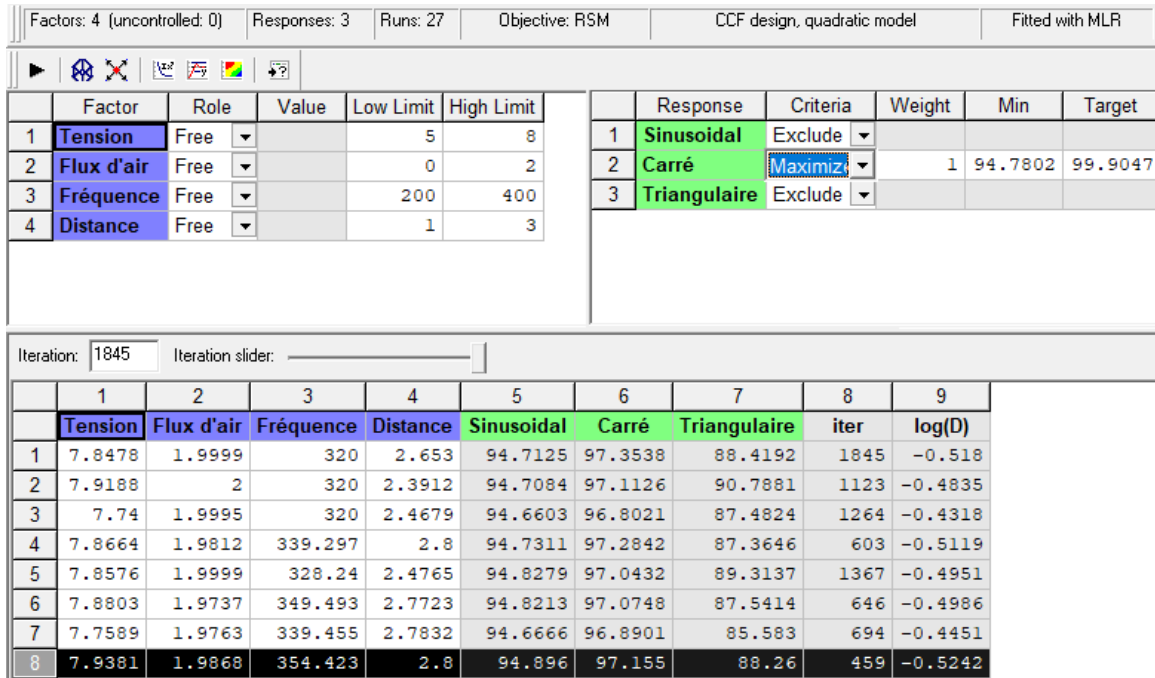
Factors: 4 (uncontrolled: 0) Responses: 3 Runs: 27 Objective: RSM CCF design, quadratic model Fitted with MLR					
Factor	Role	Value	Low Limit	High Limit	
1 Tension	Free		5	8	
2 Flux d'air	Free		0	2	
3 Fréquence	Free		200	400	
4 Distance	Free		1	3	

Response	Criteria	Weight	Min	Target
1 Sinusoidal	Maximize	1	92.9679	97.3198
2 Carré	Exclude			
3 Triangulaire	Exclude			

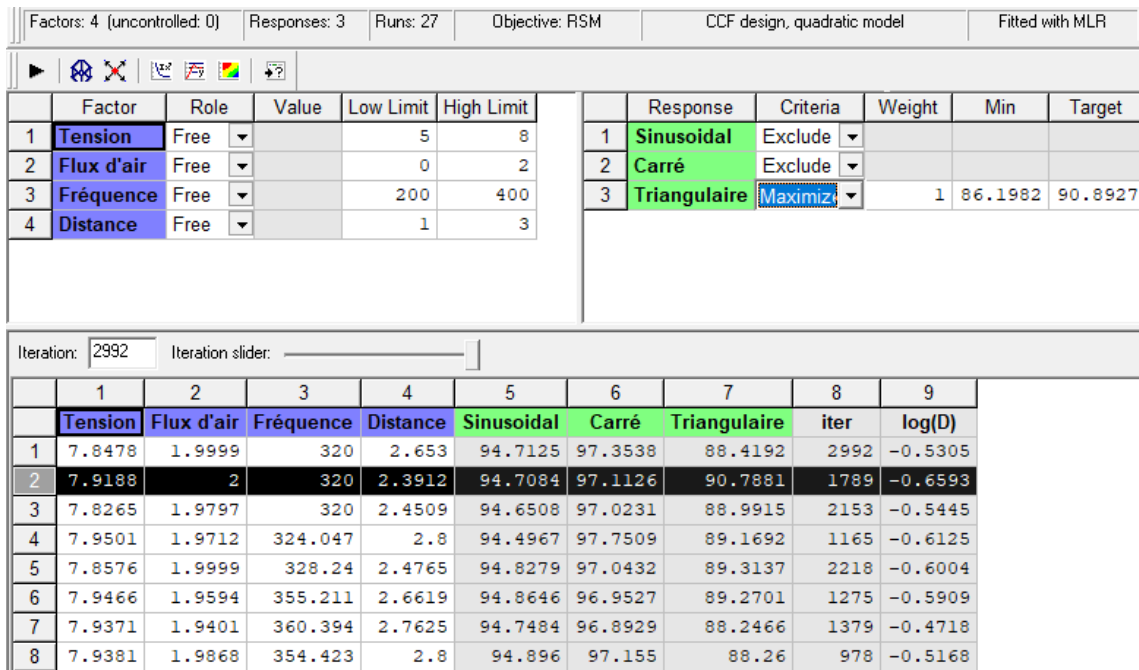
Iteration: 1006 Iteration slider:

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	Tension	Flux d'air	Fréquence	Distance	Sinusoidal	Carré	Triangulaire	iter	log(D)
1	7.8478	1.9999	320	2.506	94.7403	97.1533	89.154	1006	-0.4543
2	7.9188	2	399.98	2.3912	95.5969	95.263	88.6606	571	-0.8049
3	7.74	1.9995	339.656	2.4679	94.8571	96.5484	87.1307	659	-0.4945
4	7.8664	1.9812	358.594	2.8	94.9216	96.8466	86.8375	284	-0.5176
5	7.8576	1.9999	328.24	2.4765	94.8279	97.0432	89.3137	704	-0.4843
6	7.8306	1.9977	389.549	2.3926	95.4391	95.4732	87.5324	255	-0.7287
7	7.7513	1.9837	378.731	2.6642	95.1408	95.7802	85.1125	310	-0.6009
8	7.85	2	400	2.6	95.5563	95.3018	86.4239	150	-0.7846

(a)



(b)



(c)

Figure IV-11. Résultat du MODDE-prédiction des valeurs optimales de taux de neutralisation [%] avec un signal (a) sinusoïdal, (b) carré et (c) triangulaire.

IV.3. CONCLUSION

La mesure de la charge électrique sur la surface d'échantillons avant et après avoir été soumis à la décharge couronne AC s'est révélée être un moyen efficace pour caractériser l'efficacité du processus de neutralisation. Toutefois, on peut tirer des conclusions suivantes de cette étude :

1. La méthodologie du plan d'expériences est un outil efficace pour la modélisation et l'optimisation du procédé de neutralisation par décharge couronne à courant alternatif de matériaux isolants granulaires.
2. La neutralisation de la charge déposée par décharge couronne dépendent de la forme de l'onde, de la fréquence et de l'amplitude de la haute tension appliquée. L'efficacité de la neutralisation augmente avec la fréquence et ceci quelle que soit l'amplitude de la haute tension appliqué au neutralisateur.
3. L'effet de l'air est un paramètre important, la présence de l'air améliore nettement le processus de neutralisation.
4. L'effet de la distance inter-électrodes est significatif, pour les petites distances, il est recommandé de réduire la tension et d'augmenter la fréquence. Pour de grandes distances, l'augmentation de la tension et de la fréquence améliore nettement le processus de neutralisation.
5. D'autres facteurs tels que l'humidité ambiante peuvent influencer la neutralisation et doivent être pris en compte lors la réalisation des expériences en prenant une valeur d'humidité adéquate à la neutralisation.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Divers processus électrostatiques, tels que la séparation, la filtration ou la pulvérisation, impliquent la charge électrique de divers matériaux granulaires isolants. Dans le cas typique de la séparation électrostatique, une distribution plus uniforme et plus élevée sur la surface des mélanges de matériaux granulaires augmente l'efficacité de ce procédé. D'autre part, l'accumulation des charges électriques résiduelles des particules séparées représentent une nuisance électrostatique qui devrait être prise en compte dans la phase de conception d'un nouveau procédé.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été menés dans l'objectif d'améliorer les performances de ces séparateurs électrostatiques avec la neutralisation de la charge électrique des matériaux isolants séparés, en utilisant la décharge couronne produite par des électrodes, en vue de garantir la sécurité des opérateurs et de matériels utilisés.

La conclusion générale de ces travaux de recherche peut être formulée ainsi : l'efficacité du processus de la neutralisation électrostatique des matériaux granulaires isolants chargés est basée sur l'ajustement approprié des différentes conditions d'application de la haute tension qui génère la décharge couronne. La démarche expérimentale qui a conduit à cette conclusion s'est organisé selon les quatre phases suivantes :

- 1) Mise au point des dispositifs expérimentaux ;
- 2) Quantification de la quantité de la charge électrique éliminée sur la surface des matériaux isolants exposés à la décharge couronne générée par l'électrode de neutralisation ;
- 3) Optimisation du processus de neutralisation par décharge couronne générée par l'électrode de neutralisation à l'aide de la méthode des plans d'expériences ;
- 4) Etude de la neutralisation continue des matériaux granulaires séparés, en plaçant l'électrode de neutralisation sur le séparateur électrostatique à cylindre tournant.

Les bancs d'essais ont été réalisés au laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès. Ces bancs d'essais ont permis de mesurer la charge électrique et la masse des

matériaux isolants, avec des variations des paramètres électriques (niveau de tension, distance entre-électrodes, fréquence de la tension, etc...) et physiques (types de matériaux).

❖ **Les principales contributions originales sont les suivantes :**

- 1) Identification des problèmes de la charge statique et techniques à résoudre dans le domaine de la séparation électrostatique des mélanges des matériaux plastiques provenant d'équipements informatiques.
 - 2) Mise au point d'un système de chargement et de neutralisation permettant d'étudier expérimentalement la neutralisation des particules isolantes en vue d'éliminer les charges résiduelles qui représente un danger pour la sécurité des personnes.
 - 3) Réalisation d'un banc de caractérisation de l'état de charge des matériaux isolants après la neutralisation par mesure de la charge électrique. Le banc de mesure réalisé permet l'enregistrement de la charge électrique à l'aide d'un électromètre (keithley 6514), pour plusieurs situations et en faisant varier des paramètres expérimentaux.
 - 4) Modélisation du processus de la neutralisation des matériaux granulaires isolants chargés, par la méthode des plans d'expériences, en utilisant le logiciel MODDE 5.0.
 - 5) Démonstration de l'intérêt de l'utilisation de la méthode des plans d'expériences à la quantification des effets des facteurs et des interactions entre eux, afin d'exprimer le taux de neutralisation des produits : PVC, ABS, PA, HIPS, PC et câble électrique broyé par des modèles mathématiques.
 - 6) Identification des facteurs principaux qui affectent le processus de neutralisation des matériaux isolants avec l'évaluation de la charge électrique avant et après neutralisation. Ainsi, nous avons montré que le comportement des différents matériaux granulaires est influencé par le niveau de la haute tension appliquée, par la distance inter-électrodes, ainsi que par le débit du flux d'air injecté.
 - 7) L'évaluation de la neutralisation des charges électriques sur les matériaux isolants, par une décharge couronne, sinusoïdale, carré et rectangulaire, ainsi qu'en fonction de la fréquence du signal.
 - 8) Confirmation de la faisabilité de la neutralisation des matériaux isolants à la sortie du séparateur électrostatique à tambour rotatif, destiné au recyclage des déchets d'équipement électrique et électronique d'une façon online.
- ❖ Ce travail a permis de mettre en évidence aussi plusieurs perspectives de recherches prometteuses pour le progrès de la méthodologie de neutralisation des matériaux diélectriques chargés. Suite à l'expérience gagnée après l'achèvement de cette étude, le travail futur devrait se concentrer sur les questions suivantes :

- 1) Optimiser le dispositif de neutralisation en terme consommation de puissance électrique pour avoir à la fois une neutralisation efficace et moins couteuse.
- 2) Evaluer d'autres facteurs qui pourraient influencer la neutralisation ainsi que le déclin de la charge électrique à la surface des matériaux isolants tel que l'humidité qui nécessite des chambres spéciales pour le contrôle de température, humidité, etc...
- 3) Conception d'un nouveau dispositif de neutralisation de particules isolantes chargées issus des différents séparateurs électrostatiques en se basant sur les résultats trouvés avec le neutralisateur commercial utilisé dans ce travail de thèse.

Annexes

ANNEXE A

LOI DE STUDENT : $t(\alpha, v)$

v	α												
	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0.05	0.02	0.01	0.001
1	0.158	0.325	0.510	0.727	1.000	1.376	1.963	3.078	6.314	12.70	31.82	63.65	636.61
2	0.142	0.289	0.445	0.617	0.816	1.061	1.386	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	31.598
3	0.137	0.277	0.424	0.584	0.765	0.978	1.250	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	12.941
4	0.134	0.271	0.414	0.569	0.741	0.941	1.190	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	8.610
5	0.132	0.267	0.408	0.559	0.727	0.920	1.156	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	6.859
6	0.131	0.265	0.404	0.553	0.718	0.906	1.134	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.959
7	0.130	0.263	0.402	0.549	0.711	0.896	1.119	1.415	1.895	2.365	2.298	3.499	5.405
8	0.130	0.262	0.399	0.546	0.106	0.889	1.108	1.397	1.860	2.306	2.896	3.335	5.041
9	0.129	0.261	0.398	0.543	0.703	0.883	1.100	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	4.781
10	0.129	0.260	0.397	0.542	0.700	0.879	1.093	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.587
11	0.129	0.260	0.396	0.540	0.697	0.876	1.088	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.437
12	0.128	0.259	0.395	0.539	0.695	0.873	1.083	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	4.318
13	0.128	0.259	0.394	0.538	0.694	0.870	1.079	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	4.221
14	0.128	0.258	0.393	0.537	0.692	0.868	1.076	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	4.140
15	0.128	0.258	0.393	0.536	0.691	0.866	1.074	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	4.073
16	0.128	0.258	0.392	0.535	0.690	0.865	1.071	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	4.015
17	0.128	0.257	0.392	0.534	0.689	0.863	1.069	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.965
18	0.127	0.257	0.392	0.534	0.688	0.862	1.067	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.922
19	0.127	0.257	0.391	0.533	0.688	0.861	1.066	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.883
20	0.127	0.257	0.391	0.533	0.687	0.860	1.064	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.850
21	0.127	0.257	0.391	0.532	0.686	0.859	1.063	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.819
22	0.127	0.256	0.390	0.532	0.686	0.858	1.061	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.792
23	0.127	0.256	0.390	0.532	0.685	0.858	1.060	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.767
24	0.127	0.256	0.390	0.531	0.685	0.857	1.059	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.745
25	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.725
26	0.127	0.256	0.390	0.531	0.684	0.856	1.058	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.707
27	0.127	0.256	0.389	0.531	0.684	0.855	1.057	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.690
28	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.855	1.056	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.674
29	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.659
30	0.127	0.256	0.389	0.530	0.683	0.854	1.055	1.310	1.697	2.042	2.457	2.750	3.646
40	0.126	0.255	0.388	0.529	0.681	0.851	1.050	1.303	1.684	2.021	2.423	2.704	3.551
60	0.126	0.254	0.387	0.527	0.679	0.848	1.046	1.296	1.671	2.000	2.390	2.660	3.460
12	0.126	0.254	0.386	0.526	0.677	0.845	1.041	1.289	1.658	1.960	2.358	2.617	3.373
00	0.126	0.253	0.385	0.524	0.674	0.842	1.036	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	3.291

ANNEXE B

Table de Fisher-Snedecor de $t(v_1, v_2)$. $\alpha=5\%$

V2	V1									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	243	243.9	244.7	245.4	245.9	246.5	246.9	247.3	247.7	248
2	19.4	19.41	19.42	19.42	19.43	19.43	19.44	19.44	19.44	19.45
3	8.763	8.745	8.729	8.715	8.703	8.692	8.683	8.675	8.667	8.66
4	5.936	5.912	5.891	5.873	5.858	5.844	5.832	5.821	5.811	5.803
5	4.704	4.678	4.655	4.636	4.619	4.604	4.59	4.579	4.568	4.558
6	4.027	4	3.976	3.956	3.938	3.922	3.908	3.896	3.884	3.874
7	3.603	3.575	3.55	3.529	3.511	3.494	3.48	3.467	3.455	3.445
8	3.313	3.284	3.259	3.237	3.218	3.202	3.187	3.173	3.161	3.15
9	3.102	3.073	3.048	3.025	3.006	2.989	2.974	2.96	2.948	2.936
10	2.943	2.913	2.887	2.865	2.845	2.828	2.812	2.798	2.785	2.774
11	2.818	2.788	2.761	2.739	2.719	2.701	2.685	2.671	2.658	2.646
12	2.717	2.687	2.66	2.637	2.617	2.599	2.583	2.568	2.555	2.544
13	2.635	2.604	2.577	2.554	2.533	2.515	2.499	2.484	2.471	2.459
14	2.565	2.534	2.507	2.484	2.463	2.445	2.428	2.413	2.4	2.388
15	2.507	2.475	2.448	2.424	2.403	2.385	2.368	2.353	2.34	2.328
16	2.456	2.425	2.397	2.373	2.352	2.333	2.317	2.302	2.288	2.276
17	2.413	2.381	2.353	2.329	2.308	2.289	2.272	2.257	2.243	2.23
18	2.374	2.342	2.314	2.29	2.269	2.25	2.233	2.217	2.203	2.191
19	2.34	2.308	2.28	2.256	2.234	2.215	2.198	2.182	2.168	2.155
20	2.31	2.278	2.25	2.225	2.203	2.184	2.167	2.151	2.137	2.124
21	2.283	2.25	2.222	2.197	2.176	2.156	2.139	2.123	2.109	2.096
22	2.259	2.226	2.198	2.173	2.151	2.131	2.114	2.098	2.084	2.071
23	2.236	2.204	2.175	2.15	2.128	2.109	2.091	2.075	2.061	2.048
24	2.216	2.183	2.155	2.13	2.108	2.088	2.07	2.054	2.04	2.027
25	2.198	2.165	2.136	2.111	2.089	2.069	2.051	2.035	2.021	2.007
26	2.181	2.148	2.119	2.094	2.072	2.052	2.034	2.018	2.003	1.99
27	2.166	2.132	2.103	2.078	2.056	2.036	2.018	2.002	1.987	1.974
28	2.151	2.118	2.089	2.064	2.041	2.021	2.003	1.987	1.972	1.959
29	2.138	2.104	2.075	2.05	2.027	2.007	1.989	1.973	1.958	1.945
30	2.126	2.092	2.063	2.037	2.015	1.995	1.976	1.96	1.945	1.932
40	2.038	2.003	1.974	1.948	1.924	1.904	1.885	1.868	1.853	1.839
50	1.986	1.952	1.921	1.895	1.871	1.85	1.831	1.814	1.798	1.784
60	1.952	1.917	1.887	1.86	1.836	1.815	1.796	1.778	1.763	1.748
70	1.928	1.893	1.863	1.836	1.812	1.79	1.771	1.753	1.737	1.722
80	1.91	1.875	1.845	1.817	1.793	1.772	1.752	1.734	1.718	1.703
90	1.897	1.861	1.83	1.803	1.779	1.757	1.737	1.72	1.703	1.688
100	1.886	1.85	1.819	1.792	1.768	1.746	1.726	1.708	1.691	1.676
150	1.853	1.817	1.786	1.758	1.734	1.711	1.691	1.673	1.656	1.641

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1] UMOJA, *Développement Durable : une seconde vie pour les matières plastiques*, <http://www.congogreencitizen.org/>
- [2] A. Buekens, X. Zhou, *Recycling plastics from automotive shredder residues : a review*, Journal of Material Cycles and Waste Management, Vol. 16, N. 03, pp. 398-414, July 2014.
- [3] K. Haga, *Applications of the electrostatic separation technique*. Handbook of Electrostatic Processes J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowley, Eds, New York: Marcel Dekker, pp. 365-386, 1995.
- [4] L. Dascalescu, T. Zeghloul, and A. Iuga, *Electrostatic separation of metals and plastics from WEEE.*, WEEE Recycling. Reserch, Development, and Policies A. Chagnes, G. Cote, E. Ekberg, M. Nilsson, T. Retegan, Eds, Amsterdam: Elsevier, pp. 53-74, 2016.
- [5] A. Tilmatine, K. Medles, M. Younes, A. Bendaoud, and L. Dascalescu, *Roll-type versus free-fall electrostatic separation of tribocharged plastic particles*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 1564–1569, 2010.
- [6] L. G. Britton, *Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations*, American Institute of Chemical Engineers, 1999.
- [7] G. Luttgens and N. Wilson, *Electrostatic hazards*, Butterworth-Heinemann, 1997.
- [8] W. Boxleitner, *Electrostatic Discharge and Electronic Equipment*, IEEE Press, 1989.
- [9] Thomas H. Pratt, *Electrostatic Ignitions of Fires and Explosions*, Burgoyne Incorporated, Consulting Scientists & Engineers, Marietta, Georgia, 1997.
- [10] P. Intra and N. Tippayawong, *Effect of needle cone angle and air flow rate on electrostatic discharge characteristics of a corona-needle ionizer*, J. Electrostat., vol. 68, pp. 254 -260, 2010
- [11] A. D. Moore, *Electrostatics and Its Applications*, Wiley, New York, 1973.
- [12] J. S. Chang, A. J. Kelly, and J. M. Crowle, *Handbook of Electrostatic Processes*, Dekker, New York, 1995.
- [13] Y. Higashiyama, K. Asano, *Recent progress in electrostatic separation technology*, Particulate Science and Technology, Vol. 16, pp. 77-90, 1998.
- [14] I. I. Inculet, G.S.P. Castle, J.D. Brown, *Electrostatic separation of plastics for recycling*, Particulate Science and Technology, Vol. 16, No. 1, pp. 77-90, 1998.
- [15] D. K. Yanar, B. A. Kwetkus, *Electrostatic separation of polymer powders*, J. Electrostatics, Vol. 35, pp. 257–266, 1995.
- [16] A. Tilmatine, K. Medles, S. Bendimerad, F. Boukholda, L. Dascalescu, *Electrostatic separators of particles: application to plastic/metal, metal/metal and plastic/plastic mixtures*, Waste Management, Vol. 29, pp. 228-232, 2009.
- [17] A. Tilmatine and L. Dascalescu, *Set-point identification of a free-fall triboelectrostatic separation process for plastic particles*, International Journal of Environmental Studies, Vol. 67, No. 1, pp. 27–40, 2010.
- [18] N. Gibson, *Static electricity an industrial hazard under control*, J. Electrostatics, Vols. 40/41, pp. 21-30, 1997.
- [19] G. Lüttgens, G. Wilson, *Electrostatic Hazards*, Oxford University Press, U.K., Elsevier, 1997.
- [20] M. Kachi, M. Nemamcha, H. Lazhar, L. Dascalescu, *Neutralisation of charged insulating granular materials using AC corona discharge*, J. Electrostatics, Vol. 69, pp 296-301 2011.
- [21] B. Yahiaoui, B. Tabti, M. Magherbi, A. Antoniu, M.C. Plopeanu and L. Dascalescu, *AC corona neutralisation of positively and negatively charged polypropylene non-woven fabrics*, IEEE Trans. Diel. Elect. Insul. Vol. 20, pp. 1516-1522, 2013.
- [22] S. Atroune, A. Tilmatine, R. Alkama, A. Samuila, and L. Dascalescu, *Comparative experimental study of tribo-electric charging of two size-classes of granular plastics*, Part. Sci. & Technol., Vol.33, pp. 652-658, 2015.

- [23] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, A. Samuila, V. Neamtu, and I. Suarasan, *Corona charging of particulates in the corona field of roll-type electroseparators*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, pp. 1242-1251, 1994.
- [24] J. M. Crowley, *Fundamentals of applied electrostatics*, Morgan Hill, Laplacian Press, California, 1999.
- [25] C. H. Park, N. Subasinghe, H.S. Jeon, *Separation of covering plastics from particulate copper in cable wastes by induction electrostatic separation*, Materials Trans. Vol. 56, pp. 1140-1143, 2015.
- [26] J. Q. Feng, *Electro-hydrodynamic flow associated with unipolar charge current due to corona discharge from a wire enclosed in a rectangular shield*, J. Appl. Phys., Vol. 86, N° 05, pp. 2412-2418, September 1999.
- [27] J. Chen and J. H. Davidson, *Ozone production in the positive DC corona discharge : Model and comparison to experiments*, Plasma Chem. and Plasma Process., Vol. 22, N° 04, pp. 495-522, 2002.
- [28] T. Oda and J. Ochiai, *Charging characteristics of a non-woven sheet air filter*, in Proc. 6th International Symposium on Electrets, pp. 515-519, 1-3 September 1988.
- [29] L. Dascalescu, A. Iuga, R. Morar, V. Neamtu, I. Saurasan, A. Samuila, D. Rafiroiu, *Corona and electrostatic electrodes for high-tension separators*, J. Electrostat., vol. 29, no. 3, pp. 221-225, 1993.
- [30] A. Abahazem, *Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz*, Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III –Paul Sabatier, 2009.
- [31] B. Tabti, R. Mekideche, M. Plopeanu, L. Dumitran and L. Dascalescu, *Corona charging and charge decay characteristics of non-woven filter media*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 634-640, 2010.
- [32] A. Antoniu, B. Tabti, M. Plopeanu and L. Dascalescu, *Accelerated discharge of corona-charged non-woven fabrics*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 46, pp. 1188-1193, 2010.
- [33] A. Reguig, *Contribution à l'étude expérimentale et numérique de la décharge couronne dans différents types de configurations d'électrodes*, Thèse de Doctorat, Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbes, Juin 2017.
- [34] A. Bouteffaha, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Plopeanu, L. Dascalescu, *Experimental and numerical characterization of corona discharge generated by a triode electrode system*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 51, N° 03, pp. 2513-2519, 2015.
- [35] T. Butunoi, G. Gagi, M. Bilici, A. Samuila, V. Neamtu, R. Morar, L. Dascalescu, A. Luga, *Electric and electronic equipment of a research-oriented electrostatic separator*, 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, Romania, 2010.
- [36] W. R. Harper, *Contact and frictional electrification*, Laplacian Press Morgan Hill, California, 1998.
- [37] A. Iuga, L. Calin, V. Neamtu, A. Mihalcioiu, L. Dascalescu, *Tribocharging of plastics granulates in a fluidized bed device*, J. Electrostat, Vol. 63, pp. 937-942, 2005.
- [38] M. Blajan, R. Beleca, A. Iuga, and L. Dascalescu, *Triboelectrification of granular plastic wastes in vibrated zigzag-shaped square pipes in view of electrostatic separation*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol 46, pp.1558 –1563, 2010.
- [39] G. Buda, A. Samuila, S. Atroune, M. Bilici, L. Dascalescu, *Set point identification of a tribocharging process for mixed granular solids*, J. Electrostat. Vol. 71, pp. 407-412, 2013.
- [40] L. H. Lee, *Dual mechanism for metal polymer contact electrification*, J. Electrostat. Vol. 32, pp. 1-29, 1994.
- [41] G. Touchard, A. Zergouni, S. Watanabe, J. Borzeix, *Evolution de la charge électrique d'une particule heurtant une paroi solide*, J. of Physics, France, vol. 1, pp. 1233-1241, 1991.
- [42] C. Liu, and A.J. Bard, *Electrons on dielectrics and contact electrification*, Chemical Physics Letter, vol. 480, issues 4-6, pp. 145-156, 2009.
- [43] L. S. Mc Carty, and G.M. Whitesides, *Electrostatic charge due to separation of ions at interfaces: Contact electrification of ionic electrets*, Angewandte Chemie International Edition, vol. 47, pp. 2188, 2008.
- [44] L. B. Schein, and G.S.P. Castle, *Triboelectricity*, Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering. pp. 574-585, 1999.
- [45] O. Knoblauch, *Expériences sur la tribo-électricité*, Physical Chemistry, vol. 39, pp. 225, 1902.

- [46] A. F. Diaz, *Contact electrification of materials: The chemistry of ions on polymer surfaces*, J. Adhesion, vol. 67, pp. 111, 1998.
- [47] R. Kacprzyk, C. Stec, *Measurements of the surface charge density on moving webs*, J. Electrostatics, Vol.40-41, pp.455-46, 1997.
- [48] Trifield, Tribo-electric series, <https://www.alphalabinc.com/content/tribo-electric-series/>
- [49] M. Miloudi, K. Medles, A. Tilmatine, M. Brahami, L. Dascalescu, *Modeling and optimization of a propeller-type tribocharger for granular materials*, J. Electrostat., vol. 69, pp. 631–637, 2011.
- [50] A. Benabboun, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, L. Dascalescu, *Etude expérimentale des procédés d'acquisition de charge triboélectrique pour séparateurs électrostatiques de particules de déchets en plastique*, Conférence Francophone sur l'Eco-conception en Génie Electrique (Confrege 2012), Montréal Canada, 28-30 Mai 2012.
- [51] L. Dascalescu, A. Urs, S. Bente, M. Huzau, A. Samuila, *Charging of mm-size insulating particles in vibratory devices*, J. Electrostatics, vol. 63, pp. 705-710, 2005.
- [52] D. E. Fekir, F. Miloua, K. Medles, L. Dascalescu, *New propeller-type tribo-charging device with application to the electrostatic separation of granular insulating materials*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 53, pp. 2416-2422, 2017.
- [53] M. M. Zelmat, M. Rizouga, K. Medles, L. Dascalescu, *Experimental comparative study of different tribocharging devices for triboelectric separation of insulating particles*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 49, pp. 1113-1118, 2013.
- [54] J. Li, G. Wu, Z. Xu, *Tribo-charging properties of waste plastic granules in process of tribo-electrostatic separation*, Waste Management, Vol. 35, pp. 36–41, 2014.
- [55] M. Blajan, A. Samuila, V. Neamtu, R. Beleca, L. Caliap, D. Vadan, A. Iuga, L. Dascalescu, *Experimental modeling of particle electrification in vibrated zigzag shaped metallic tubes*, Proceedings of ESA/IEJ/IEEE-IAS/SFE Joint Conference on Electrostatics, University of California, and Berkeley. California, pp. 538-543, 2006.
- [56] Y. Higashiyama, Y. Ujiie, K. Asano, *Triboelectrification of plastic particles on vibrating feeder laminated with a plastic film*, J. of Electrostatics, vol. 42, pp. 63-68, 1997.
- [57] G. Buda, M. Bilici, A. Samuila, L. Dascalescu, *Experimental study of the tribocharging proces of plastic granular materials on a vibratory feeder device*, IEEE Trans. Diel. Elect. Insul., vol. 20, pp. 1489-1496, 2013.
- [58] S. Kazmierczak, P. Anglaret, J. Filippi, *Technologie génie chimique*, Centre régional de documentation pédagogique, Tome 3, 1989.
- [59] S. L. Escalante, G. Touchard, G. Dominguez, *Electrification study in dielectric material fluidized beds for different fluidization regimes*, Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, pp.694-697, Cancun, Mexico, 2002.
- [60] L. Calin, A. Mihalciou, A. Iuga, L. Dascalescu, *Fluidized bed device for plastic granules triboelectrification*, Part. Sci. & Technol., Vol.25, pp. 205-211, 2007.
- [61] A. V. Antoniu, *Contributions to the study of certain electrostatic hazards in the manufacturing process of electronic devices and circuits*, Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Novembre 2010.
- [62] T. Hammi, *Etude de méthodes de mesures et réalisation d'un banc de test pour l'évaluation des propriétés électrostatiques des textiles*, Thèse de doctorat, Université des sciences et technologies de Lille, Avril 2005.
- [63] M. Glor, *Ignition hazards caused by electrostatic charges in industrial processes*, Magazine, Swiss Institute of Safety and Security Peter Thurnherr, thuba Ltd, Février 2015.
- [64] S. Giraldo, *Etude de la robustesse d'amplificateurs embarqués dans des applications portables soumis à des décharges électrostatiques (ESD) au niveau système*, Thèse de doctorat, Université Toulouse Paul Sabatier, Juillet 2013.
- [65] A. Wolf, *A history of Science, technology, and philosophy in the eighteenth century*, J. Chemical Education pp. 50, 1940.
- [66] M. Ieda, G. Sawa, U. Shinihawa, *A decay process of surface electric charges across polyethylene films*, J. Appl. Phys., Vol. 6, pp. 793-794, 1967.

- [67] M. M. Shahin, *Nature of charge carriers in negative corona*, Applied Optics, Vol. 8, Issue S1, pp. 106-110, 1969.
- [68] H. Von Berlepsch, *Interpretation of surface potential kinetics in HDPE by a trapping model*, J. Phys. D: App. Phys., Vol. 18, pp. 1155-1170, 1985.
- [69] J. A. Giacometti, O. N. Oliveira Jr., *Corona charging of polymers*, IEEE Trans. on Elect. Insul. Vol. 27, N° 05, pp. 924-943, 1992.
- [70] J. Kindersberger, C. Lederle, *Surface charge decay on insulators in air and sulfur hexafluorid - part II: measurements*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, pp. 949-956, 2008.
- [71] P. Molinie, M. Goldman, J. Gatellet, *Surface potential decay on corona charged epoxy samples due to polarization processes*, J. Phys. D: App. Phys., Vol. 28, pp. 1601-1610, 1995.
- [72] A. Neves, H. J. A. Martins, *Surface charging and charge decay in solid dielectrics*, IEEE Int. Sym. on Electrical Insulations, pp. 782-786, Montreal, Quebec, Canada, 1996.
- [73] P. Molinie, *Measuring and modeling transient insulator response to charging: the contribution of surface potential studies*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No. 5, pp. 939-950, 2005.
- [74] E. A. Baum, T. J. Lewis, R. Toomer, *Decay of electrical charge on polyethylene films*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 10, pp. 487-497, 1977.
- [75] G. Teyssedre, C. Laurent, *Charge transport modeling in insulating polymers : from molecular to macroscopic scale*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 12, No.5, pp. 857-875, 2005.
- [76] H. J. Wintle, *Decay of static electrification by conduction processes in polyethylene*, J. Appl. Phys., Vol. 41, pp. 4004-4007, 1970.
- [77] J. Lowell, *Surface conduction and absorption currents in polymers*, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 15, pp. 109-117, 1982.
- [78] Z. Ziari, *Etude de l'effet d'un traitement par plasma froid sur les propriétés de surface d'un film de polymère*, Thèse de doctorat, Université Mentouri de Constantine, Mars 2008.
- [79] J. Kindersberger, C. Lederle, *Surface charge decay on insulators in air and sulfur hexafluorid - part I: simulations*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 15, No. 4, pp. 941-948, 2008.
- [80] J. A. Voorthuyzen, W. Olthusis, P. Bergverd, *Research and development of miniature electrets*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 24, No. 2, pp. 255- 266, 1989.
- [81] I. M. Hutten, *Handbook of Nonwoven Filter Media*, Elsevier, Amsterdam, 2007.
- [82] D. B. Purchas, K. Sutherland, *Handbook of Filter Media*, Elsevier, Amsterdam, 2002.
- [83] C. Dragan, M. Bilici, S. Das, L. Dascalescu, *Triboelectrostatic phenomena in suction-type dilute-phase pneumatic transport systems*, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 16 No.3 pp. 661-667, 2009.
- [84] J. S. Chang, *Neutralization theory of static surface charges by an ionizer under wide gas pressure environments*, IEEE Transactions on industry applications, Vol. 37, N°6, 2001.
- [85] A. Steinman, *Air ionization: the basics of air ionization for high-technology manufacturing applications*, tutorial presented at the 27th Annual EOS/ESD Symposium, Anaheim, CA, September 11-16, 2005.
- [86] C. G. Noll, *Electrostatic charge elimination techniques*, Handbook of electrostatic processes. Marcel Dekker, New York, 1995.
- [87] **K. Daioui**, M. Rezoug, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, *Neutralisation des matériaux granulaires isolants initialement chargés*, présenté à la 10^{ème} conférence de la société française de l'électrostatique (SFE), Poitiers, France, 29-31 août 2016.
- [88] A. Ohsawa, *Precisely balanced ionizer using atmospheric pressure glow discharge in air*, Journal of Electrostatics. Vol. 63, pp. 45-57, 2005.
- [89] A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, M. Blajan, M. Rahli, L. Dascalescu, *Caractérisation expérimentale des électrodes couronne de type Dual*, Journal of Electrostatics. Vol. 64, pp. 431-436, 2006.
- [90] A. Bendaoud, L. Dascalescu, M. Blajan, A. Samuila, A. Stochita, P. V. Notingher, *Corona charging of surface granular layers of insulating particles at the surface of a grounded electrode*, Journal of Electrostatics. Vol. 63, pp. 643-647, 2005.

- [91] M. Rezoug, *Contribution à l'étude de la neutralisation des charges électriques dans les particules isolantes*, Thèse de Doctorat, Université Djilali Liabès de Sidi Bel-Abbes, 2015.
- [92] Z. Hruska, P. Guesnet, C. salin, J. J. Couchoud, Poly (chlorure de vinyle) ou PVC, <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermoplastiques-monographies-42147210/poly-chlorure-de-vinyle-ou-pvc-am3325/>.
- [93] S. Messal, *Procédés de séparation électrostatique de matériaux pulvérulents. Applications au recyclage des déchets et dans l'industrie agro-alimentaire*, Thèse de doctorat, université de Poitiers, Décembre 2016.
- [94] *The universal selection source : Plastics and Elastomers*, <https://omnexus.specialchem.com/selection-guide/polyamide-pa-nylon>.
- [95] J. Marcher, *Separation and recycling of wire and cable scrap in the cable industry*, Wire Journal. International, Vol. 17, pp. 106–114, 1984.
- [96] S. Zhang, E. Forssberg, *Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap*, Resour. Conserv. Recy, Vol. 21, pp. 247–269, 1997.
- [97] C. H. Park, H. S. Jeon, B. G. Cho, J. K. Park, *Triboelectrostatic separation of covering plastics in chopped waste electric wire*, Polym. Eng. Sci, Vol. 47, pp. 1975–1982.
- [98] H. S. Jeon, C. H. Park, B. G. Kim, J. K. Park, *The development of electrostatic separation technique for recycling of life circles waste plastic*, Journal of the Korean Institute of Resources Recycling, Vol. 15, N°01, pp. 28–36, 2006.
- [99] M. Abdel-Salam, *Influence of humidity on charge density and electric field in electrostatic precipitators*, Journal of Physics. D: Applied Physics, Vol. 25, pp. 1318-1322, 1992.
- [100] J. F. Hughes, *Electrostatic Powder Coating*, Wiley, New York, 1985.
- [101] O. C. Ralston, *Electrostatic Separation of Mixed Granular Solids*, Elsevier Pub, Amsterdam, 1961.
- [102] L. Brands, P. M. Beier, I. Stahl, *Electrostatic Separation*, Ullmanns Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2001.
- [103] A. Iuga, L. Dascalescu, R. Morar, I. Csorvassy, V. Neamtu, *Corona-electrostatic separators for recovery of waste non-ferrous metals*, J. Electrostat., Vol. 23, pp. 235–243, April 1989.
- [104] J. F. Delon, *Théorie de la séparation électrostatique à l'aide de l'effet corona*, Annales des Mines, Vol. 3, pp. 37–50, 1996.
- [105] G. S. P. Castle, *Contact charging between insulators*, Proceedings of the 8th International Conference on Electrostatics, J. Electrostat. Vol. 40 & 41 pp. 13–20, Poitiers, 1997.
- [106] **K. Daoui**, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, *Neutralisation des matériaux granulaires isolants initialement chargés*, présenté à la Premières Journées Doctorales de Génie Electrique, Faculté de Génie Electrique, UDL Sidi Bel Abbes, 4-5 Décembre 2017.
- [107] L. Dascalescu, A. Tilmatine, F. Aman, M. Mihailescu, *Optimization of electrostatic separation processes using response surface modeling*, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 40, No. 1, pp. 53–59, Jan./Feb. 2004.
- [108] L. Dascalescu, R. Tobazeon, P. Atten, *Behaviour of conductive particles in corona-dominated electric fields*, J. Phys. Vol. 28, pp. 1611–1618, 1995.
- [109] L. Dascalescu, A. Mizuno, R. Tobazeon, P. Atten, A. Iuga, R. Morar, M. Mihailescu, A. Samuila, *Charges and forces on conductive particles in roll-type corona-electrostatic separators*, IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 31, No. 5, pp. 947–956, 1995.
- [110] Z. Xu, L. Zhang, G. Chen, *Decay of electric charge on corona charged polyethylene*, Journal of Physics D: Applied Physics. Vol.40, pp.7085–7089, 2007.
- [111] J. N. Chubb, *Corona charging of practical materials for charge decay measurements*, Journal of Electrostatics, Vol. 37, pp. 53-65, 1996.
- [112] J. Chubb, *New approaches for electrostatic testing of materials*, Journal of Electrostatics, Vol. 54, pp. 233–244, 2002.
- [113] T. A. Yovcheva, I. A. Avramova, G. A. Mekishev, T. S. Marinova, *Corona-charged polypropylene electrets analyzed by XPS*, Journal of Electrostatics, Vol. 65, pp. 667–671, 2007.

- [114] **K. Daioui**, A. Bendaoud, A. Tilmatine, K. Medles, L. Dascalescu, *Neutralisation des matériaux isolants à la sortie d'un séparateur électrostatique*, présenté à la Journée doctorale en Génie électrique (JDGE-2016), Sidi Bel-Abbès, 15 décembre 2016.
- [115] A. Benabboun, *Contribution à l'étude de la séparation des particules fines pour application dans l'industrie alimentaire*, Thèse de doctorat, Université Djillali Liabès de Sidi-Bel-Abbès, Juin 2016.
- [116] J. Goupy, *Plans d'expériences : techniques de l'ingénieur. traité analyse chimique et caractérisation*, Dunod, P. 230, pp. 1-20, 1992.
- [117] J. Goupy, *Pratiquer les plans d'expériences*, Dunod. Paris, 2005.
- [118] MODDE 5.0, *User Guide and Tutorial*, Umetrics AB, Umea, Sweden, 1999.
- [119] A. Ohsawa, *Efficient charge neutralization with an AC corona ionizer*, Journal of Electrostatics Vol. 65, pp. 598-606, 2007.
- [120] **K. Daioui**, M. Rezoug, A. Bendaoud, K. Medles, L. Dascalescu, *Neutralisation of electrically-charged insulating granular materials*, IEEE Trans. Diel. Elect. Insul., Vol. 25, N° 02, pp. 441-447, April 2018.
- [121] L. C. Thanch, *Back corona. Part I: its formation*, Journal of Electrostatics Vol. 6, pp. 139-160, 1979.
- [122] S. Masuda, A. Mizuno, *Initiation condition and mode of back discharge*, Journal of Electrostatics Vol. 4, pp. 35-52, 1977.
- [123] M. Kachi, L. Dascalescu, L. Herous, M. Nemamcha, *Experimental Study of Charge Neutralization at the Surface of Granular Layers of Insulating Materials,* IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 49, N°2, pp. 691-698, Mar./Apr. 2013.
- [124] K. U. Riemann, *Theoretical analysis of the electrode sheath in RF discharges*, J. Appl. Phys. Vol. 65, pp. 999-1004, 1989.
- [125] E. Nasser, *Fundamentals of Gaseous ionization and plasma electronics*, Wiley-Interscience, New York, 1971.
- [126] **K. Daioui**, A. Bendaoud, K. Medles, A. Tilmatine, L. Dascalescu, *Neutralisation des matériaux Granulaires Isolants Chargés par Diverses Formes de Tension*, soumis à la 11^{ème} conférence de la société française de l'électrostatique (SFE), Grenoble, France, 29-31 août 2018.

Titre : " Utilisation des tensions alternatives pour la neutralisation des matériaux granulaires chargés "

Résumé : L'objectif principal de cette thèse est l'étude de l'efficacité de la neutralisation électrostatique des matériaux granulaires isolants chargés issus de procédé du recyclage des DEEE. Les recherches se sont focalisées sur un système de neutralisation composé d'un neutralisateur de charge commercial alimenté à partir d'un générateur de tension. L'étude s'est déroulée sur deux installations : (1) Le premier travail est effectuée sur une installation expérimentale conçue et réalisée pour caractériser l'état de charge des matériaux isolants avant et juste après neutralisation. Cette installation permet de tester l'efficacité de la neutralisation dans plusieurs situations et paramètres opératoires. (2) le deuxième travail est effectué sur un séparateur électrostatique déjà réalisé au niveau du laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel-Abbès. Le système de neutralisation placé à la sortie de ce séparateur permet de tester l'efficacité de neutralisation d'une façon continue. Le système de mesures simultanées de la masse et de la charge électrique des produits récupérés a facilité l'analyse des effets sur le processus de neutralisation. Les recherches menées dans cette thèse ont permis d'ajuster les paramètres de neutralisation pour une neutralisation efficace quel que soit le type des matériaux isolants traités ou le niveau de la charge acquise. L'utilisation de la méthodologie des plans d'expériences a permis d'identifier les facteurs influents et de trouver le point de fonctionnement optimal.

Mots clés : Décharge couronne, Procédés électrostatiques, Charge électrique, Neutralisation, Matériaux isolants, Plan d'expériences.

Title : " Use of alternative voltages for the neutralization of charged granular materials "

Abstract : The main objective of this thesis is the study of the electrostatic neutralization efficiency of charged insulating granular materials resulting from the WEEE recycling process. The research focused on a neutralization system consisting of a commercial neutralizer of charge from a voltage generator. The study was carried out on two installations : (1) The first work is carried out on an experimental installation conceived and realized to characterize the state of charge of the insulating materials before and just after neutralization. This installation makes it possible to test the effectiveness of the neutralization in several situations and operating parameters. (2) The second work is carried out on an electrostatic separator made at the APELEC laboratory of the University of Sidi Bel-Abbès. The neutralization system placed at the outlet of this separator makes it possible to test the neutralization efficiency in a continuous manner. The system of simultaneous measurements of the mass and electrical charge of the recovered products facilitated the analysis of the effects on the neutralization process. The research carried out in this thesis has made it possible to adjust the neutralization parameters for effective neutralization whatever the type of insulating materials treated or the level of the charge acquired. The use of the experimental design methodology helped to identify the influencing factors and to find the optimal operating point.

Keywords: Corona discharge, Electrostatic processes, Electrical charge, Neutralization, Insulating materials, Plan of experiences.

عنوان : " استخدام التيار المتردد لتحديد المواد الحبيبية المشحونة "

ملخص : الهدف الرئيسي من هذه الرسالة هو دراسة كفاءة إبطال الكهرياء الساكنة للمواد العازلة المشحونة الناتجة عن عملية إعادة تدوير مخلفات المعدات الكهربائية والإلكترونية. ركزت الدراسة على نظام تحييد يتكون من محايد الشحنة الكهربائية التجاري تعمل بالطاقة من مولد الجهد. أجريت الدراسة على تركيبين: (1) أجري العمل الأول على تركيب تجريبي مصمم ومُحقق لتوصيف حالة شحن المواد العازلة قبل وبعد التحييد مباشرة. هذا التثبيت يجعل من الممكن اختبار فعالية المحاييد في العديد من الحالات ومعاملات التشغيل. (2) و أجري العمل الثاني على فاصل كهرياء تم تصنيعه في مختبر APELEC جامعة سيدي بلعباس. إن نظام التحييد الموصل عند مخرج هذا الفاصل يجعل من الممكن اختبار كفاءة المحاييد بطريقة مستمرة. نظام القياسات الانني للكتلة والشحنة الكهربائية الخاصة بالمواد التي تم جمعها يسهل تحليل عملية إبطال الكهرياء الساكنة. جعلت هذه الأبحاث من الممكن تعديل معايير للتحديد الفعال للكهرباء الساكنة أيأ كانت أنواع المواد العازلة المعالجة أو مستوى الشحنة المكتسبة. استخدام منهجية خطة التجارب تساعد على تحديد تأثير كل عامل وإيجاد حالة التشغيل المثلى.

الكلمات المفتاحية : كورونا التفريغ، تقنيات الكتر وستاتيك، الشحنة الكهربائية، إبطال الكهرياء الساكنة، المواد العازلة، خطة التجارب.