

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira de Bejaia



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

MEMOIRE

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

PRESENTE POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER ACADEMIQUE

DOMAINE: SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Filière: Electrotechnique

Option: Electrotechnique industriel

Thème

Etat de L'Art du Dépoussiérage Électrostatique

Réaliser par :

- BOUCHEBBAH Walid
- ALLOUACHE Boualem

Encadrer par :

- Mr. ATROUNE Salah

Année Universitaire : 2021/2022

REMERCIEMENTS

Avant tous, je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir donnée le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Mes sincères remerciements vont en premier lieu, à mon encadrant : Dr. **ATROUNE SALAH**, pour son encadrement tout le long de ce projet et pour son aides, orientations et conseils très efficaces pour l'élaboration de ce travail de recherche.

Mes gratitudee sont aussi destinées à tous ce qui ont contribués de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

À tout je suis très reconnaissant.

Merci !

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A mes chers parents : ma Mère et mon Père ;

A mes frères.

Sans oublier mon cher amie **GUENDOUZ ANIS** pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Walid & Boualem

Sommaire

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

I.1 Introduction	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Définition de L'électrostatique	4
I.4 Principe de l'électrostatique	4
I.5 La charge électrique	5
I.6 Types de charges	6
I.6.1 Charge ponctuelle	6
I.6.2 Charges continues	6
I.6.2.1 Charge volumique	6
I.6.2.2 Charge surfacique	6
I.6.2.3 Charge linéique	7
I.7 Effet des charges électriques.....	7
I.8 Propriétés des charges	7
I.8.1 Quantification de la charge	7
I.8.2 Conservation de la charge	8
I.9 Interaction électrique	8
I.9.1 Loi de Coulomb	8
I.10 Champ électrique	8
I.11 Conclusion	9

CHAPITRE II :

Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.1 Introduction	10
II.2 Propriétés de la poussière	10

II.2.1 Effets de la diffusion de la poussière dans l'atmosphère sur l'efficacité du module PV	10
II.2.2 Effets du dépôt de poussière sur la transmittance lumineuse de la surface du module.....	11
II.2.3 Effet poussière sur le module PV	11
II.2.4 Ombrage partiel du panneau avec dépôt de poussière	12
II.2.5 Augmentation de la température du module en raison du dépôt de poussière..	12
III.2.6 L'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques	12
II.3 Facteurs influent sur le dépôt de poussière	13
II.4 Nettoyage des panneaux solaires	14
II.5 Nettoyage avec un chiffon	14
II.5.1 Principe de base de cette méthode.....	14
II.6 Nettoyages photo catalyse	14
II.6.1 Photos catalyse cellule solaire	14
II.7 Nettoyage électrostatique	15
II.7.1 Fonctionnement du nettoyage par champ électrostatique.....	15
II.7.2 Montage électrique de champ électrostatique	15
II.9 Conclusion	15

Chapitre III

Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

III.1. Introduction.....	16
III.2. Principe des rideaux électriques	16
III.2.1. Rideaux électriques multi-phases	16
III.2.2. Rideaux électriques à ondes stationnaires	17
III.3 Applications du rideau électrique à onde stationnaire.....	18
III.4 Expériences de Calle, Sharma et Mazumder	19
III.5. Expériences de Kawamoto et Shibata	21
III.6 Etude expérimentale du convoyeur à ondes mobiles.....	22
III.6.1 Montage expérimental.....	22

III.6.2 Conception du convoyeur à ondes mobiles	23
III.7 Chargement par décharge couronne	25
III.8 Onde stationnaire	27
III.9 Caractéristique d'une onde stationnaire.....	28
III.10 Conclusion	29
Conclusion Générale	31
Référence Bibliographie	32

Introduction Générale

Introduction Générale

Les phénomènes qui régissent l'électrostatique, sont la plupart des cas utilisés dans différents domaines industrielle, telles que : peinture et revêtements électrostatiques, industries pharmaceutiques, alimentaires, photographie, séparation électrostatique de particules, **etc...** [1].

L'électrostatique utilisée dans ces procédés, est très avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques, car elles ne nécessitent pas de pièces mobiles, ils se caractérisent par une faible consommation d'énergie, et réduisent les coûts d'exploitation et de maintenance.

Dans la plupart des cas on trouve l'effet de la force de Coulomb pour le contrôle du mouvement des particules au moyen de leurs charges, comme dans le cas des précipitation et séparateurs électrostatiques [2-4].

Les particules peuvent être chargées par l'utilisation des décharges à effet couronne ou par polarisation diélectrique [5-11], ou par des effets triboélectriques qui se produisent lorsque les particules entrent en collision les unes avec les autres ou avec les parois des dispositifs dédiés [8,9].

Les convoyeurs électrostatiques, connus aussi sous les noms : rideaux électriques [13], écran électrodynamique [14] ou bouclier anti-poussière électrodynamique [15] pour certaines applications, se présentent comme un moyen avantageux pour manipuler des particules sur des surfaces. L'intérêt de la communauté électrostatique pour ces dispositifs ne cesse de s'agrandir.

A travers le premier chapitre, on a fait une synthèse de quelques notions de bases qui régit l'électricité statique. Dans le deuxième chapitre on a pu mettre en évidence quelques phénomènes qui entre avent l'efficacité de la production de l'énergie électrique par des panneaux photovoltaïques. Parmi ces entraves, on s'est intéressé à l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux PV. Différentes méthodes sont utilisées pour le nettoyage de ces panneaux on trouve le nettoyage par jet d'eau ou autre. Ces différentes méthodes sont limitées et nécessitent de grand moyen humain et financier. Pour cela, nous nous intéressons aux méthodes de nettoyage par l'électrostatique ou ce que nous appelons le dépoussiérage électrostatique qui ne demande pas de grand moyen énergétique pour que ce système fonctionne.

Introduction Générale

Et en fin dans le troisième chapitre, on a pu présenter les différentes techniques de dépoussiérage à travers quelques travaux de recherche qui commence à être développé de plus en plus.

CHAPITRE I :
Généralités Sur électrostatiques

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

I.1 Introduction

Les lampes de chambre, les horloges électriques, les microphones, les calculateurs, les téléviseurs, les ordinateurs ne fonctionnent qu'en présence de l'électricité. Les voitures, les trains, les avions et même les fusées ne peuvent se mettre en marche sans l'électricité.

Le corps humain a besoin d'électricité pour la contraction de ses muscles le cœur, par exemple. Le système nerveux est à la base de l'électricité. Les atomes et les molécules et toutes les réactions chimiques existent à cause de l'électricité [16].

Si jamais les phénomènes liés à l'électricité cessent d'exister le monde autour de nous s'écroulera, afin de se mettre sur la route qui mène vers la compréhension de la physique de ces phénomènes très complexes, il est utile et même obligatoire de commencer par aborder une branche de la physique, et non des moindres, appelée : électrostatique.

I.2 Historique

C'est aux alentours de 600 ans avant Jésus-Christ que Thalès de Millet observa, qu'en frottant une tige d'ambre avec une peau de chat, il créait un phénomène d'attraction des corps légers par la tige d'ambre. Il nomma ce phénomène «elektron», ce qui en grec désigne l'ambre jaune qui est une résine fossile [17].

Cette découverte ne trouve pas d'application pratique jusqu'au début du 17ème siècle où Otto de Guericke, Bourgmestre de Magdebourg va la compléter en utilisant plusieurs corps différents comme le rubis, le saphir et l'améthyste. Il va même créer une machine permettant d'obtenir des frottements en utilisant une boule de soufre qui était frottée en tournant autour d'un axe qui la traversait. Ce fut la première machine électrostatique qui produisait de l'électricité statique qui engendrait des étincelles (**Figure I.1**).



Figure I.1 Première machine électrique d'Otto de Guericke [2]

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

Une nouvelle étape sera franchie avec Stephen Gray qui montre que l'on peut véhiculer l'électricité par des fils de soie, de métal, ou même à travers le corps humain à des substances qui ne la possèdent pas. Il parvient même à produire l'électrification sans contact (aujourd'hui nous disons par influence). Il va diviser les corps en conducteurs et non conducteurs (isolants). À ce moment-là, on admit l'existence d'un fluide électrique qui peut se propager dans les conducteurs et que l'on peut même stocker dans des appareils que l'on nommerait aujourd'hui condensateurs et dont le prototype est la bouteille de Leyde (**Figure I.2**) [17].

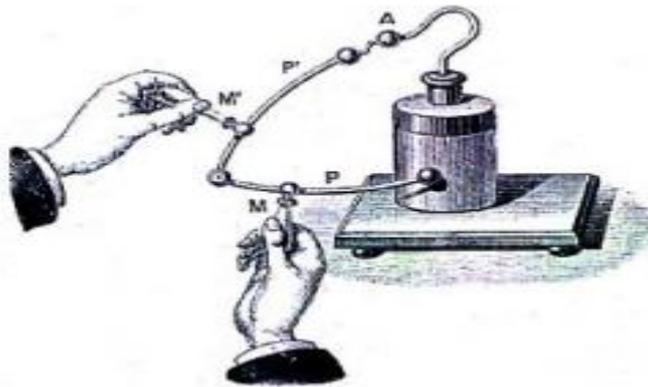


Figure I.2 La bouteille de Leyde [2]

I.3 Définition de L'électrostatique

L'électrostatique est une branche de la physique qui étudie les phénomènes créés par les charges électrostatiques pour l'observateur. La loi obtenue peut être généralisée à des systèmes variables (quasi-électrostatiques), à condition que la répartition des charges puisse être considérée comme étant en équilibre à tout moment. Ces lois décrivent donc correctement les condensateurs dans les circuits même s'ils fonctionnent à des fréquences très élevées.

On sait depuis l'antiquité que certains matériaux, dont l'ambre, attirent les petits objets lorsqu'on les frotte. L'ambre en grec, ἤλεκτρον (électron), porte son nom dans de nombreux domaines scientifiques. L'électrostatique décrit précisément la force que les charges exercent les unes sur les autres : c'est la loi de Coulomb. Cette loi stipule que la force F exercée par une charge Q sur une autre charge q est proportionnelle au produit de ces deux charges et inversement proportionnelle au carré de la distance qu'elles les séparent[17].

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

Bien qu'elles paraissent relativement faibles à notre échelle, l'électricité statique est très puissante. Entre les éléments chargés (principalement les protons et les électrons), ils sont 40 ordres de grandeur plus lourds que la gravité.

Si elles nous paraissent si faibles, c'est précisément à cause de l'intensité de ces forces que les charges positives et négatives sont contraintes de s'équilibrer presque parfaitement, tandis qu'à l'échelle macroscopique, les forces attractives et répulsives s'annulent. En fait, pour comprendre leur véritable pouvoir, nous devons réaliser que ce sont eux qui empêchent les solides de s'interpénétrer et qui maintiennent ensemble les matériaux les plus durs. Si nous réussissons à retirer la dernière couche d'électrons d'un atome, la matière ne se décomposera que sous les forces répulsives créées entre les noyaux.

I.4 Principe de l'électrostatique

L'électrostatique est basée sur des formules pour analyser les forces potentielles et les interactions entre différents acteurs potentiellement chargeables. La loi de Coulomb analyse la force d'interaction électrique entre deux charges et est donc à la base de cette branche. Aujourd'hui, l'électrostatique est largement utilisée dans l'étude des matériaux antistatiques. Puis vint le problème d'éviter l'électrification des objets en libérant automatiquement toute puissance.

I.5 La charge électrique

On ne peut définir la charge que :

- par l'effet qu'elle produit
- par ses propriétés

Qu'est-ce qu'on entend par particule chargée ?

Les particules :

-Electron :

Charge : - $1,62 \cdot 10^{-19} \text{C}$

Masse : $0,911 \cdot 10^{-30} \text{kg}$

-Proton :

Charge : + $1,62 \cdot 10^{-19} \text{C}$

Masse : $1672 \cdot 10^{-30} \text{kg}$

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

La matière électrisée (corps chargé), En général, la matière est neutre, mais elle peut être électrisée.

Ionisation : le nombre d'électrons est modifié (perte ou gain) - polarisation : modification de la répartition des charges

I.6 Types de charges

I.6.1 Charge ponctuelle

Une charge ponctuelle est un modèle idéal pour une particule chargée électriquement, c'est une charge située en un point sans dimension.

I.6.2 Charges continues

On trouve deux types de charge, charge volumique et charge surfacique.

I.6.2.1 Charge volumique

En électrostatique, la densité volumique de la charge, souvent notée ρ , est la quantité nette de charge électrique par unité de volume. Dans le système international, son unité est le coulomb par mètre cube [$C.m^{-3}$] (voir figure I.3).

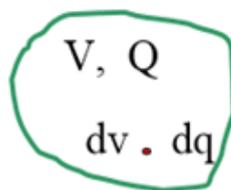


Figure I.3 charge volumique

I.6.2.1 Charge surfacique

La densité surfacique de charge, souvent notée σ , est la quantité de charge électrique par unité de surface voir (Figure I.4).



Figure I.4 charge surfacique

CHAPITRE I : Généralités Sur électrostatiques

I.6.2.3 Charge linéique

La densité linéique de charge, souvent notée λ , est la quantité de charge électrique par unité de longueur. Dans le système international, son unité est le coulomb par mètre [$C.m^{-1}$].

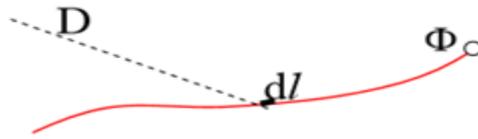


Figure I.5 Charge linéique

I.7 Effet des charges électriques

Deux charges de même nature, deux charges positives par exemple, se repoussent, alors que deux charges de nature opposée s'attirent. On appelle ce phénomène interaction électromagnétique.

I.8 Propriétés des charges

I.8.1 Quantification de la charge

L'électricité est une propriété inhérente aux particules élémentaires. Ainsi le proton et le positron (positron ou positon) sont chargés positivement, et l'électron négativement. D'autres particules, que l'on dit neutres, ne sont pas douées de propriété électrique ;

Exemple : le neutron, le neutrino.

L'état d'électrisation d'un corps se caractérise en définissant la charge électrique portée par ce corps. De nombreuses expériences, telle celle de Millikan, ont montré que :

- Une particule élémentaire chargée, porte la quantité d'électricité, $+e$ ou $-e$ charge de l'électron ($e=1,6 \cdot 10^{-19}C$) que l'on appelle charge élémentaire.
- La quantité d'électricité portée par un corps est la somme algébrique des quantités d'électricité des particules élémentaires qui le composent. Elle est donc toujours un multiple de e .

I.8.2 Conservation de la charge

On dit qu'un système est fermé, s'il n'échange pas de matière ni d'énergie avec le reste de l'univers. La composition d'un système isolé peut changer, mais sa charge électrique (sa quantité d'électricité) est constante.

La charge totale d'un système isolé est constante.

Exemple :

- désintégration d'un neutron : $n \rightarrow e + p + \text{neutrino}$
- matérialisation d'un photon : $\gamma \rightarrow e^- + e^+$

I.9 Interaction électrique

L'interaction électrostatique est l'une des interactions fondamentales simplifiée qui permet l'étude des phénomènes électriques pour des charges immobiles. Des phénomènes d'influence électrostatiques entre deux corps sont observables après électrisation de l'un des deux corps par frottement.

I.9.1 Loi de Coulomb

Les charges similaires se repoussent, les charges opposées s'attirent puis l'attraction ou la répulsion s'exerce sur la ligne droite entre les charges. la magnitude de la force est proportionnelle au carré de l'inverse de la distance entre les charges et la force est proportionnelle à la magnitude de chacune des charges et les charges sont additives.

I.10 Champ électrique

Le champ électrique est une notion qui remonte aux travaux de Coulomb (1785), c'est le champ de force associé à une charge électrique unité. Il dérive du potentiel électrique. Le champ électrique est couplé au champ magnétique par les équations de Maxwell et de Lorentz (champ électromagnétique). De plus le champ ne dépend pas de la charge qui est soumise à la force (dite charge passive). Le champ représente le 'porteur' d'action à distance de la charge qui le crée (dite charge active).

Dans une région d'espace il existe un champ électrostatique si une charge placée dans la région est soumise à une force électrostatique.

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les généralités de l'électrostatique qui est basé sur des formules pour analyser les forces et les interactions potentielles entre les différents acteurs qui peuvent être chargés. La loi de coulomb analyse la puissance de l'interaction entre deux charges et se trouve donc à la base de cette branche.

CHAPITRE II :

Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.1 Introduction

La poussière est constituée de matériaux divers notamment fibres et débris fins assez légers pour être mis en suspension dans l'air. Les poussières sont éliminées de l'air intérieur par des aspirateurs, divers systèmes de filtres ou le procédé du cyclone. Dans l'environnement extérieur, la poussière provient de sources variées, naturelles et anthropiques, dont l'érosion du sol, les éruptions volcaniques, les tempêtes de sable ou de poussières voire des embruns marins après les tempêtes.

Dans ce chapitre, nous discuterons des problèmes causés par la salissure poussiéreuse sur les panneaux photovoltaïques.

II.2 Propriétés de la poussière

Les propriétés de la poussière jouent un rôle important dans son dépôt. Les propriétés physiques des particules déterminent la durée de leur voyage dans l'atmosphère. Par rapport aux particules plus grossières similaires, les particules plus fines ont un impact plus important sur les performances des panneaux photovoltaïques.

Selon la nature des poussières, l'accumulation croissante de sable a tendance à former des amas et des couches supérieures de particules. Sous l'effet du vent, ces amas seront détruits mais se réinstalleront ensuite en surface, tandis qu'une seule couche de particules sera emportée de la surface par le vent. Les particules de sable rebondissent sur la surface du verre avant de se déposer, retardant ainsi la formation d'amas [18].



Figure II.1 Différent type de poussière [2]

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.2.1 Effets de la diffusion de la poussière dans l'atmosphère sur l'efficacité du module photovoltaïque

Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il montre des signes atténuants. Ce phénomène est dû aux caractéristiques des ondes lumineuses dans le rayonnement solaire. Les molécules dans l'atmosphère peuvent l'absorber et être réfléchies par la vapeur d'eau et les molécules d'air, de la poussière et d'autres polluants sont renvoyés. La dispersion de poussière réduit la composante directe du rayonnement l'énergie solaire, et augmente ainsi la composante de rayonnement diffus.

L'atténuation du rayonnement dépend de la nature et de la quantité des polluants. Le rayonnement total reçu dans les zones urbaines est inférieur à celui des communautés rurales. La pluie et le vent peuvent réduire la concentration de particules en suspension dans l'atmosphère [18].

II.2.2 Effets du dépôt de poussière sur la transmittance lumineuse de la surface du module

La transmission de la lumière est définie comme le rapport de l'intensité de la lumière qui peut traverser une substance ou un échantillon à l'intensité de la lumière qui ne peut pas traverser. Contrairement à la poussière en suspension dans l'atmosphère, elle peut diffuser le rayonnement entrant, rediriger une partie de la composante diffuse entrante vers la lumière solaire ou l'absorber, réduisant ainsi l'intensité du rayonnement un système solaire photovoltaïque efficace dépend également du pourcentage de rayonnement solaire qui traverse le verre de protection et atteint la surface de collecte [18].

II.2.3 Effet poussière sur le module Photovoltaïque

Dans les applications liées à l'énergie solaire, le sable et la poussière sont des substances nocives dans la plupart des régions arides du monde. Lorsque les particules de ces substances tombent sur le module PV, elles réduisent la qualité de l'éclairage en atténuant et en diffusant la lumière incidente. L'interférence de ces particules dépend de leur composition, de leur densité et de leur distribution granulométrique [18].

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.2.4 Ombrage partiel du panneau avec dépôt de poussière

En raison de la faible perméabilité, la poussière accumulée à la surface du panneau peut provoquer un ombrage partiel. Ce dernier est un phénomène, où l'éclairage de la cellule dans le tableau n'est pas uniforme. Le générateur photovoltaïque est composé de modules PV connectés en série et en parallèle pour répondre aux exigences de sortie. Cependant, la puissance de sortie totale est inférieure à la somme de la puissance nominale d'une seule unité.

L'une des raisons est l'effet d'ombrage partiel. Les cellules ombrées génèrent moins de courant que les cellules non ombrées. Les cellules non ombrées forcent la cellule ombrée à faire passer plus de courant, ce qui fait que les cellules ombrées fonctionnent avec une tension de polarisation inverse, entraînant une perte d'énergie du système. Toutes les unités ne peuvent pas fonctionner au point de puissance maximum car le courant (pour les connexions en série) ou la tension (pour les connexions en parallèle) doivent être égaux pour tous les modules. En raison de la non-concordance de puissance, les modules connectés en série ne peuvent avoir un courant aussi fort que le courant du module le moins performant de la matrice. La caractéristique électrique du réseau change d'avoir un maximum global en courbe P(V) pour avoir plusieurs maxima locaux, en raison d'un mécanisme de conduction compliqué entre les cellules partiellement ombragées et non ombragées et les diodes de by-pass [18].

II.2.5 Augmentation de la température du module en raison du dépôt de poussière

Les dépôts de poussière à la surface des panneaux PV peuvent provoquer des écarts de température. En utilisant une caméra de vision thermique découvert que la surface poussiéreuse a une augmentation de température de 10°C par rapport à la surface propre. L'augmentation de la température de la cellule solaire entraînera une légère augmentation du courant de court-circuit, mais une méthode ne peut pas diminuer la tension en circuit ouvert. Par conséquent, la puissance totale diminue avec l'augmentation de la température [18].

III.2.6 L'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques

Lorsque de la poussière tombe à la surface des panneaux photovoltaïques, l'impact de dépôt de poussière sur les modules photovoltaïques est montré en trois facteurs. Le premier est l'effet de blindage. Lorsque de la poussière s'accumule sur le couvercle en verre, la poussière

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

recouvre la lumière irradiée vers le panneau PV, affaiblissant ainsi la transmission du couvercle en verre, réduisant ainsi la quantité de rayonnement solaire réellement reçue par le panneau PV.

Le second est l'effet de température. La poussière sur le panneau PV peut provoquer un changement sous forme de transfert de chaleur. Le modèle de bilan thermique existant des modules PV est établi dans des conditions de sans poussière. Cependant, affecté par la poussière, le bilan thermique a changé dans les panneaux photovoltaïques, effectivement mis en service, et lorsque le courant de fonctionnement de la cellule est inférieur au courant de fonctionnement du champ PV entière, la tension de la cellule se termine dans un état de polarisation inverse.

Le troisième, au fil du temps, le verre de couverture constitué principalement de silice réagit avec les acides ou les bases. Ensuite, la surface du couvercle en verre devient inégale et la réflexion diffuse augmente. Détruisant ainsi l'uniformité de la diffusion de la lumière solaire dans le couvercle en verre, affectant la capacité de production photovoltaïque [19].

II.3 Facteurs influent sur le dépôt de poussière

Beaucoup de facteurs influent sur le dépôt de poussière, comme la taille des grains aussi les propriétés physiques des surfaces des modules, type de verre, texturé ou antireflet, la vitesse du vent, et beaucoup d'autres facteur comme le résumé (Figure II.2) [20] .

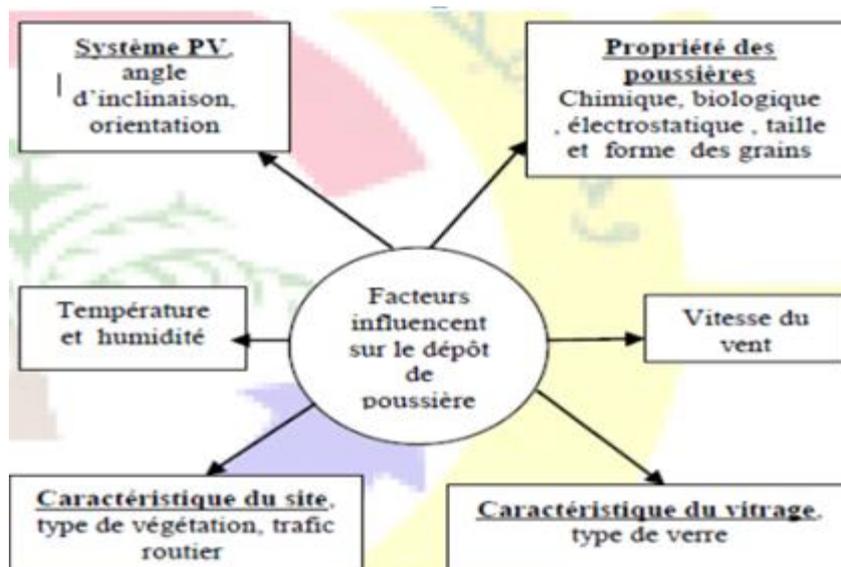


Figure II.2 facteurs influent sur le dépôt de poussière [3]

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.4 Nettoyage des panneaux solaires

Les fabricants préconisent de procéder à un grand nettoyage annuel, voire semestriel, dans les régions peu arrosées ou soumises à de fortes pollutions atmosphériques, en effet, les saletés, poussières et mousses qui encrassent les panneaux peuvent nuire à leurs performances.

Voici comment procéder pour nettoyer votre précieuse toiture photovoltaïque sans lui faire courir le moindre risque. [21]

II.5 Nettoyage avec un chiffon

II.5.1 Principe de base de cette méthode

Le nettoyage des panneaux solaires avec un chiffon est similaire au nettoyage des vitres et des miroirs. Pour nettoyer les panneaux solaires nous avons besoin d'un seau rempli d'eau savonneuse tiède, un chiffon sec et une raclette en caoutchouc. Lavez délicatement la surface du panneau avec de l'eau à savon et un chiffon, pour enlever la poussière, les débris et les taches d'eau. Ensuite on utilise une raclette pour enlever l'excès d'eau. Lors du nettoyage, une inspection est faite sur la surface des panneaux en vue de détecter les fissures ou les pièces à risque de se détacher. Cette inspection nous permettra de faire appel au fabricant ou un technicien en cas de dommage du panneau.[21]

II.6 Nettoyages photo catalyse

II.6.1 Photos catalyse cellule solaire

Est un nouveau revêtement de protection agissant par photo catalyse et destiné à rendre les panneaux solaires "autonettoyants", afin de diminuer significativement les interventions et les coûts de nettoyage, de maintenir, par une constante propreté, leur rendement maximum, d'empêcher les rayures lors du nettoyage par exemple. De plus, photocatalyse cellule solaire augmente la transmission de la lumière au travers de la vitre du panneau solaire et diminue sa réflexion favorisant un rendement supérieur de 4 à 5%. Photocatalyse cellule solaire protège les colorants sensibles des cellules solaires contre la dégradation par les rayons ultraviolets du soleil.

CHAPITRE II : Le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux solaires

II.7 Nettoyage électrostatique

II.7.1 Fonctionnement du nettoyage par champ électrostatique

Les équipes de recherche ont mis au point un matériau transparent constitué d'oxyde d'indium et d'étain, et qui est placé en surface des panneaux (sur une feuille plastique ou sur du verre). Ce même matériau est associé à une série de capteurs disposés à la surface des modules et chargés de détecter la présence de poussières et d'impuretés. Après franchissement d'une concentration limite d'encrassement en surface (dont la valeur est pré établie), ces capteurs vont ainsi permettre le déclenchement d'un signal électrique qui va, comme « une vague », soulever les particules de poussière et les expulser de sa surface [22].

II.7.2 Montage électrique de champ électrostatique

Les électrodes sont connectées en parallèle à une alimentation en courant alternatif monophasé ou triphasé qui va produire une onde électromagnétique. Cette alimentation est fournie par le panneau lui-même.

Le champ électromagnétique produit par les électrodes repousse ainsi les particules de poussières qui se trouvent en surface et empêche par la même occasion, le dépôt de nouvelles particules (chargées positivement ou négativement).

Les particules non électriquement chargées vont se poser momentanément sur le panneau, puis vont être soumises à un champ électrique homogène : elles vont alors se déplacer en surface. Ce mouvement des particules va les faire devenir triboélectriquement chargées. Puis, le champ électromagnétique va agir et conduire à l'expulsion des particules présentes sur le matériau [23].

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié le dépoussiérage et l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux PV. On a présenté les facteurs influents sur le dépôt de poussière et les différents types de nettoyage des panneaux. De nombreux articles ont tenté d'étudier le phénomène et les lois régissaient du transport et des dépôts des poussières dans le contexte des installations de central solaires

Chapitre III

Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

III.1 Introduction

Une particule de poussière représente un tout petit paquet très fragile de substance. Même si nous leur prêtons peu d'attention, elles sont partout dans notre vie quotidienne. Elles apparaissent dans un la grande majorité des produits que nous utilisons au quotidien, comme les poudres café, sucre, farine, épices, cosmétiques, produits pharmaceutiques, produits de construction (ciment, gypse, etc.) et polluant atmosphérique.

Les particules peuvent être des macromolécules (molécules de masse poids moléculaire relativement élevé) ou un groupe de molécules, naturelles ou Synthétique, organique ou inorganique.

III.2 Principe des rideaux électriques

III.2.1 Rideaux électriques multi-phases

Les rideaux électriques est une technologie intéressante développée par Masuda dans les années 1970 pour contrôler et transporter des aérosols chargés [24].

Le dispositif typique du rideau électrique comporte des séries d'électrodes rectilignes, parallèles, toutes placées dans un plan horizontal et noyées dans une couche plane d'isolant. Dans une installation triphasée (**Figure III.1**), les électrodes sont connectées pour former un ensemble de trois peignes intercalés qui sont alimenté par une tension périodique avec un déphasage de $2\pi/3$ et produit un champ progressif dans une direction perpendiculaire à l'axe de l'électrode.

En un point dans l'air au-dessus de la surface de l'isolant, le rideau électrique multi phases a un champ électrique tournant. Mais le champ électrique diminue avec la distance au plan des électrodes de façon que le cycle n'est pas fermé ; sur une période du champ alternatif.

L'analyse du mouvement d'une particule chargée a établi que la force exercée sur la particule a une composante verticale qui peut compenser la force de gravitation et une composante horizontale dont la direction dépend du signe de la charge.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

La force résultante est proportionnelle à la charge de la particule et au champ électrique et dépend aussi du gradient de champ. Ceci explique le balayage horizontal des particules chargées qui sortent ainsi de la zone soumise au champ.

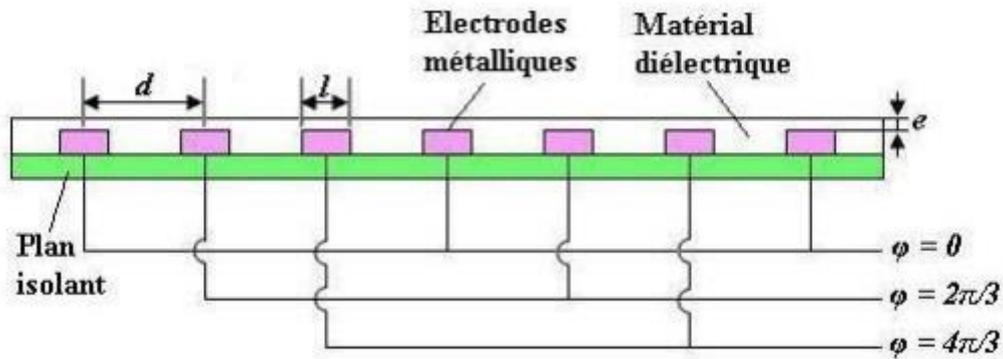


Figure III.1 Section transversale d'un rideau électrique triphasé [24].

III.2.2 Rideaux électriques à ondes stationnaires

Une onde stationnaire, est le nom que porte l'addition de deux ondes de fréquence identique se propageant dans un milieu dans des directions différentes. Le résultat de l'addition produit une onde immobile (onde qui ne se déplace pas vers la gauche ni vers la droite) dans le milieu. Le milieu vibre alors de façon stationnaire d'où le nom onde stationnaire (Figure III.2) [25].

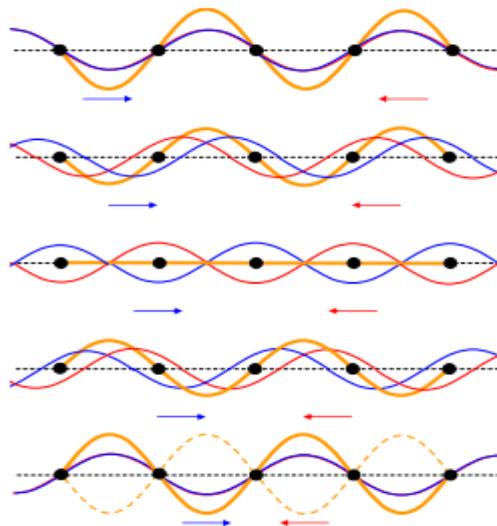


Figure III.2 ondes stationnaires [24]

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Des chercheurs ont développé un dispositif simple, composé de deux "peignes" insérés entre eux et espacé d'un espacement. Ils sont alimentés par une tension monophasée (**Figure III.3.**), l'un est connecté à la tension alternative et l'autre est connecté à la terre.

Dans ce cas, le champ électrique est oscillant («tanding-wave» en anglais), et à un certain point, le champ a une direction et une amplitude définies qui oscillent sur la période d'application. Par conséquent, Une particule chargée a donc un mouvement oscillatoire. Pour le dispositif horizontal, il apparaît une force résultante verticale qui peut repousser la particule chargée ; mais, pour une amplitude suffisamment faible du mouvement des particules, la composante horizontale moyennée spatialement est nulle et une particule unique devrait être piégée dans la région autour de la position initiale, entre les deux électrodes les plus proches [26].

Si l'amplitude du champ est plus élevée, le mouvement peut être beaucoup plus complexe et les observations qui sont faite, concluent qu'un déplacement assez aléatoire de particule finit par quitter la zone soumise au champ.

III.3 Applications du rideau électrique à onde stationnaire

Récemment des observations ont été effectuées sur des rideaux électriques à onde stationnaire étudiée dans le but de dépoussiérer les couches de poudre déposée, en particulier, sur les panneaux solaires martiens, Sims et ses collègues [27] ont utilisé des réseaux intercalés d'électrodes (**Figure III.2**) , ce qui génère une onde stationnaire.

Sims et collègues [27], ont montré que le facteur de nettoyage, c'est-à-dire la proportion de poudre enlevée par le champ alternatif, est une fonction croissante de la tension appliquée.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

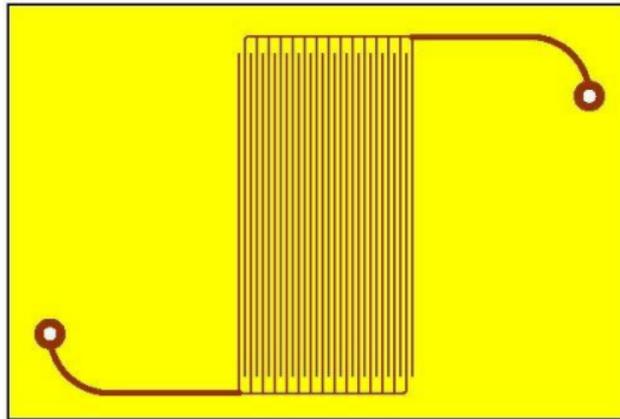


Figure III.3 Rideau électrique à ondes stationnaires [27]

Dans ce contexte, les chercheurs sont arrivés à plusieurs hypothèses sur l'origine de la charge de particules retrouvée sur les rideaux électriques à ondes stationnaires. En premier lieu, l'effet triboélectrique qui offre aux particules des charges supplémentaires qui peuvent les repousser de la surface du convoyeur.

III.4 Expériences de Calle, Sharma et Mazumder

Calle et al. (2009), Atten et al. (2009), Sharma et al. (2009), Mazumder et al. (2006), ont utilisé des électrodes transparentes (avec une largeur, une forme et un espacement appropriés entre électrodes) ; intégrés dans un film polymère transparent résistant aux UV ; avec un traitement de la surface supérieure en film polymère pour obtenir une structure de surface antiréfléchissante, cet ensemble recouvre les modules photovoltaïques ou sur la face avant des miroirs solaires. [28-34]

Mazumder propose d'utiliser une résine de fluor polymère pour répondre à la plupart des exigences : transparence supérieure à 90 % sur la plage du rayonnement solaire, résistant aux UV, d'excellentes propriétés de charge par contact, résistant aux rayures, faible indice de réfraction et résistant à l'humidité (**figure III.4**).

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

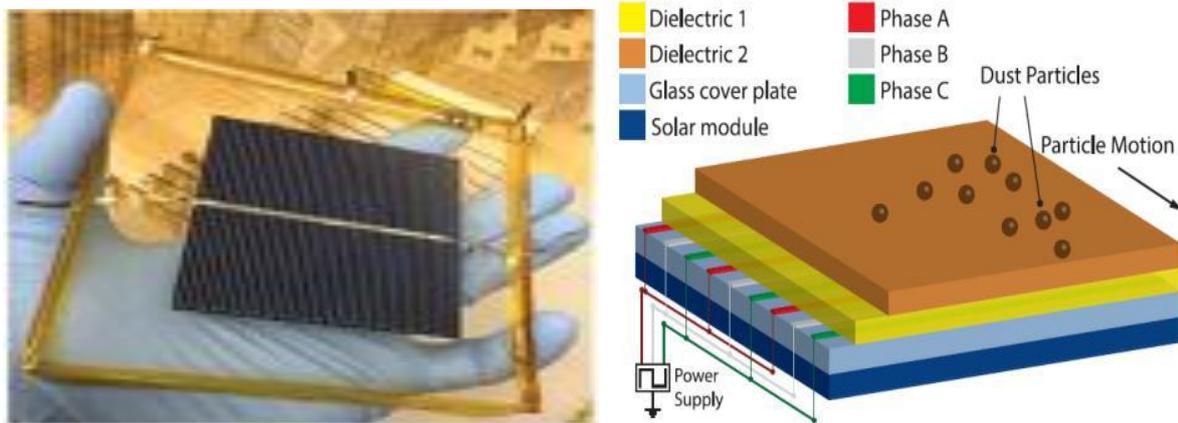


Figure III.4 : Représentation schématique d'une vue en 3-D d'un système nettoyage associé à un module photovoltaïque. [34]

Les électrodes sont alimentées par une source de tension triphasée basse fréquence d'environ 1 kV d'amplitude. Un champ électrique variable se produit à la surface du film diélectrique. Ce champ électrique non uniforme exerce des forces coulomb et diélectro phorétique sur les particules qui se trouvent sur la surface des modules photovoltaïques. Les particules chargées sont transportées par la force de Coulomb suivant les ondes progressives latéralement (Figure III.5).

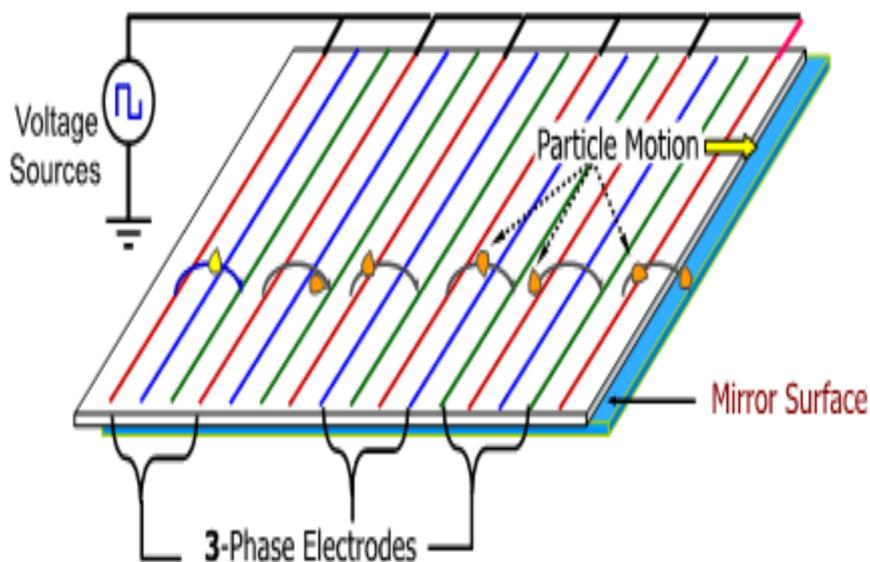


Figure III.5 : Représentation graphique de la disposition des électrodes et mise en évidence des trajectoires de déplacement des particules à nettoyer. [34]

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Mazumder a effectué des mesures par la méthode gravimétrique à partir du rapport : $m_o - m_r / m_o$. Où m_o est la masse de poussière déposée sur le dispositif par rapport à la masse de poussière m_r restant sur le film après activation du dispositif d'électrodes.

III.5. Expériences de Kawamoto et Shibata

Kawamoto et Shibata ont proposé comme alternatif d'utiliser des fils conducteurs fins (diamètre = 0.3 mm) et les monter en parallèle sur un substrat de verre en utilisant un adhésif transparent, en laissant un écartement large entre les électrodes (d=7 mm) (**Figure III.6**).

kawamoto et al. Ont développé un système amélioré qui consiste en une plaque de verre anti-sable avec des électrodes en fil parallèle intégrées dans une plaque de verre de protection d'un panneau solaire et une alimentation haute tension qui génère une tension rectangulaire monophasée.[35]

L'idée dans cette application est de pousser les particules dans l'air sous l'effet de l'onde stationnaire, et se servir ensuite de la gravité pour les éliminer. Par conséquent, les particules font des sauts guidés par la gravité (**Figure III.6**).

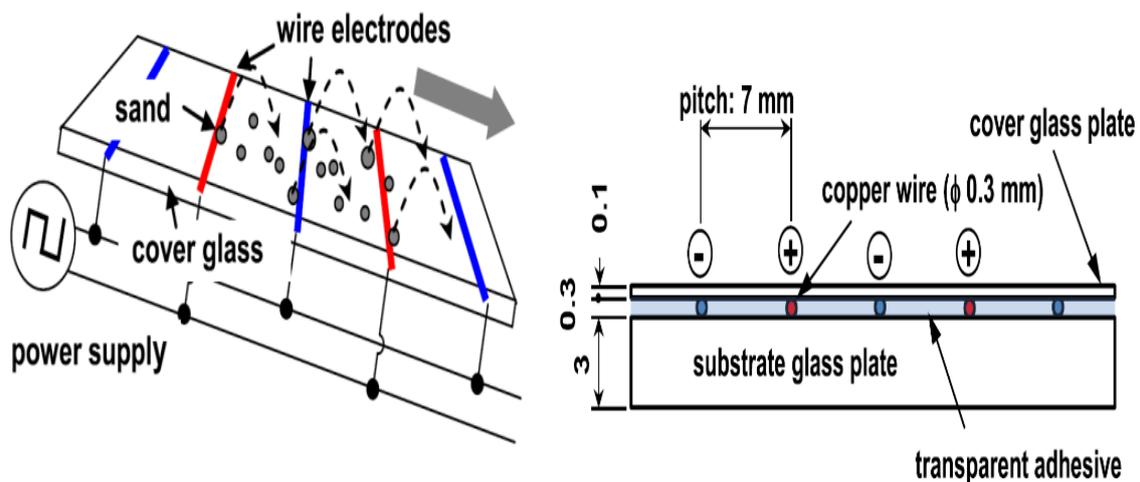


Figure III.6 Schéma de principe d'un convoyeur électrostatique utilisant une onde stationnaire et la gravité pour éliminer le sable d'un panneau solaire et Dessin en coupe du convoyeur [35]

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

III.6 Etude expérimentale du convoyeur à ondes mobiles

Le convoyeur à ondes mobiles est constitué d'une série d'électrodes parallèles intégrées dans une couche diélectrique afin d'éviter le claquage, connectée à des tensions alternatives avec des déphasages ; génère un champ électrique qui se propageant sur la surface du convoyeur et soulève les particules le long du plan des électrodes avec une force perpendiculaire à leurs axes.

Le déplacement des matériaux pulvérulents de taille micrométrique dans un convoyeur à ondes mobiles dépend de l'amplitude et de la fréquence du système polyphasé de tensions appliquées aux électrodes du dispositif.

III.6.1 Montage expérimental

Le mécanisme de dépoussiérage avec le convoyeur à ondes mobile sa été proposé sur la base de sa structure en elle-même, les forces agissantes sur les particules dans la direction des ondes mobiles, la distribution de l'intensité du champ électrique au-dessus de la plateforme des électrodes et la structure des électrodes. Le montage expérimental utilisé est illustré dans la (**Figure III.7**). Il permet de mesurer la masse des particules déplacées par le convoyeur à ondes mobiles lors de l'activation du champ électrique.[36]

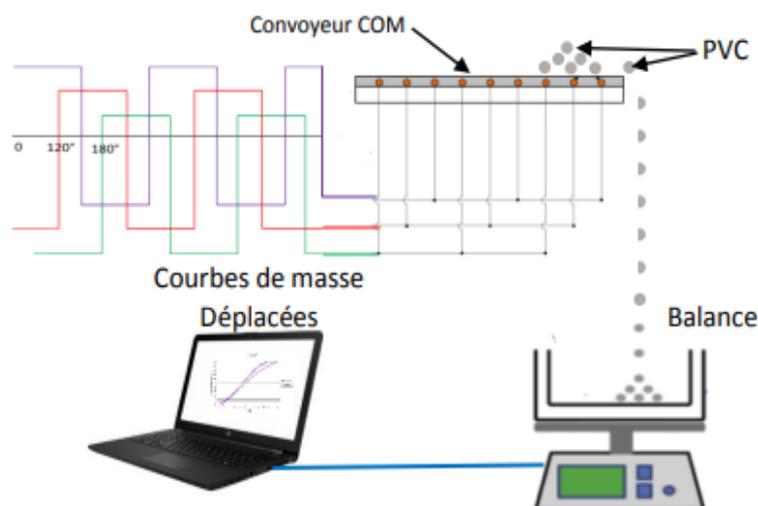


Figure III.7 Représentation schématique du montage expérimental [36]

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Ce convoyeur est alimenté par trois tensions triphasées alternatives de forme carrée ayant un déphasage de 120° entre elles générées par trois amplificateurs de tension délivrant une tension de 2 kV avec un courant de 20 mA. Ces amplificateurs sont commandés avec deux générateurs de fonctions synchronisés.

Ce montage permet de faire varier le déphasage, la fréquence, l'amplitude et la forme de signal des tensions appliquées.

III.6.2 Conception du convoyeur à ondes mobiles

Plusieurs ensembles d'électrodes ont été construits en cuivre en forme de peignes, non pas par la technique classique de fabrication des circuits imprimés à partir des plaques (couche de cuivre sur résine époxy), mais avec une autre technique, ou les électrodes sont intercalées. Et réalisées sur une plaque de Poly méthacrylate de méthyle (PMMA-plexiglas), de dimensions 30×15 cm, sur laquelle ont été fixées des électrodes parallèles identiques en fil nu de cuivre de diamètre 1 mm et de longueur de 15 cm, séparées par un intervalle égal à 2 mm (Figure III.7). L'ensemble est ensuite recouvert avec un enduit en vernis isolant acrylique de façon à empêcher l'étincelle entre des électrodes adjacentes.[36]

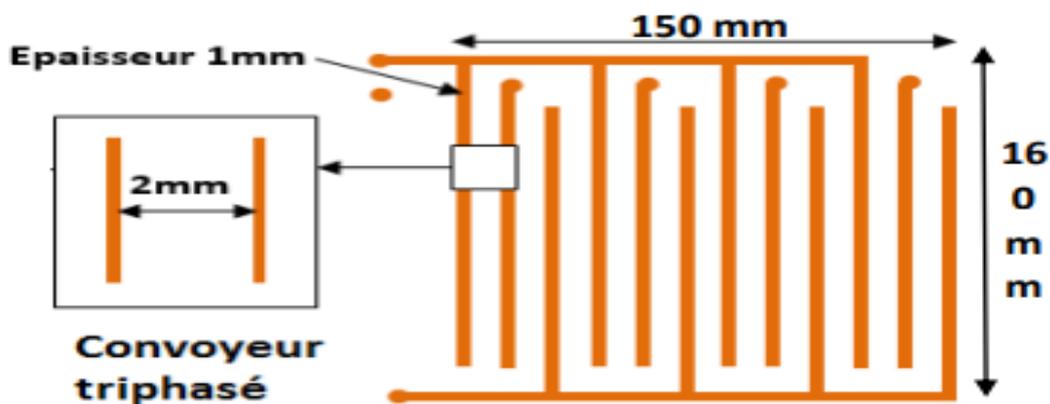


Figure III.8 Schéma descriptif de convoyeur à ondes mobiles triphasé [36]

Les électrodes sont regroupées et connectées à un des trois amplificateurs de tensions avec un déphasage de $2\pi/3$.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Au cours de ce processus, les particules peuvent acquérir une charge électrostatique initiale par friction avec la plaque du convoyeur ainsi que par collisions inter particules. Cette charge initiale est nécessaire pour leur mouvement sous l'action du champ électrique (**Figure III.9**).

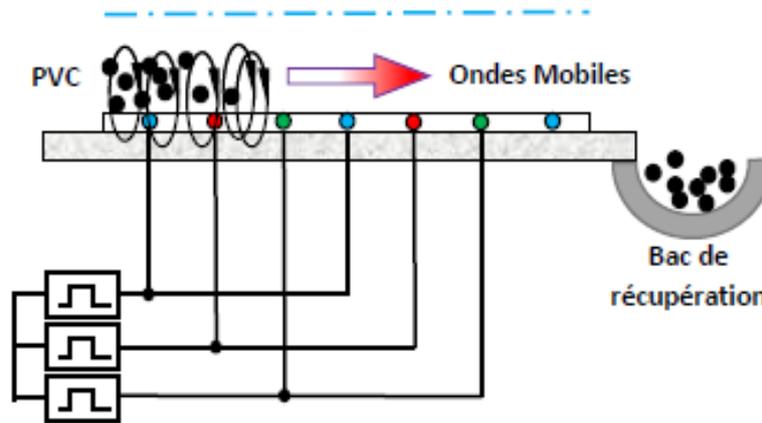


Figure III.9 Représentation graphique du déplacement des particules suivant les ondes mobiles [36]

Les particules bougent dans le sens du champ électrique et tombent dans un seau déposé sur une balance de précision. L'humidité élevée pourrait affecter les résultats expérimentaux en induisant une charge de particules plus faible et / ou une dissipation de charge plus importante et une force d'adhésion plus importante entre les particules et le convoyeur.

Une autre observation importante est que la plupart des particules suivent la direction du champ électrique, et seule une petite quantité de particules se déplace dans la direction opposée. Ce phénomène est plus prononcé avec de grosses particules.

Un autre phénomène qui peut affecter la direction des particules est le rebond des particules à la surface de la plaque et les collisions entre particules (**Figure III.10**). Les grosses particules ont une masse plus élevée, donc elles peuvent acquérir une énergie cinétique plus élevée à cause des collisions. Par conséquent, si les particules rebondissent et se déplacent vers le sens inverse de l'onde mobile, la force de Coulomb ne peut pas inverser le sens de mouvement des particules, sauf si la charge était suffisamment élevée.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

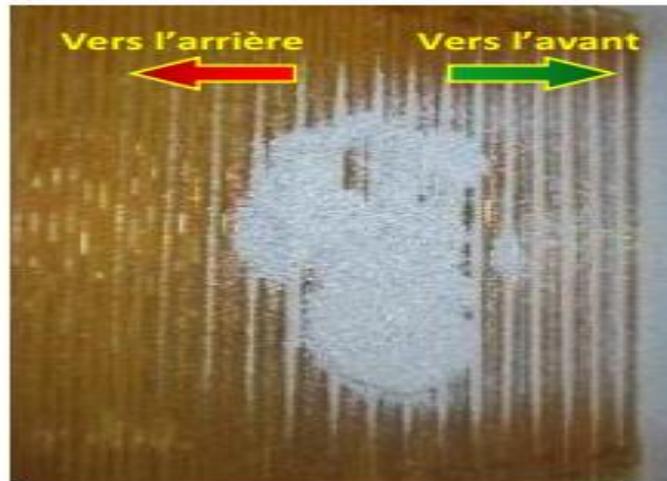


Figure III.10 Sens de déplacement des particules sur le convoyeur [37]

III.7 Chargement par décharge couronne

Sur cette partie, les auteurs ont voulu étudier le déplacement des particules isolantes par ondes mobiles mais chargées par décharge couronne, l'étude consiste à mesurer la quantité de particules qui sont déplacées par le convoyeur à onde mobile.

La technique expérimentale utilisée comprend pour son fonctionnement deux étapes : une phase de chargement des particules par décharge couronne pendant une durée de 30 secondes, et une phase de mesure de l'efficacité de déplacement des particules.

Ce procédé de formation est basé sur la génération de décharges couronne en appliquant une tension assez élevée à une électrode de faible rayon de courbure située à une certaine distance par rapport à un plan de masse. Le champ électrique dans l'espace inter électrodes est non uniforme, son intensité au voisinage de l'électrode active est assez élevée pour que l'air soit ionisé. Les particules qui sont posées sur le plan de masse, acquièrent sous l'action du champ électrique des charges de même polarité que l'électrode couronne. [38-43]

La (Figure III.11), illustre le principe de chargement par décharge couronne négative. Si la décharge couronne se produit à partir d'une électrode de polarité négative dans l'air à pression atmosphérique des ions négatifs seront formés.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

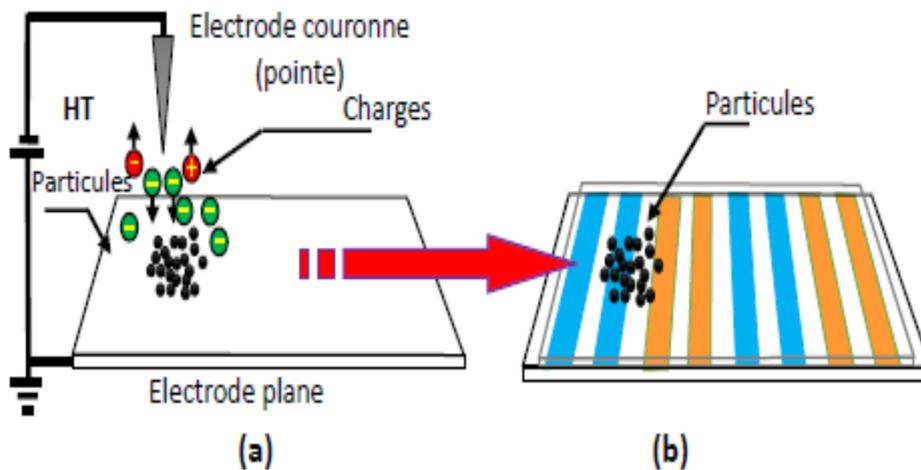


Figure III.11 Dispositif expérimental de chargement par décharge couronne, (a) Schéma du dispositif expérimental (b) Rideau électrique [38]

Les résultats obtenus par les auteurs, montrent l'efficacité de déplacement lorsqu'on charge les particules par la méthode de décharge couronne pour les trois gammes de fréquences 50 Hz, 100 Hz et 150 Hz. L'efficacité de déplacement est meilleure que dans le cas de particules non chargées. Néanmoins au-delà d'une certaine valeur de la tension (-6kV), le déplacement devient très lent jusqu'à l'arrêt total du déplacement quand les particules se collent à la surface du convoyeur.

Pour un chargement modéré, avec une tension couronne dont la valeur varie en fonction de la fréquence, le déplacement est meilleur car la force de Coulomb qui dépend de la charge acquise devient plus grande. Par contre, pour des tensions de chargement couronne encore plus grandes, la force d'image qui retient les particules devient prépondérante et les granules restent fortement attachés au convoyeur.

Parmi les mécanismes qui expliquent le chargement de ces particules, on trouve la triboélectricité, qui est un phénomène multi physiques. Des collisions entre les différentes particules, font en sorte que celle-ci soit chargée, un échange d'électron se fait entre ces particules une se charge positivement et l'autre négativement.

On trouve aussi un autre mécanisme de chargement qui est utilisé (**Figure III.11**) qui est le chargement par décharge couronne.

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Partie 02

Dans la première partie nous avons présenté le principe des rideaux électriques imaginés par Masuda. Dans cette partie des travaux antérieurs sur des rideaux électriques à onde stationnaire sont d'abord rappelés. Ensuite, on montre que, pour les poudres appelées « non actives », l'enlèvement total de la couche de poussière n'est possible qu'en présence de décharges à barrière diélectrique. Le résultat principal concernant l'utilisation de la technique de rideau électrique à onde stationnaire pour les panneaux solaires de futurs modules sur Mars est que l'enlèvement des fines particules n'est pas possible lorsque l'adhésion des particules est forte.

III.8 Onde stationnaire

Une onde stationnaire est le nom que porte l'addition de deux ondes de fréquence identique se propageant dans un milieu dans des directions différentes. Le résultat de l'addition produit une onde immobile (onde qui ne se déplace pas vers la gauche ni vers la droite) dans le milieu. Le milieu vibre alors de façon stationnaire d'où le nom onde stationnaire provient.

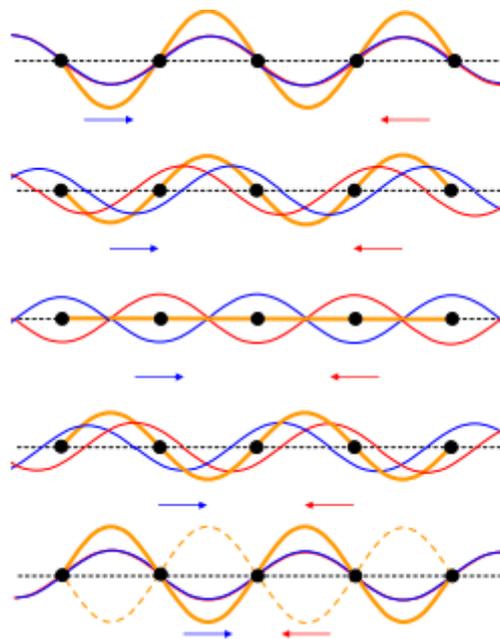


Figure III.12 le sens des ondes de fréquence [43]

Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

III.9 Caractéristique d'une onde stationnaire

Une onde stationnaire se caractérise par les éléments suivants : ($\lambda = vT$)

Ventre : Endroit où l'amplitude de l'oscillation du milieu est maximale.

Nœud : Endroit où l'amplitude de l'oscillation du milieu est nulle.

Vitesse du milieu (v) : Vitesse des ondes progressives produisant l'onde stationnaire.

Période (T) : Temps pour effectuer un cycle complet.

Demi longueur d'onde ($\lambda/2$) : Distance entre deux nœuds ou deux ventres consécutifs.

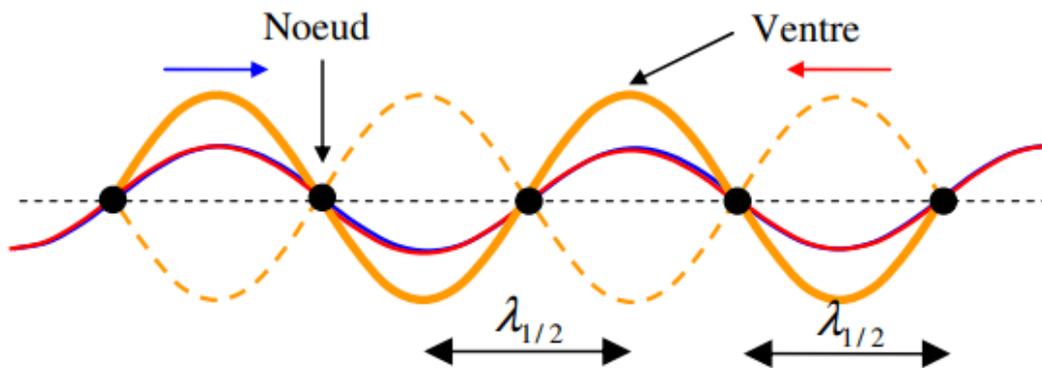
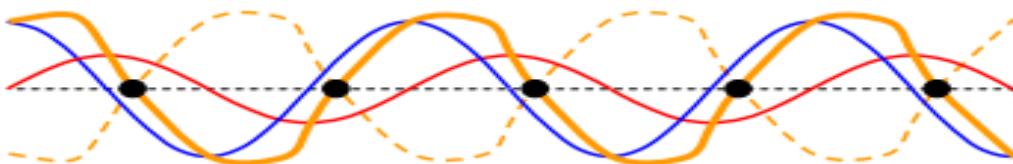


Figure III.13 caractéristique d'une onde stationnaire [43]

Lorsque les amplitudes ne sont pas égales, on ne retrouve plus une onde stationnaire globale de forme sinusoïdale : (décalage de $4/\lambda$).



Chapitre III : Les Différentes Techniques de Dépoussiérage par Electrostatiques

Figure III.14 décalage d'onde stationnaire (décalage de $4/\lambda$)

III.10 Conclusion

A travers ce chapitre, on put faire une synthèse des différents travaux qui ont été réalisés, différentes techniques ont été utilisées, parmi elle on retrouve les rideaux électriques, ou le principe de base est la génération des ondes stationnaires.

Ces ondes stationnaires sont générées par un système d'électrodes qui sont alimentées par des sources haute tension. On a constaté que, pour pouvoir faire déplacer les différentes poussières, ces dernières doivent avoir une charge initiale, afin que par la force de Colomb qui est le produit entre le champ électrique et la charge acquise crée cette force de déplacement.

Conclusion Générale

| *Conclusion Générale*

L'application des différents dispositifs illustré dans le chapitre III, sont avérés très efficace pour maîtriser et manipuler efficacement les particules micrométriques. Il repose sur l'usage de la force de Colomb.

La consommation d'électricité statique est faible. Ces méthodes électrostatiques utilisées dans ces procédés sont très avantageuses par rapport aux méthodes mécaniques, car elles ne nécessitent pas de pièces mobiles, et ils ont des coûts énergétiques extrêmement faibles.

Depuis plusieurs années, ces méthodes suscitent des préoccupations toujours plus grandes parmi la communauté scientifique en vue de les utiliser à large échelle.

Les résultats obtenus par les différents chercheurs, ont montré que la charge des particules est un paramètre essentiel à leur mise en mouvement. En effet, l'efficacité du système est très limitée lorsque les particules ne sont pas suffisamment chargées, notamment pour les plus petites d'entre elles en raison d'une force d'adhésion relativement forte.

L'ajout d'un système efficace de chargement des particules avec une décharge couronne a fait l'objet d'une autre série d'expériences. Il a été constaté que les particules chargées au-dessus de la surface du convoyeur se déplacent même si elles sont fortement adhérees à la surface.

Références Bibliographiques

- [1] M. Govi. “Quelques expériences sur l’induction électrostatique ”, *Journal de Physique Théorique et Appliquée*, vol. 4, pp. 264-266, 1875.
- [2] D. H. Pontius, P. Vann Bush and L. E. Sparks. “Performance of large-diameterwires as dischargeelectrodes in electrostaticprecipitators ”, *Journal of the Air Pollution Control Association*, vol. 34, pp. 1203-1207, 1984.
- [3] H. A. Said, H. Nouri and Y. Zebboudj. “Effect of air flow on corona discharge in wire-to-plate electrostaticprecipitator ”, *Journal of Electrostatics*, vol. 73, pp. 19-25, 2015.
- [4] J.A. Giacometti, S. Fedosov and M.M. Costa. “Corona charging of polymers:recentadvances on constant currentcharging ”, *Brazilian Journal of Physics*, vol. 29, pp. 269-279, 1999.
- [5] L. Dascalescu, R. Morar, A. Iuga, A. Samuila and V. Neamtu. “Electrostaticseparation of insulating and conductive particlesfromgranular mixes ”, *Particulate Science and Technology*, vol. 16, pp. 25-42, 1998.
- [6] K. Senouci, K. Medles and L. Dascalescu, “Effective solutions for monitoring the electrostaticseparation of metal and plastic granularwastefromelectric and electronicquipment”,*Waste Management and Research*, vol. 31, pp. 160-168, 2013.
- [7] Reguig, A. Bendaoud, P. Dordizadeh, A. R. Salama, S. Messal and L. Dascalescu. “Experimentalstudy of a modified dual-type high-voltage electrode for electrostaticseparation applications ”, *Journal of Electrostatics*, vol. 88, pp. 232-235, 2017.
- [8] Reguig, A. Bendaoud, B. Neagoe, Y. Prawatya and L. Dascalescu. “Electric potential distribution at the surface of insulatingmaterialsexposed to corona dischargesfromvariouselectrode configurations », *Journal of Electrostatics*, vol. 82, pp. 55-62, 2016. [32] W. R. Harper. « Contact and Frictional Electrification ”,*OxfordUniversityPress*, London, 1967.
- [9] W. D. Greason. “Investigation of a test methodology for triboelectrification ”, *Journal of Electrostatics*, vol. 49, pp. 245–256, 2000.

- [10] D. K. Davies. "Charge generation on dielectric surfaces ", *Journal of PhysicsD:AppliedPhysics*, vol. 2, pp. 1533-1537, 1969.
- [11] G. S. P. Castle. "Contact chargingbetweeninsulators ", *Journal of Electrostatics*, vol. 40/41, pp. 13- 20, 1997
- [12] S. Nicoara, L. Calin, A. Iuga and N. Serban. "Considerations on triboelectrostaticseparation of plastic material for recyclingpurpose ", *Environment and Progress*, vol. 6, pp. 341-346, 2006.
- [13] E.G. Kelly and D.J. Spottiswood. "The theory of electrostaticseparations:areview, part 1, Fundamentals ",*Minerals Engineering*, vol. 2, pp. 33-46, 1989.
- [14] R.D. Pascoe and B.O. Connel. "Development of a method for separation of PVC and PET using flame treatment and flotation ", *Minerals Engineering*, vol. 16, pp. 1205-1212, 2003.
- [15] Y. Matsushita, N. Mori and T. Sometani. "Electrostaticseparation of plastics by friction mixer with rotary blades ", *Electrical Engineering in Japan*, vol. 127, pp. 33-40, 1999. [51] M.
- [16] Electrostatique (partie1) Mohamed.Mebrouki, EPST Tlemcen, 1 septembre 2015.
- [17] Encyclopedie-energie, histoire de l'électricité.
- [18] Fardila MohdZaihidee,Saad Mekhilef,MehdiSeyedmahmoudian,Ben Haron(dust as an unalterabledeteriorative factor affecting PV panel'sefficiency : Why and how)6school of Engineering, DeakingUniversity, Waurn Ponds, VIC,3216,Australia.
- [19] Yingya Chen, Yanfeng Liu, Zhijun tian, Yu Dong, Yong Zhou (Experimentalstudyon the effect of Dustdeposition on photovoltaic panels) 10thInternational conference on Applied Energy(ICAE2018),August 2018,Hong Kong, China.
- [20] Laboratoire des Technologie avancees du genieelectrique LATAGE Universite Mouloud Mammerie de Tiz-Ouzzou, BP17 , M.MESROUK ,A.HADJ ARAB.
- [21] Memoire de fin d'etude en vue de l'obtention du diplome de master physique energetique, Etude et simulation l'influence de la poussiere sur le rendement des

panneau photovoltaïque, Présenté par : **BOUKHEIRA NASSIRA** et **MEBARKI NAIMA**.

[22] Société Volotek: <http://www.volotek.com/renewable-technologies>.

[23] Mémoire pour l'obtention du Master d'ingénierie en Eau et Environnement, Etude de l'influence de l'inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules photovoltaïque.

[24] S. Masuda, K. Fujibayashi, K. Ishida and H. Inaba, "Confinement and Transportation of charged aerosol clouds via electric curtain", *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 92, No. 1, pp. 43-52, 1972. [46] S. Masuda and T. Kamimura, "Approximate methods for calculating a non-uniform travelling field", *Journal of Electrostatics*, Vol. 1, pp. 351-370, 1975.

[25] NYC XXI-chapitre 1.12a-les ondes stationnaires.

[26] Mémoire fin d'étude Université Djilali Liabes de Sidi bellabes faculté de génie électrique Intitulé Utilisation de la technique des ondes mobiles pour le déplacement des matériaux pulvérulents. Application pour la séparation électrostatique des particules Présenter par **ALI BIDA AHMED**.

[27] **DEPOUSSIERAGE ELECTROSTATIQUE POUR LES PARTICULES SUBMICRONIQUES EN ATMOSPHERE USUELLE (TERRE) ET RAREFIEE (PLANETE MARS)** Directeurs de Thèse : **Pierre ATTEN Jean-Luc REBOUD HAL OPEN SCIENCE**.

[28] J. Park, Y. Liu, K. D. Kihm, and L. A. Taylor, "Characterization of Lunar Dust for Toxicological Studies I: Particle Size Distribution", *J. Aerosp. Eng.*, 266– 271 (2008).

[29] J. E. Colwell, S. Batiste, M. Horányi, S. R. Robertson, and S. Sture, "The Lunar Surface: Dust Dynamics and Regolith Mechanics", *Reviews Geophysics*, vol. 45 (2), RG2006 (2007).

[30] T. J. Stubbs, R. R. Vondrak, and W. M. Farrell, "A dynamic fountain model for lunar dust", *Adv. Sp. Res.*, vol. 37 (1), 59–66 (2006).

[31] M. K. Mazumder, "Self-Cleaning Solar Panels and Concentrators with Transparent Electrodynamic Screens", Patent No. US 20132/0263393 A1 (2013).

- [32] C. I. Calle, P. J. Mackey, M. D. Hogue, M. R. Johansen, H. Yim, P. B. Delaune and J. S. Clements, “Electrodynamic dust shields on the international space station: Exposure to the space environment”, *Journal of Electrostatics*, vol. 71, no. 3, pp. 257–259, Jun. 2013.
- [33] M. K. Mazumder, R. Sharma, A. S. Biris, J. Zhang, C. Calle and M. Zahn, “Self-Cleaning Transparent Dust Shields for Protecting Solar Panels and Other Devices”, *Particulate Science and Technology*, vol. 25, no. 1, pp. 5–20, Jan. 2007.
- [34] M. A. Aegerter, “Transparent conducting ATO, ITO and AZO coatings by sol-gel process”. Retrieved February 17, 2014, from http://www.solgel.com/labfoc/inm/dipco_e.html.
- [35] H. Kawamoto and T. Shibata, “Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels”, 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 0094–0098, 2013.
- [36] Mémoire fin d’étude Université Djilali Liabes de Sidi bellabes faculté de génie électrique Intitulé Utilisation de la technique des ondes mobiles pour le déplacement des matériaux pulvérulents. Application pour la séparation électrostatique des particules Présenter par ALI BIDA AHMED.
- [37] S. Masuda, M. Washizu and M. Iwadare, “Separation of Small Particles Suspended in Liquid by Nonuniform Traveling Field *IEEE Trans. Ind. Appl.* 23, 474-480, 1987.
- [38] Y. Bourek. “Détermination des conditions d’ionisation caractérisant le seuil de claquage de l’air par la logique floue”, Thèse de magister, université de Batna, 2005.
- [39] R. D. Medina, “Alimentation de puissance d’une lampe exciplexe à décharge à barrière diélectrique, en vue du contrôle du rayonnement”, Thèse de doctorat de l’université Toulouse, octobre 2008.
- [40] K. Allégraud, “Décharge à Barrière Diélectrique de surface : physique et procédé”, Thèse de doctorat, école polytechnique, 2009.
- [41] I. Ndiaye, “Initiation et développement des décharges couronnes sur une surface de glace”, Mémoire d’ingénieur, université Québec, mai 2003.

[42] A. Ouari, A. Alibida, F. Miloua and A. Tilmatine, “Design and Achievement of a New Hybrid Filter System Used in Cement”, Works Proceedings of Euro-Mediterranean Conference for Environmental Integration (EMCEI-1), pp. 1063-1066, Tunisia, 2017.

[43] A. Abahazem “Études expérimentales des décharges couronnes pour la dépollution des gaz”, Thèse de doctorat, l’université de Toulouse III – Paul Sabatier, Décembre 2009.