

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITÉ DE RELIZANE
Faculté des Sciences et Technologies
Département d'Électrotechnique et Automatique



THÈSE DE DOCTORAT LMD 3^{ème} cycle

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Électrotechnique Industrielle

M^r BENDAOUDI Zeid

Titre de thèse

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DU NETTOYAGE DES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES PAR PROCÉDÉ ÉLECTROSTATIQUE

Devant le jury composé de:

Président	MILOUDI Mohamed	MCA.	Univ. de Relizane
Directeur de thèse	NAMOUNE Abdelhadi	MCA.	Univ. de Relizane
Co-Directeur de thèse	KADOUS Nezha	MCA.	Univ. de Mascara
Examineur	TALEB Rachid	Prof.	Univ. de Chlef
Examineur	BENABBOUN Adel	MCA.	Univ. de Mascara
Examineur	BENAIREN Noredine	MCA.	Univ. de Relizane

Année Universitaire : 2024/2025

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

REMERCIEMENT

Avant toute chose, je remercie **ALLAH**, le tout puissant, pour m'avoir accordé la force, la volonté et la patience pour mener à bien ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude envers mon directeur de thèse **Dr. NAMOUNE Abdelhadi**, pour son encadrement attentif, ses conseils éclairés et son soutien indéfectible tout au long de ce parcours de recherche. Sa vision, son expertise et son dévouement ont été des éléments essentiels dans la réalisation de ce travail. Je suis reconnaissant pour sa disponibilité, sa patience et sa capacité à stimuler ma réflexion et mon apprentissage.

Je souhaite également adresser mes remerciements les plus sincères à mon Co-encadrant, **Dr. KADOUS Nezha**, pour sa collaboration précieuse et ses contributions significatives à ce projet. Son expertise complémentaire et son engagement ont enrichi mon expérience de recherche et ont grandement contribué à la qualité de ce travail. Sa présence attentive et ses conseils avisés ont été d'une aide inestimable.

Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers tous les membres de notre laboratoire APELEC, et en particulier son directeur, le Professeur **TILMATINE Amar**, Sa direction éclairée, son soutien infaillible et son engagement envers l'excellence scientifique ont été des piliers essentiels dans la réalisation de ce projet de recherche. Je suis reconnaissant envers tout le groupe des enseignants de la recherche scientifique dans ce laboratoire **Dr. KADOUS Nezha, Dr. BENABBOUN Adel, Pr. BELLEBNA Yassine et Pr. Yanallah khelifa** , dont les connaissances, les conseils et les encouragements ont été d'une grande valeur pour moi tout au long de ce travail.

Mes remerciements vont également au **Dr. MILOUDI Mohammed** (Professeur à l'Université de rélizane) pour m'avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Je tiens à exprimer ma gratitude envers les membres du jury, **Dr. BENAIRED Noredline** (Maître de Conférence A à l'Université de rélizane), **Pr. TALEB Rachid** (Professeur à l'Université de chlef), et **Dr. BENABBOUN Adel** (Maître de Conférence A à l'Université de mascara), qui ont accepté d'examiner et d'évaluer mon travail en se basant sur leur expertise reconnue dans ce domaine.

BENDAOUDI Zeid

Table des matières

<u>INTRODUCTION GENERALE</u>	1
<u>I. ETAT DE L'ART SUR LA DECHARGE COURONNE ET VENT IONIQUE</u>	4
<u>INTRODUCTION</u>	4
<u>I.1 DECHARGES ELECTRIQUES A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE</u>	5
<u>I.1.1 Décharge à barrière diélectrique</u>	6
<u>I.1.2 Décharge couronne :</u>	7
<u>I.2 LES RÉGIMES DE LA DÉCHARGE ÉLECTRIQUE (CARACTÉRISTIQUE 'COURANT-TENSION')</u>	8
<u>I.2.1 Le premier régime</u>	8
<u>I.2.2 Le second régime</u>	8
<u>I.2.3 Le troisième régime</u>	9
<u>I.2.4 Le quatrième régime</u>	9
<u>I.3 DIFFÉRENTS TYPES DES DÉCHARGES COURONNES</u>	9
<u>I.3.1 Décharge couronne positive</u>	10
<u>I.3.2 Décharge couronne négative :</u>	12
<u>I.4 FACTEURS INFLUENÇANT LA DÉCHARGE COURONNE</u>	14
<u>I.4.1 Facteurs géométriques</u>	14
<u>I.4.2 Facteurs physico-chimiques</u>	17
<u>I.4.3 Facteurs électriques</u>	18
<u>I.5 APPLICATION DE LA DÉCHARGE COURONNE :</u>	19
<u>I.6 LE VENT IONIQUE</u>	20
<u>I.6.1 Histoire du vent ionique</u>	21
<u>I.6.2 Génération de vent ionique</u>	22
<u>I.6.3 Progrès récents dans le vent ionique et ses applications</u>	24
<u>CONCLUSION :</u>	29
<u>II. ENERGIE SOLAIRE ET METHODE DE NETTOYAGE DES PANNEAUX SOLAIRES</u>	31
<u>INTRODUCTION</u>	31
<u>II.1 L'ENERGIE SOLAIRE DANS LE MONDE</u>	31
<u>II.2 LE PV SOLAIRE EN ALGERIE</u>	33
<u>II.3 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE</u>	34
<u>II.3.1 Effet photovoltaïque</u>	34
<u>II.3.2 Générateur photovoltaïque</u>	35
<u>II.3.3 Structure de la cellule photovoltaïque</u>	38
<u>II.3.4 Les différentes technologies de cellule PV</u>	39
<u>II.3.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque</u>	42
<u>II.3.6 Association des panneaux PV</u>	44
<u>II.3.7 Influence de l'éclairement et de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$</u>	45
<u>II.3.8 La protection des modules solaires</u>	48
<u>II.3.9 Les différents types de systèmes photovoltaïques</u>	50
<u>II.3.10 Avantages et inconvénients du PV</u>	51
<u>II.4 LES TECHNIQUES DE NETTOYAGE DES PANNEAUX SOLAIRES</u>	53
<u>II.4.1 Nettoyage naturel à l'aide de la pluie et du vent</u>	53
<u>II.4.2 Nettoyage à l'eau</u>	53
<u>II.4.3 Nettoyage manuel</u>	54
<u>II.4.4 Nettoyage mécanique</u>	55

<u>II.4.5</u>	<u>L'écran électrodynamique (EDS)</u>	56
<u>II.4.6</u>	<u>Revêtement super hydrophobe</u>	57
<u>II.4.7</u>	<u>Autonettoyant ultrasonique</u>	58
<u>CONCLUSION:</u>	ERREUR ! SIGNET NON DÉFINI.	
III.	<u>MATERIEL ET METHODE</u>	62
<u>INTRODUCTION</u>		62
<u>III.1</u>	<u>MATÉRIAUX</u>	62
<u>III.1.1</u>	<u>La poussière de sable</u>	62
<u>III.2</u>	<u>GENERATEUR DE LA HAUTE TENSION CONTINUE</u>	63
<u>III.3</u>	<u>APPAREILLAGE DE MESURE</u>	63
<u>III.3.1</u>	<u>Mesure de la vitesse du vent</u>	63
<u>III.3.2</u>	<u>Mesure de l'humidité relative</u>	65
<u>III.3.3</u>	<u>Mesure de la masse granulaire</u>	65
<u>III.3.4</u>	<u>Analyseur de la taille des particules de sable</u>	66
<u>III.3.5</u>	<u>Analyseur de La composition chimique des particules de sable : spectromètre à rayons X (M4 Tornado)</u>	67
<u>III.4</u>	<u>DESCRIPTION DE DISPOSITIF DE NETTOYAGE :</u>	68
<u>III.4.1</u>	<u>Actionneur de nettoyage :</u>	70
<u>III.5</u>	<u>PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF DE NETTOYAGE</u>	72
<u>III.6</u>	<u>PROCEDURE EXPERIMENTALE</u>	74
<u>III.6.1</u>	<u>Procédure de déroulement des expériences de mesure du courant ou de puissance</u>	74
<u>III.6.2</u>	<u>Procédure de déroulement des expériences de mesure de la vitesse du vent</u>	74
<u>III.6.3</u>	<u>Procédure de déroulement des expériences de mesure de l'efficacité</u>	74
<u>CONCLUSION</u>		75
IV.	<u>ETUDE EXPERIMENTAL PARAMETRIQUE DE PROCEDE DE NETTOYAGE ELECTROSTATIQUE</u>	77
<u>INTRODUCTION</u>		77
<u>IV.1</u>	<u>ANALYSE DE L'EFFICACITE DE NETTOYAGE</u>	77
<u>IV.1.1</u>	<u>Configuration FIL/RECTANGLE</u>	77
<u>IV.1.2</u>	<u>CONFIGURATION FIL/PLAQUE</u>	83
<u>CONCLUSION</u>		87
V.	<u>MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE NETTOYAGE</u>	90
<u>INTRODUCTION</u>		90
<u>V.1</u>	<u>CONCEPTS FONDAMENTAUX</u>	90
<u>V.1.1</u>	<u>Facteurs, réponses et interactions</u>	90
<u>V.2</u>	<u>LES VARIABLES CODÉES</u>	91
<u>V.3</u>	<u>MODÉLISATION MATHÉMATIQUE</u>	92
<u>V.4</u>	<u>AVANTAGES DE LA MÉTHODE DE PLAN D'EXPÉRIENCES</u>	92
<u>V.5</u>	<u>LES PLANS COMPOSITES À FACES CENTRÉES :</u>	93
<u>V.6</u>	<u>LOGICIEL MODDE 5.0 :</u>	95
<u>V.7</u>	<u>MÉTHODES ET RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES PLANS D'EXPÉRIENCES :</u>	95
<u>V.7.1</u>	<u>Domaines de variation des facteurs étudiés</u>	96
<u>V.7.2</u>	<u>Identification du point de fonctionnement optimal</u>	97
<u>V.7.3</u>	<u>Analyse des résultats de la vitesse de vent :</u>	99
<u>CONCLUSION :</u>		104
CONCLUSION GENERALE		106

Bibliographie.....	108
Resumé.....	116

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: schéma illustrant la distinction entre le gaz neutre et le plasma.	5
Figure I.2: Configurations classique d'une DBD de volume .	6
Figure I.3: Décharge couronne	7
Figure I.4 : Configurations d'électrodes courantes pour la création de la décharge couronne .	8
Figure I.5 : Caractéristique 'courant-tension' de La configuration "pointe-plan" d'une décharge électrique dans l'air à pression atmosphérique .	9
Figure I.6 : Décharge couronne positive en configuration pointe – plan .	11
Figure I.7 : Différents régimes de la décharge couronne positive en augmentant la tension appliquée	11
Figure I.8 : Schéma des régions d'ionisation et de dérive dans une décharge couronne négative .	13
Figure I.9 : Différents régimes de la décharge couronne négative dans une configuration pointe-plan	13
Figure I.10 : Influence de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne	15
Figure I.11 : les caractéristiques du courant-tension en fonction de la nature des matériaux des électrodes	16
Figure I.12 : L'influence des matériaux d'électrodes sur la mobilité ionique (μ) en tension positive/en tension négative ($d=0,5$ cm et $r_0=125$ μ m)	18
Figure I.13 : Les Application de la décharge couronne (a) Générateur d'ozone, (b) Filtre électrostatique, (c) Séparateur électrostatique .	20
Figure I.14 : Schéma de la génération de vent ionique .	23
Figure I.15 : Diverses combinaisons d'électrodes pour la création du vent ionique .	24
Figure I.16 : GVI à grande échelle	26
Figure I.17 : Configurations d'électrodes des GVI miniaturisés en 3D dans des études publiées récemment	26
Figure I.18 : Schéma de l'accumulation de la poussière dans un ESP.	27
Figure II. 1 : Part de l'énergie primaire provenant du solaire, 2019	32
Figure II. 2 : Le potentiel mondial de l'énergie photovoltaïque	33
Figure II. 3 : La répartition mondiale de la production photovoltaïque	33
Figure II. 4 : rayonnement solaire en Algérie (kW/m ²)	34
Figure II. 5 : Générateur photovoltaïque	36
Figure II. 6 : Les Composants d'un panneau solaire	36
Figure II. 7 : Illustration des bandes d'énergie des divers matériaux .	38
Figure II. 8 : La structure générale de la cellule photovoltaïque .	39
Figure II. 9 : Cellule au Silicium monocristallin	40
Figure II. 10 : Cellule au Silicium poly cristallin	40
Figure II. 11 : Silicium amorphe	41
Figure II. 12 : Les Caractéristiques de la cellule PV	42
Figure II. 13 : Caractéristique de courant I(V) résultante de l'association des panneaux PV en série	44
Figure II. 14 : Caractéristique de la puissance P(V) résultante de l'association des panneaux PV en série	44
Figure II. 15 : Caractéristique de courant I(V) résultante de l'association des panneaux PV en parallèle	45
Figure II. 16 : Caractéristique de la puissance P(V) résultante de l'association des panneaux PV en parallèle	45
Figure II. 17 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule PV	46
Figure II. 18 : Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule PV	47

Figure II. 19 : Effet d'ombrage sur les caractéristique I(V) du module PV [58].	47
Figure II. 20 : Schéma d'un module solaire avec protections	48
Figure II. 21 : Un champ photovoltaïque associé avec la diode de protection anti-retour (Ns : modules en séries et Np : branches en parallèle) .	49
Figure II. 22 : Association des cellules en séries avec la diode de protection by-pass .	49
Figure II. 23 : Installation PV autonome	50
Figure II. 24 : Installation PV couplée au réseau .	51
Figure II. 25 : Nettoyage manuel des panneaux PV .	55
Figure II. 26 : Panneaux solaires nettoyés automatiquement .	56
Figure II. 27 : Panneaux solaires nettoyé par brosses automatisées .	56
Figure II. 28 : Système de nettoyage électrodynamique détachable pour l'élimination de la poussière des panneaux solaires	57
Figure II. 29 : Revêtement super hydrophobe .	58
Figure II. 30 : Observations générales d'une section du panneau solaire : à gauche - panneau ayant subi une pollution artificielle ; à droite - panneau après le processus de nettoyage par ultrasons .	59
Figure II. 31 : Applications de nettoyage de panneaux solaires basées sur des actionneurs piézoélectriques situés à la surface du panneau.	59
Figure III. 1 : Analyse des particules de sable	63
Figure III. 2: Source haute tension continu (XP Glassman, 40 kV, 15 mA).	63
Figure III. 3 : Anémomètre de type (a) Anémomètre testo 405i , (b) Anémomètre Benetech GM8903	64
Figure III. 4 : Thermo-hygrometer CA 1246	65
Figure III. 5 : Balance numérique CAS MWP-600H.	66
Figure III. 6 : Granulométrie laser (Fritsch, Analyzer 22) .	67
Figure III. 7 : Spectromètre à rayons X (M4 Tornado) .	68
Figure III. 8 : Photographie du dispositif de nettoyage (a) Actionneur avec matériels utilisés, (b) Actionneur lié au véhicule .	69
Figure III. 9 : Schéma descriptif du dispositif de nettoyage .	70
Figure III. 10 : Schéma descriptif de la Configuration fil/rectangle	71
Figure III. 11 : Schéma descriptif de la configuration fil/plaque. (a) actionneur de vent, (b) actionneur + véhicule.	72
Figure III. 12 : Schéma descriptif du Principe de fonctionnement du dispositif « Configuration Fil/Plaque ».	73
Figure III. 13 : Photographie descriptif de l'opération de nettoyage	73
Figure IV. 1 : Caractéristique courant-tension de la décharge couronne en polarité positive et en négative pour d=1 cm	78
Figure IV. 2 : Caractéristique courant-tension de la décharge couronne en polarité négative pour trois largeur d'ouverture (d = 1 cm, d = 3 cm et d = 5 cm).	78
Figure IV. 3 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique en fonction de la tension en polarité négative et en positive pour d=1 cm.	79
Figure IV. 4 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique en fonction de la tension en polarité négative pour trois valeurs différentes de la distance d'ouverture (d = 1, 3 et 5 cm).	80
Figure IV. 5 : Caractéristique de l'efficacité de nettoyage pour les tensions appliquées (15, 20, et 25 kV) et trois distance d'ouverture d pour (Va = 0,7 cm/s), a) polarité positive, et b) polarité négative.	82

Figure IV. 6 : Caractéristique de l'efficacité de nettoyage en fonction de la vitesse de dispositif pour trois distances d'ouverture ($d = 1, 3$ et 5 cm) avec polarité négative, a) $V=20$kV, et b) $V=25$kV.	82
Figure IV. 7 : Variation de la puissance en fonction de l'écart inter-électrodes ($d = 20, 30$ et 40 mm)	83
Figure IV. 8 : Influence de la largeur de plaque sur la puissance consommée pour ($L=20$ mm et 30 mm)	84
Figure IV. 9 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique pour les différents écarts d'électrodes ($d=20, 30$ et 40 mm)	85
Figure IV. 10 : Influence de la largeur de plaques sur la variation de la vitesse du vent pour ($L=20$ mm et 30).	86
Figure IV. 11 : Caractéristique de l'efficacité du nettoyage des panneaux solaires en fonction de la tension pour deux valeurs de largeurs de plaques ($L=20$ mm et 30 mm).	87
Figure IV. 12 : L'efficacité de dispositif de nettoyage pour deux vitesses de déplacement en fonction de la tension (pour $L= 30$ mm)	87
Figure V. 1: Environnement du système. [100]	90
Figure V. 2 : Disposition des expériences dans un plan composite à faces centrées.	94
Figure V. 3 : schéma descriptive de l'actionneur à vent ionique (1) L'électrode couronne ; (2) Tube électrostatique ; (3) Tubes relié à la terre	96
Figure V. 4 : Variation de la vitesse du vent et de la consommation de courant en fonction de la tension appliquée ($D = 2.4$ Cm, $L = 8$ mm).	96
Figure V. 5 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la distance inter-électrodes ($U= 22$ kV, $L = 8$ mm).	97
Figure V. 6 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la distance inter-tubes ($U = 30$ kV, $D = 2.8$ Cm).	97
Figure V. 7 : Coefficients des facteurs et leurs interactions sur la vitesse du vent.	100
Figure V. 8 : Coefficients des facteurs et leurs interactions sur le courant consommé.	101
Figure V. 9 : Courbes de prédiction de la vitesse du vent en fonction de : a) tension électrique b) Distance inter-électrode, et c) Distance inter-tube.	101
Figure V. 10 : Courbes de prédiction du courant en fonction de : a) tension électrique b) Distance inter-électrode, et c) Distance inter-tube.	102
Figure V. 11 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent -paramètre : [Tension kV]	103
Figure V. 12 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent – paramètre : [Distance inter-électrodes cm]	103
Figure V. 13 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent – paramètre : [Distance inter- Tubes mm]	103
Figure V. 14 : La vitesse optimale en utilisant le logiciel MODDE 5.0	104
Figure V. 15 : l'équilibre optimale en utilisant le logiciel MODDE 5.0	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : L'influence des matériaux d'électrodes sur la mobilité ionique (μ) en tension positive/en tension négative ($d=0,5$ cm et $r_0=125$ μm)	16
Tableau II. 1 : Potentiel solaire en Algérie .	33
Tableau V. 1 : Résultats expérimentaux du plan composites à faces centrées	99

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

De nos jours, l'importance cruciale de l'énergie dans l'évolution et l'avancement des sociétés est indéniable. Si l'essentiel de cette énergie provient encore des ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, il est impératif de reconnaître que ces sources sont éphémères et génèrent des polluants néfastes pour notre environnement, notamment le dioxyde de carbone et le méthane. Cette prise de conscience mondiale a conduit à un mouvement irréversible vers l'adoption des énergies renouvelables comme alternative viable. Aujourd'hui, les pays industrialisés rivalisent d'ingéniosité pour exploiter des sources d'énergie telles que le soleil, le vent, les vagues et l'énergie océanique, marquant ainsi une transition vers un avenir énergétique plus durable et respectueux de l'environnement.

Depuis longtemps déjà, l'énergie du soleil est mise à profit dans divers domaines de la vie quotidienne, comme pour chauffer des habitations, chauffer de l'eau pour les besoins domestiques ou industriels, distiller de l'eau, ou encore pour sécher des aliments comme la viande. Les possibilités d'utilisation de cette énergie solaire sont nombreuses, offrant la chance de tirer parti de la chaleur transportée par le rayonnement solaire. Par ailleurs, l'énergie solaire présente également un énorme potentiel dans la production d'électricité, grâce à des systèmes hybrides innovants. Ces derniers comprennent notamment des technologies comme la cheminée solaire, les centrales solaires concentrées, ainsi que les célèbres cellules photovoltaïques (PV). Les progrès réalisés dans le domaine des PV ont été remarquables, que ce soit en augmentant leur rendement électrique ou en abaissant leurs coûts de fabrication, ce qui en fait une solution de plus en plus attrayante sur le plan économique et environnemental.

Indéniablement, l'énergie solaire représente un atout majeur pour notre pays. En effet, le potentiel solaire de l'Algérie est parmi les plus importants du bassin méditerranéen. Avec une superficie de plus de deux millions de kilomètres carrés, notre nation bénéficie quotidiennement d'un ensoleillement abondant, pour produire un maximum d'énergie. Il est à noter qu'une simple surface horizontale d'un mètre carré peut générer jusqu'à 5 kWh de puissance. De plus, sur la quasi-totalité du territoire national, la durée d'ensoleillement dépasse les 2000 heures par an, et peut même atteindre jusqu'à 3900 heures dans les régions des hauts plateaux et du Sahara [1].

Cependant, en dépit de tous ces avantages, les performances des panneaux solaires peuvent être sérieusement compromises par un problème majeur : l'accumulation de poussière sur leur surface. De nombreuses études ont mis en évidence les effets néfastes de cette accumulation de poussière sur l'efficacité de conversion solaire des panneaux. En effet, la présence de poussière réduit la quantité de lumière solaire parvenant aux cellules photovoltaïques, entraînant ainsi une baisse de la production d'électricité. La poussière agit comme un obstacle, bloquant le passage de la lumière solaire et réduisant ainsi l'efficacité du processus de conversion d'énergie solaire. Des recherches expérimentales ont même révélé

des résultats préoccupants, indiquant que l'efficacité des panneaux solaires pouvait diminuer jusqu'à 30 à 40 % en raison de l'accumulation de poussière, entraînant une réduction de la production d'électricité pouvant aller jusqu'à 86 % [2]. Ces chiffres soulignent l'importance cruciale d'un nettoyage régulier des panneaux solaires pour maintenir leurs performances optimales.

Nos travaux de recherches présentés dans cette thèse traitent particulièrement cette problématique de nettoyage des panneaux solaires par un procédé électrostatique en utilisant le vent ionique pour enlever la poussière de sable accumulée sur la surface du panneau solaire. Pour atteindre nos objectifs, nous avons proposé des configurations importantes de l'actionneur de vent ionique pour avoir les meilleures valeurs de vitesse du vent utilisé pour le nettoyage des panneaux solaires :

- La configuration FIL/RECTANGLE, avec un fil relié à la haute tension et un rectangle relié à la masse.
- La configuration FIL/PLAQUE, avec un fil relié à la haute tension et une plaque reliée à la masse.
- La configuration LAME A POINTES/TUBES, avec une lame a pointe reliée à la haute tension et deux tubes reliés à la masse.

Ce travail de thèse se compose de cinq chapitres décrits ci-après :

Dans le premier chapitre, nous abordons les fondamentaux de la décharge électrique, en mettant un accent particulier sur les décharges couronnes, ainsi que les mécanismes de formation des décharges couronne et les types de décharges. Après avoir examiné les principes physiques de la formation de la décharge couronne, nous établissons un état de l'art sur le vent ionique. Enfin, nous passons en revue les diverses méthodes de génération du vent ionique et explorons les applications associées à ce phénomène.

Le deuxième chapitre se concentre sur la notion globale de conversion photovoltaïque. Nous examinons en détail l'impact énergétique du soleil sur notre planète, ainsi que les différentes méthodes de mesure et de définition du rayonnement solaire. Nous explorons également la structure et le fonctionnement des cellules photovoltaïques, en mettant en lumière les diverses technologies utilisées dans ce domaine. En outre, nous discutons des avantages et des inconvénients de l'énergie solaire, offrant ainsi un aperçu complet des aspects techniques et pratiques de cette forme d'énergie renouvelable. Enfin, nous présentons les différentes techniques de nettoyage des panneaux solaires développées auparavant par les chercheurs scientifiques.

Dans le troisième chapitre intitulé matériels et méthodologies, l'accent est mis sur les matériels, les appareils de mesure et une description du dispositif de nettoyage de nettoyage des panneaux solaires. Il explique également le principe de fonctionnement du dispositif de

nettoyage électrostatique par décharge couronne, ainsi que les procédures de déroulement des expériences de nettoyage pour deux configurations différentes (Fil/Rectangle et Fil/Plaque).

Le quatrième chapitre se focalise sur l'analyse expérimentale du dispositif de nettoyage des panneaux solaires. La recherche porte sur deux configurations différentes de l'actionneur qui crée le vent ionique, afin d'optimiser la vitesse du vent ionique pour atteindre l'efficacité de nettoyage optimale. Des expériences de nettoyage ont également été menées sur des échantillons de sable avec plusieurs vitesses de véhicule.

Le cinquième chapitre se focalise sur la modélisation et l'optimisation de cette méthode de nettoyage électrostatique des panneaux solaires à base de vent ionique en utilisant la méthode des plans d'expériences. L'objectif est de modéliser et d'améliorer l'efficacité de l'actionneur de nettoyage à vent ionique avec une nouvelle configuration *Lame a pointes/Tubes* qui nous a donné les meilleurs résultats de vitesse du vent utilisé pour le nettoyage électrostatique des panneaux solaires.

Enfin, la conclusion générale présente un aperçu des travaux effectués et expose les perspectives offertes par cette thèse.

CHAPITRE_I

ETAT DE L'ART SUR LA DECHARGE COURONNE ET VENT IONIQUE

I. ETAT DE L'ART SUR LA DECHARGE COURONNE ET VENT IONIQUE

Introduction

Au sein de ce chapitre, nous nous immergerons dans l'univers captivant des décharges électriques à la pression atmosphérique, avec une attention particulière portée à la décharge couronne. Ce phénomène électrique complexe se manifeste dans divers contextes, allant des applications industrielles aux phénomènes naturels, et mérite une exploration approfondie de ses mécanismes fondamentaux. Notre enquête débutera en examinant en détail le mécanisme de formation des décharges couronnes. Comprendre comment ces décharges émergent dans des conditions atmosphériques variées est essentiel pour appréhender leur impact sur la qualité de l'air et les phénomènes météorologiques. Nous analyserons les processus physiques sous-jacents, les interactions entre les molécules atmosphériques et les particules chargées, ainsi que les conditions propices à l'émergence de ces phénomènes électriques. Par la suite, nous explorerons la diversité des types de décharges couronnes. Des décharges pointues aux décharges de surface ainsi des décharges positives et négatives, chaque variante présente des caractéristiques distinctes qui influent sur leurs performances et leurs implications dans différents contextes. Une classification approfondie nous permettra de saisir la complexité de ces manifestations électriques et d'anticiper leurs effets potentiels. Outre les types de décharges couronnes, nous examinerons attentivement les facteurs qui exercent une influence significative sur leur occurrence. Les propriétés des matériaux, les conditions atmosphériques, les gradients de tension et d'autres paramètres joueront un rôle crucial dans la formation et le développement de ces décharges. Une compréhension approfondie de ces facteurs est impérative pour concevoir des systèmes électriques résilients et prévenir les défaillances indésirables.

Une section dédiée à l'étude du vent ionique enrichira notre exploration. Nous aborderons le concept du vent ionique et ses mécanismes de génération par la décharge couronne. Ce volet offre un éclairage novateur sur les phénomènes ioniques atmosphériques et leur interconnexion avec les décharges électriques. Enfin, nous concluons ce chapitre en mettant en lumière les applications du vent ionique. Des technologies novatrices aux domaines de la recherche atmosphérique et de l'environnement, le vent ionique a le potentiel de façonner divers secteurs. En explorant ces applications, nous établirons des liens entre les connaissances théoriques acquises et les implications pratiques, soulignant ainsi l'importance de cette recherche pour la société et la technologie. En somme, ce chapitre constitue une

plongée détaillée dans les décharges électriques atmosphériques, offrant une compréhension approfondie des mécanismes sous-jacents, des différents types, des facteurs influençant leur occurrence, et des applications innovantes du vent ionique.

I.1 Définition d'un plasma

Le mot plasma a été inventé par Irving Langmuir en 1928 pour désigner un gaz ionisé. Un plasma, le quatrième état de la matière, est composé de particules neutres (molécules, atomes, radicaux) et de particules chargées (ions, électrons) qui sont en vibration constante (Figure I.1). Le nombre de particules chargées est adéquat pour conférer au gaz les caractéristiques d'un conducteur électrique.

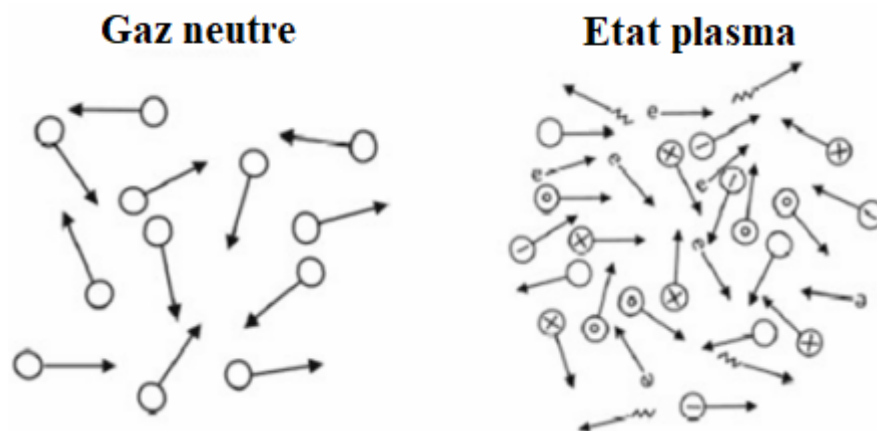


Figure I.1: schéma illustrant la distinction entre le gaz neutre et le plasma.

Cet état rassemble donc une grande variété de plasmas, qu'ils soient naturels ou fabriqués par l'homme. Dans l'univers, par exemple, le plasma désigne à la fois le milieu interstellaire diffus et le centre d'une étoile. Les plasmas sont souvent liés à des phénomènes naturels tels que la foudre ou les aurores boréales sur Terre.

Les plasmas artificiels, fabriqués par les êtres humains, sont employés dans de nombreuses applications industrielles variées et représentent un domaine de recherche très dynamique et multiple [3].

I.2 DECHARGES ELECTRIQUES A LA PRESSION ATMOSPHERIQUE

La décharge électrique, un phénomène qui se produit dans les gaz lorsqu'ils sont exposés à un fort champ électrique $\vec{E}$, les rendant plus ou moins conducteurs. Ces décharges électriques, provoquées par l'application d'une tension (continue, alternative, ou pulsée) entre

deux électrodes, génèrent des plasmas non thermiques. Les électrons énergétiques sont créés par leur accélération dans le champ électrique au sein du gaz [3]. Le plasma ainsi formé est spatialement inhomogène, manifestant des filaments lumineux très fins d'environ quelques dizaines de micromètres, et il reste dans un régime transitoire de courte durée, de l'ordre de quelques dizaines de nanosecondes. Selon la configuration des électrodes, ces décharges électriques à la pression atmosphérique peuvent adopter une structure de type couronne lorsque l'électrode à haute tension a une forme incurvée ou Décharge à Barrière Diélectrique lorsque les électrodes sont recouvertes d'un diélectrique [4].

I.2.1 Décharge à barrière diélectrique

Dans le cas d'une décharge de type couronne dans l'air, la création de charges d'espace peut entraîner des arcs électriques, ce qui restreint l'accroissement de la tension dans cette situation. Le matériau qui subit les arcs électriques peut être confronté à des problèmes, mais aussi lorsqu'ils sont indésirables, comme dans un environnement à risque. Il est possible de trouver une solution simple en plaçant un matériau diélectrique solide au milieu des deux électrodes métalliques, afin de restreindre l'énergie qui circule dans le canal de décharge et ainsi éviter le passage aux arcs. La configuration utilisée pour produire cette décharge est appelée « Décharge à Barrière Diélectrique », comme illustré dans la Figure I.2.

Dans ce genre de décharge, on utilise généralement une tension alternative pour éliminer l'accumulation de charges à la surface du diélectrique au départ de chaque alternance. Lorsqu'une alimentation continue, ou alternative, est utilisée, la tension augmente progressivement jusqu'à arriver au potentiel d'ionisation, ce qui entraîne la décharge. Lorsque l'on applique une tension élevée dans un laps de temps court (généralement inférieur à la microseconde), les électrons seront accélérés dans la zone de décharge, contrairement aux ions qui possèdent une mobilité électrique plus faible en raison de leur poids [5].

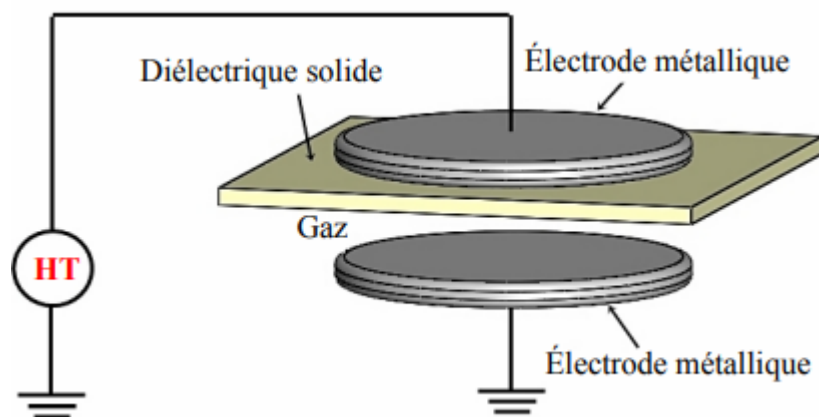
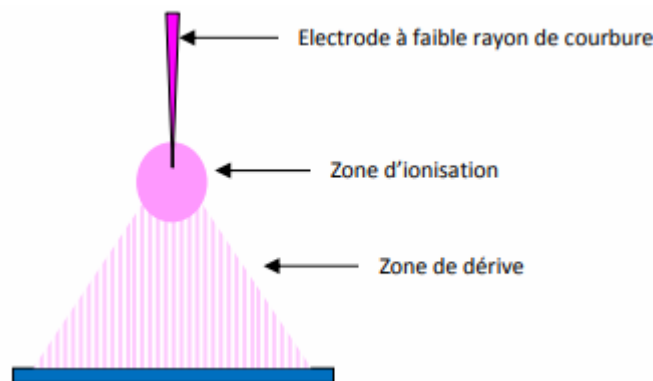


Figure I.2: Configurations classique d'une DBD de volume [6].

I.2.2 Décharge couronne :

Les décharges couronnes, parfois appelées décharges à effet corona, se manifestent généralement à la pression atmosphérique. On peut décrire une décharge couronne comme une sorte de décharge électrique qui se maintient d'elle-même "autoentretenue" et « non destructive" dans un gaz. Elle peut se produire entre deux électrodes asymétriques : l'une ayant un petit rayon de courbure, reliée à une haute tension (appelée "électrode active"), et l'autre, généralement plate, reliée à la terre (appelée "électrode passive"). En raison de la dissymétrie des électrodes, un champ électrique inhomogène se forme dans l'espace entre les électrodes, se divisant en deux zones distinctes : une zone d'ionisation "active" et la zone de dérive (voir Figure I.3).

Près de l'électrode à faible rayon de courbure (dans la zone active), le champ électrique est suffisamment fort pour provoquer l'ionisation du gaz, limitant ainsi les phénomènes d'avalanche dans l'espace en raison de la diminution du champ électrique. Entre les deux électrodes se trouve aussi la zone de dérive "ou unipolaire", où les ions du même signe que l'électrode à faible rayon de courbure dérivent vers l'autre électrode.

**Figure I.3: Décharge couronne**

L'étude de la décharge couronne suscite un intérêt varié et motivés par plusieurs raisons [7]. On peut explorer les phénomènes précurseurs du développement de l'arc, comprendre la précipitation électrostatique (la capacité de charger des particules dans un gaz) et même neutraliser les charges indésirables dans les surfaces de matériaux diélectriques. Il est à noter que la polarité de la haute tension appliquée à l'électrode de faible rayon de courbure détermine si la décharge couronne est négative, positive ou alternative [8].

Les configurations les plus couramment utilisées pour générer la décharge couronne sont illustrées dans la Figure I.4.

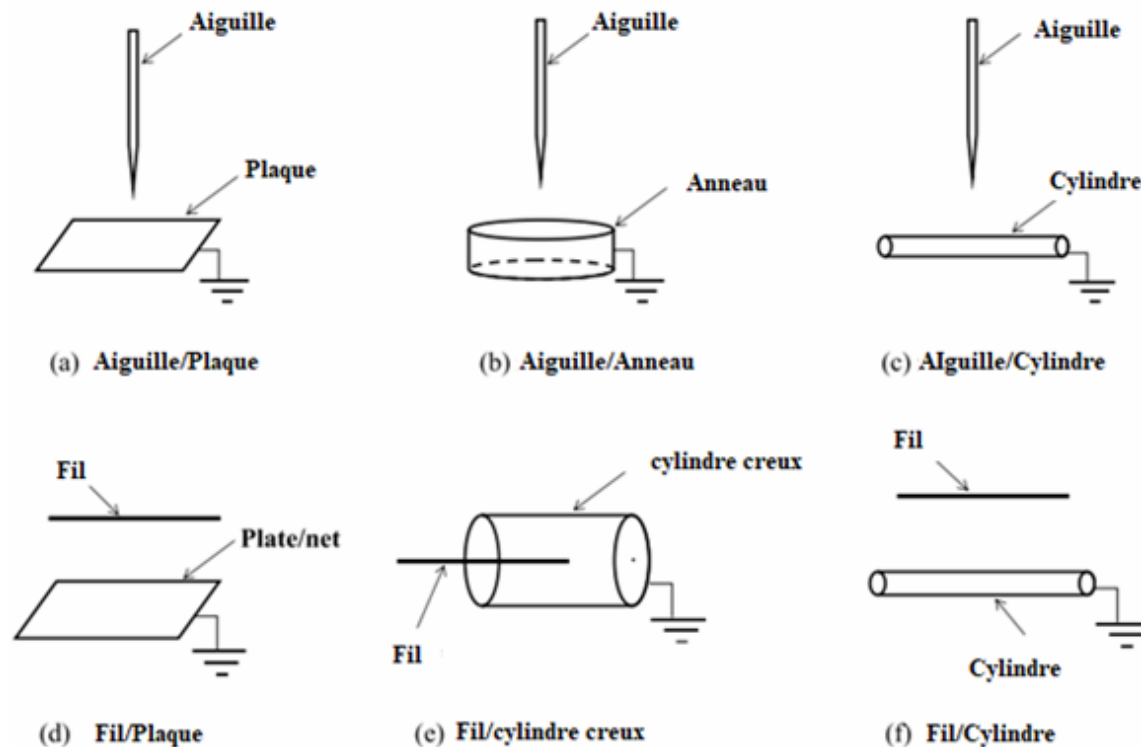


Figure I.4 : Configurations d'électrodes courantes pour la création de la décharge couronne [9].

I.3 Les régimes de la décharge électrique (caractéristique 'courant-tension')

Le comportement du courant en fonction de la valeur de la tension appliquée est illustré dans la figure. La courbe distingue quatre régimes différents pour contrôler la décharge électrique [10].

I.3.1 Le premier

Ce régime consiste à réunir des espèces chargées naturellement présentes dans l'environnement. Ces particules sont générées par l'interaction de rayons cosmiques ou de la radioactivité naturelle (de particules provenant de la désintégration spontanée de certains atomes radioactifs) avec le gaz présent dans l'espace inter-électrodes.

I.3.2 Le second régime

Ce régime déclenche dès qu'une tension seuil V_i est atteinte, marquant le commencement de l'avalanche électronique de Townsend sans toutefois satisfaire au critère

d'auto-entretien de la décharge. À ce stade, la décharge dépend de processus d'ionisation externes pour produire des électrons germes, ce qui la rend non-autonome. Dans ce régime, pour une très faible variation de la tension appliquée, le courant augmente considérablement

I.3.3 Le troisième régime

Dans ce régime, l'ionisation du gaz provoquée par la décharge atteint un niveau tel qu'elle n'a plus besoin de phénomènes d'ionisation extérieurs (la décharge devient auto-entretenu). C'est le régime de la décharge couronne, caractérisé par l'apparition des dards, également connus sous le nom de "streamers".

I.3.4 Le quatrième régime

Dans ce cas comme il est présenté dans la figure I.5, une fois que la tension appliquée dépasse la valeur critique "VR", la température du canal augmente de manière significative, entraînant une expansion rapide du gaz. Le champ réduit "E/N" devient alors important pour que les phénomènes d'ionisation prévalent (devient majoritaire) sur ceux de l'attachement électronique. Cela marque l'entrée dans le régime d'arc, où le milieu devient un plasma thermique.

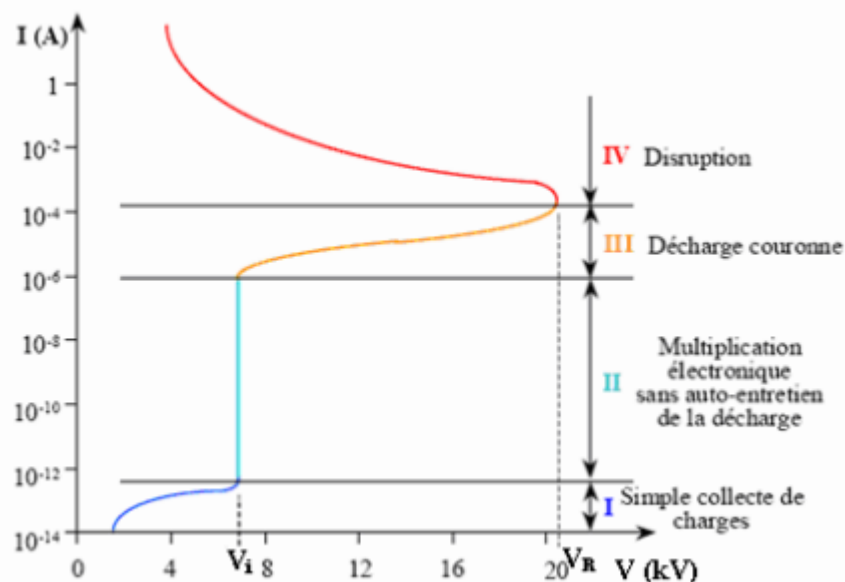


Figure I.5 : Caractéristique 'courant-tension' de la configuration "pointe-plan" d'une décharge électrique dans l'air à pression atmosphérique [11].

I.4 Différents types des décharges couronnes

L'apparition de décharges peut se produire selon deux types de polarité, soit négative, soit positive, engendrant ainsi deux catégories de décharges : celles avec ou sans la présence d'un diélectrique. Chacune de ces caractéristiques introduisent des comportements spécifiques pour chaque type de décharge [3].

I.4.1 Décharge couronne positive

La décharge couronne positive survient lorsque l'électrode pointue est maintenue à un potentiel positif tandis que la plaque est mise à la terre (Figure I.6). Dans cette configuration, des électrons sont générés par photo-ionisation environ la pointe, là où le champ électrique est intense. Ces électrons sont ensuite accélérés en direction de l'anode, représentée par l'électrode de petit rayon de courbure. Une région de forte ionisation se forme autour de cette anode. Cette dernière repousse les ions positifs ainsi créés sous l'effet des forces de Coulomb, jusqu'à une distance inférieure à un millimètre de la pointe. Au-delà de cette distance, le champ électrique affaibli ne permet plus la création d'ions positifs, et ces derniers migrent alors vers la cathode, représentée par la plaque.

Divers régimes caractérisent la décharge couronne [3]. À mesure que la tension augmente, la décharge couronne positive évolue vers une décharge luminescente continue, pouvant même évoluer vers un claquage sous des tensions extrêmement élevées. Quand le champ électrique est intensifié, Il est possible d'observer une fine couche d'air ionisé entre les deux électrodes. Ce régime est identifié comme le régime de la décharge de type "streamer". [6].

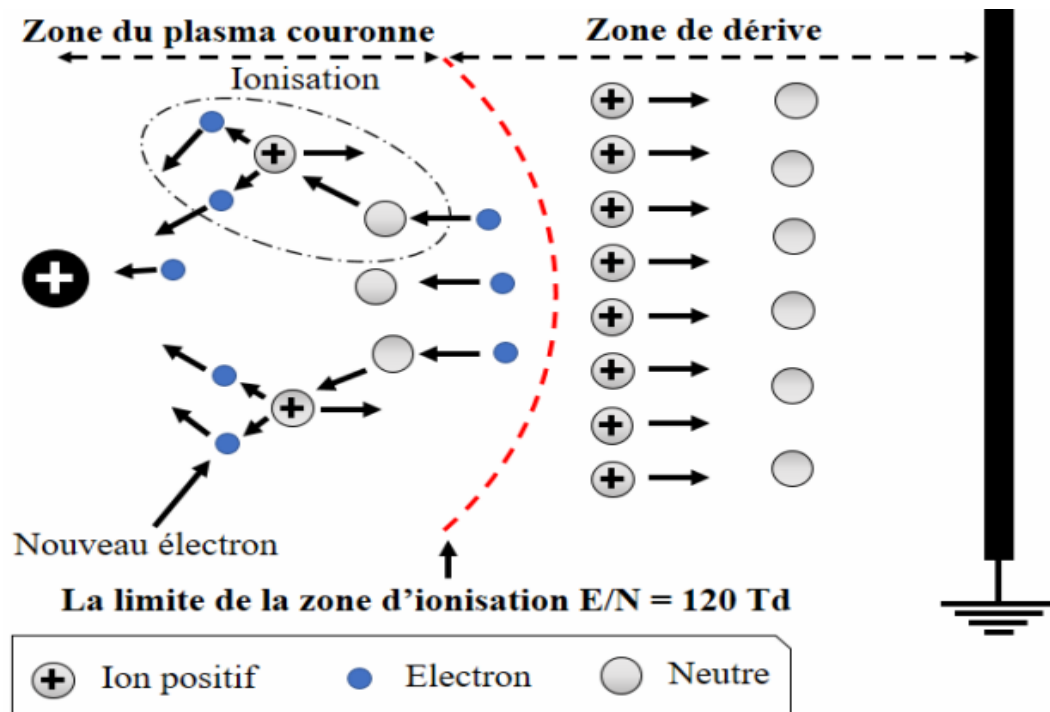


Figure I.6 : Décharge couronne positive en configuration pointe – plan [3].

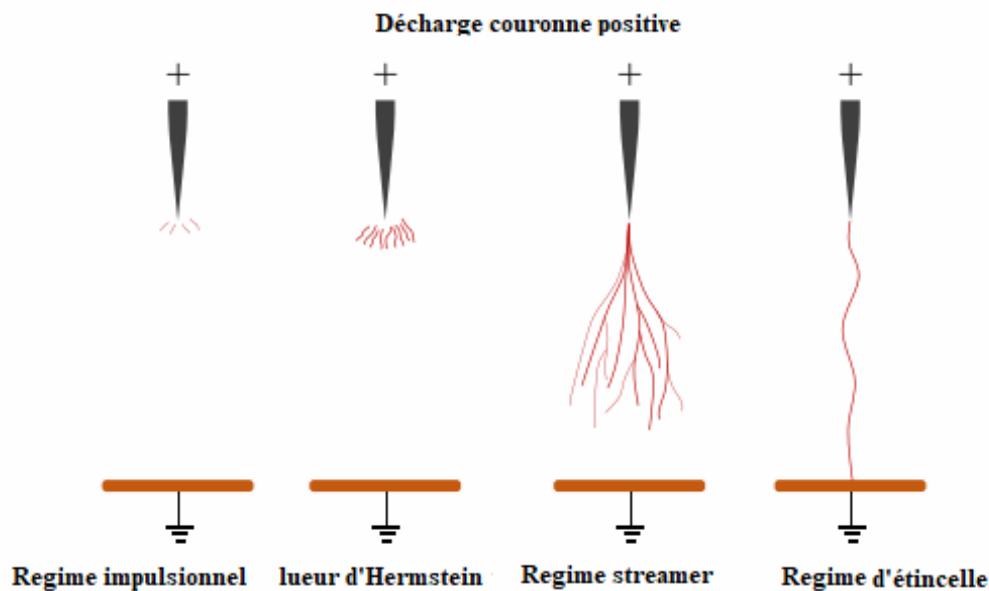


Figure I.7 : Différents régimes de la décharge couronne positive en augmentant la tension appliquée [9].

Dans l'intervalle de la configuration pointe-plan à la pression atmosphérique, divers phénomènes récurrents se manifestent en fonction de la valeur de la tension (Figure I.7). Étant donné que le courant de la décharge couronne adopte une forme d'onde impulsionnelle, la fréquence des impulsions varie en corrélation avec la tension appliquée. On identifie trois régimes distincts entre le seuil d'apparition de l'effet couronne et le claquage, à savoir les régimes « régime impulsionnelle, lueur d'Hermstein, Streamer ».

I.4.2 Décharge couronne négative :

Lorsque l'électrode « pointe » est connectée à la haute tension négative, le processus de création d'électrons débute toujours dans la région d'ionisation concentrée à proximité de l'électrode dans lequel le champ est fort « cathode ». Ce type de décharge « négative » se caractérise par des impulsions dans la forme du courant, ce phénomène connu sous le nom de couronne d'impulsion Trichel (ou couronne de conduction unipolaires) selon les travaux pionniers de G. W. Trichel [12]. Ce régime se distingue par des impulsions de courant de courte durée (100-200 ns) d'amplitude d'environ 1 mA, présentant un taux de répétition élevé. Une luminosité est observée autour de l'extrémité de l'électrode active, tandis qu'une zone sombre se forme entre les électrodes (zone de dérive). La valeur moyenne du courant augmente linéairement avec le taux de répétition des impulsions de courant. Atteignant des fréquences supérieures à 1 à 1000 kHz [13].

À des niveaux de courant plus élevés, la présence de charges spatiales contribue à rendre la distribution du champ électrique plus homogène. La couronne d'impulsion Trichel est succédée par une couronne luminescente négative, caractérisée par "moins d'impulsions", à mesure que la tension appliquée augmente. Dans un environnement d'air statique, une augmentation progressive de la tension conduit directement à la transformation de cette couronne stable "moins d'impulsions", en une décharge d'étincelle [14]. Le principe de décharge couronne négative est illustré à la figure I.8.

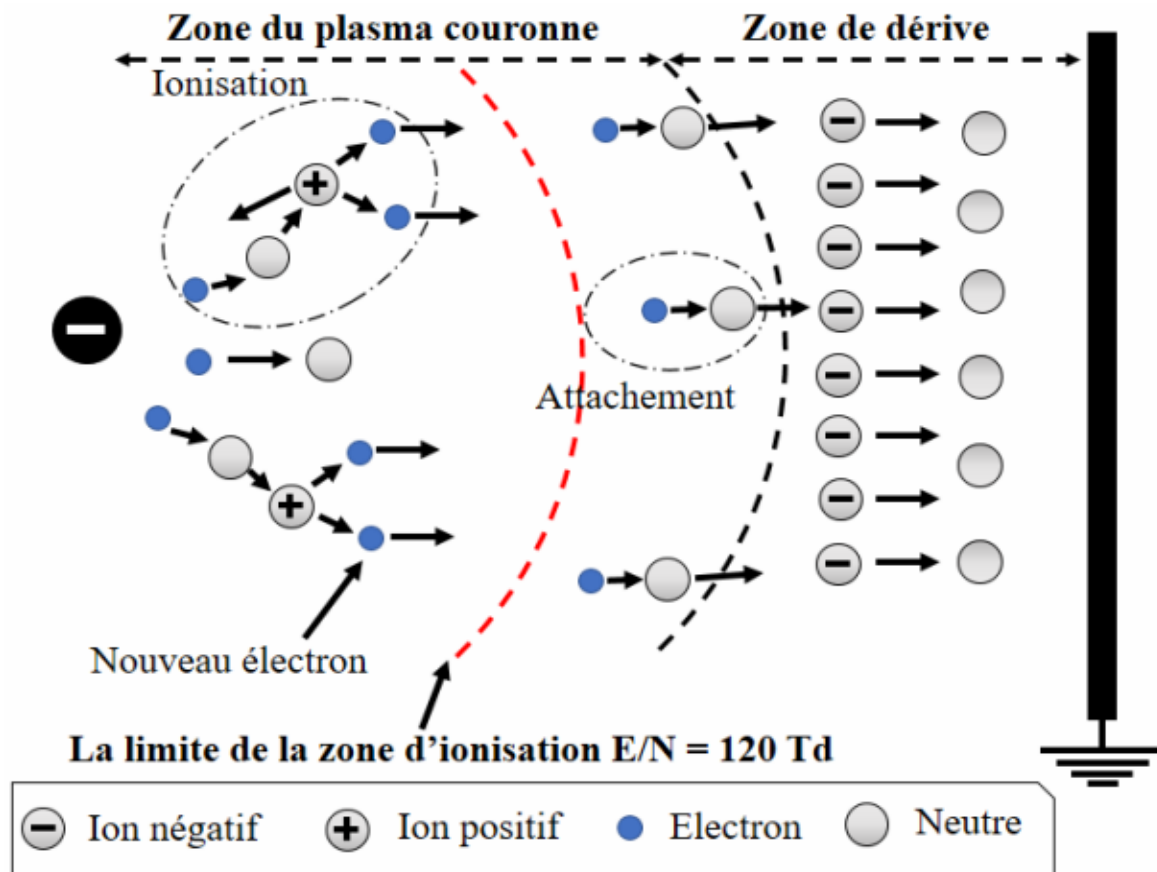


Figure I.8 : Schéma des régions d'ionisation et de dérive dans une décharge couronne négative [3].

Les différents régimes de la décharge négative, en augmentant la tension appliquée, sont représentés sur la figure I.9. Les régimes, comme il est montré de gauche à droite, sont : les impulsions de Trichel, le régime de lueur négative, et le régime d'étincelle.

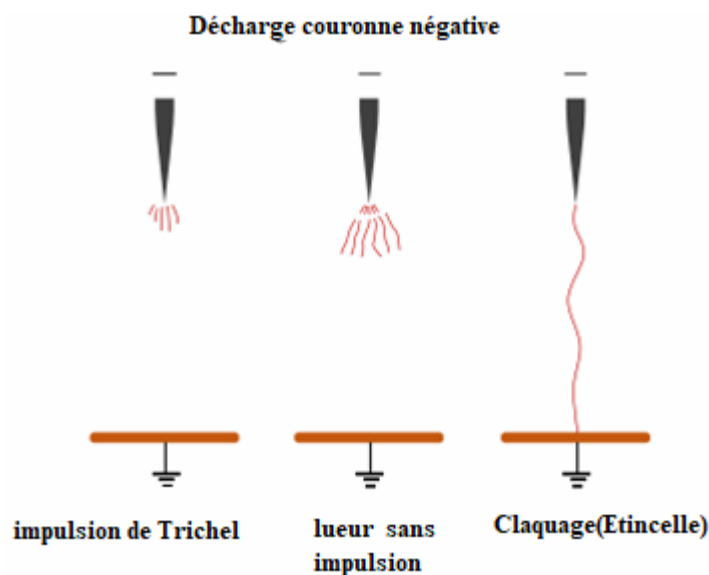


Figure I.9 : Différents régimes de la décharge couronne négative dans une configuration pointe-plan [9].

I.5 Facteurs influençant la décharge couronne

Les paramètres qui peuvent exercer une influence sur le seuil et les caractéristiques de la décharge couronne sont variés, se répartissant en trois catégories fondamentales [15]. Tout d'abord, les facteurs géométriques jouent un rôle crucial dans la manifestation de la décharge couronne, dictant la forme et la disposition des structures impliquées. Ensuite, les facteurs physico-chimiques interviennent, déterminant les propriétés des matériaux impliqués et leur réactivité sous l'influence de la décharge. Enfin, les facteurs électriques sont également essentiels, englobant les conditions électriques environnantes et les caractéristiques des matériaux liées à leur comportement électrique. La compréhension de ces différentes dimensions de facteurs est cruciale pour une manipulation efficace et contrôlée de la décharge couronne, que ce soit dans un contexte expérimental ou industriel.

I.5.1 Facteurs géométriques

Des facteurs tels que le rayon de courbure et la configuration des électrodes exercent une influence significative sur l'uniformité du champ, qui est le lieu de formation de décharge électrique, quel que soit leurs types. Parmi ces paramètres, la distance entre les électrodes apparaît comme l'un des plus critiques pour le processus de multiplication électronique. Les tensions seuils de décharge couronne peuvent être inférieures dans certaines configurations, en particulier lorsque les distances inter-électrodes sont réduites, entraînant une augmentation significative du courant et conduisant éventuellement au claquage des gaz [16].

I.5.1.1 Rayon de la courbure

Dans le contexte spécifique du rayon de courbure, il est important de souligner que l'augmentation de cette dimension a un impact direct sur la tension seuil nécessaire pour déclencher l'effet couronne. En d'autres termes, à mesure que le rayon de courbure augmente, la tension seuil d'apparition de la décharge couronne augmente également. Cette relation entre le rayon de courbure et la tension seuil joue un rôle crucial dans la compréhension et la manipulation de l'effet couronne dans diverses applications. Ainsi, la gestion et la sélection appropriées du rayon de courbure constituent une considération stratégique dans la conception et l'optimisation des systèmes électriques pour garantir des performances fiables et durables.

I.5.1.2 Distance inter-électrodes

La figure I.10 illustre l'impact de la distance entre les électrodes sur les substances de décharge. Les résultats mettent en évidence de manière significative que, pour de petites distances inter-électrodes, le courant associé à la décharge couronne est non seulement plus important mais augmente également de manière plus rapidement avec l'accroissement de la tension appliquée. De plus, il est observé que les seuils de décharge couronne se manifestent à des valeurs de tension relativement basses lorsque la distance inter-électrodes est réduite. Ces observations soulignent l'importance critique de la distance inter-électrodes dans la manifestation et le contrôle de la décharge couronne.

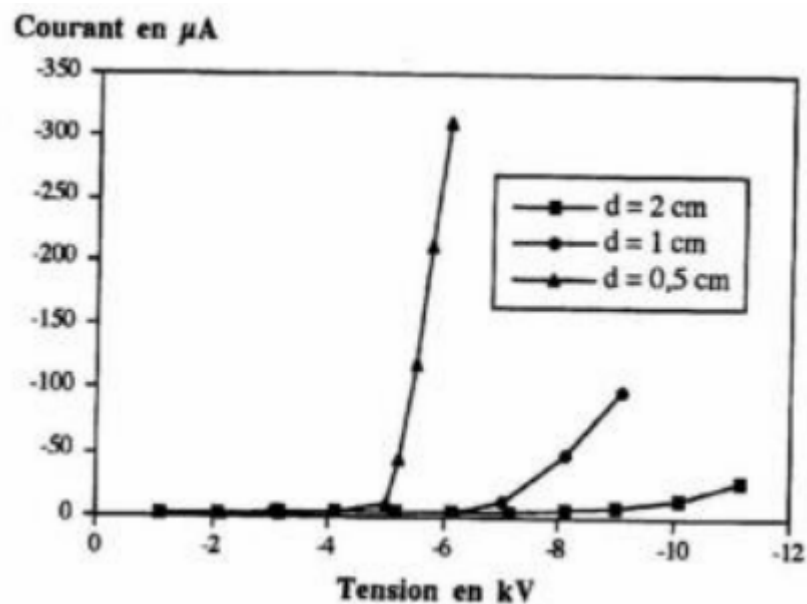


Figure I.10 : Influence de la distance inter-électrodes sur la décharge couronne

I.5.1.3 La nature des électrodes

La figure I.11 présente la caractéristique courant-tension en fonction de la nature des matériaux composant les électrodes, tels que le cuivre, l'aluminium et l'acier.

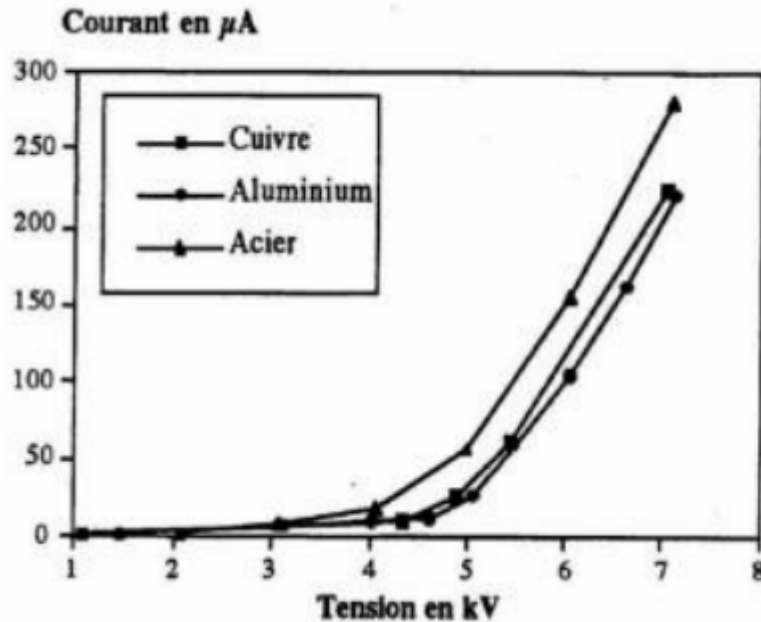


Figure I.11 : les caractéristiques du courant-tension en fonction de la nature des matériaux des électrodes [17]

Le tableau suivant montre la mobilité ionique (μ) est influencée par la tension appliquée et la nature des matériaux formant les électrodes [17] ;

Tableau 1 : L'influence des matériaux d'électrodes sur la mobilité ionique (μ) en tension positive/en tension négative ($d=0,5$ cm et $r_0=125$ μm) [17]

Tension positive	Mobilité ionique $\mu(m^2V^{-1}s^{-1})$
Electrode en cuivre	8×10^{-5}
Electrode en aluminium	$7,4 \times 10^{-5}$
Electrode en acier	12×10^{-5}
Tension négative	Mobilité ionique $\mu(m^2V^{-1}s^{-1})$
Electrode en cuivre	4×10^{-4}
Electrode en aluminium	$2,9 \times 10^{-4}$
Electrode en acier	$4,5 \times 10^{-4}$

Il est remarquable de constater une mobilité ionique substantielle lors de l'utilisation d'électrodes en acier par rapport à celles en aluminium, indépendamment de la polarité de la tension appliquée. De manière significative, cette mobilité ionique est plus marquée dans la polarité négative par rapport à la polarité positive, même lorsque le matériau des électrodes reste constant.

I.5.2 Facteurs physico-chimiques

Les caractéristiques des isolants gazeux sont sensibles aux variations de pression et de température dans leur environnement. Ces paramètres physiques modifient la densité des gaz, influençant ainsi la rigidité des isolants. En effet, le champ électrique nécessaire pour provoquer la rupture des gaz isolants augmente à mesure que la pression augmente et diminue à mesure que la température diminue [15].

I.5.2.1 Température

Lorsque la température augmente à la pression atmosphérique, la rigidité diélectrique de l'air diminue, créant ainsi des conditions favorables à la décharge couronne. Cette réduction de la rigidité diélectrique est attribuable à l'augmentation du libre parcours moyen des particules [18]. En revanche, si l'élévation de la température s'accompagne d'une augmentation de la pression (P), cela a un impact direct sur le produit « $P \times d$ » [19],

I.5.2.2 Humidité

L'humidité a un impact significatif sur la rigidité diélectrique de l'air, en particulier lorsque le champ électrique n'est pas uniforme. Ce phénomène est attribuable, d'une part, à l'augmentation de l'attachement des électrons libres induit par la présence de la vapeur d'eau dans l'air, caractérisée par une grande électronégativité, et d'autre part, à une absorption accrue des photons situés à la tête des streamers, dans la région où les avalanches secondaires se produisent par photo-ionisation [20]. Il est notable que le seuil d'apparition de la décharge couronne se manifeste à des tensions plus faibles pour une humidité relative RH de 90 % par rapport à celle de 5 % [17]. Cette disparité pourrait être expliquée par l'augmentation de la conductivité de l'air avec l'augmentation de l'humidité relative dans la cellule de décharge.

I.5.2.3 Pression

L'influence de la pression sur la décharge est directement liée à la tension d'amorçage de manière proportionnelle et inversement proportionnelle au courant. Cela est clairement illustré

dans la figure I.12, où l'évolution de la décharge en fonction de la pression est schématisée.

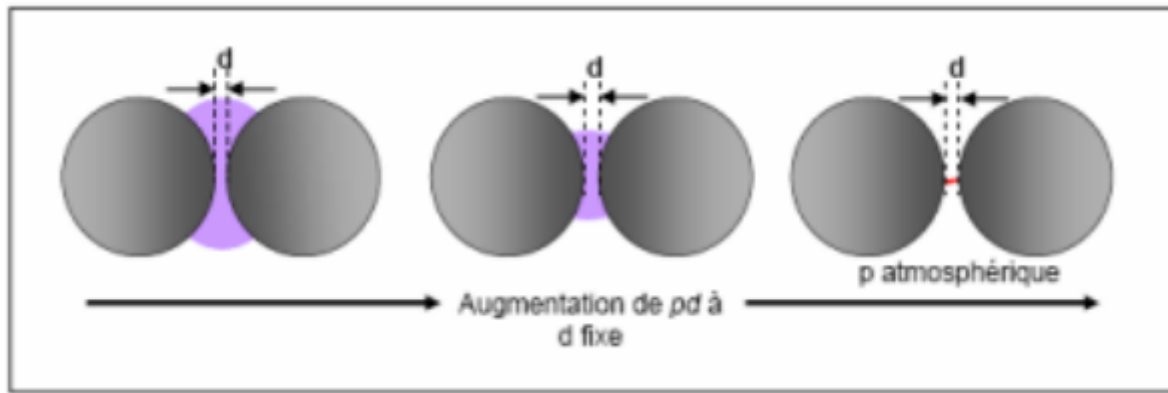


Figure I.12 : L'influence des matériaux d'électrodes sur la mobilité ionique (μ) en tension positive/en tension négative ($d=0,5$ cm et $r_0=125$ μm) [17]

I.5.2.4 Densité de l'air

Les conditions climatiques, en particulier la densité de l'air, jouent un rôle crucial dans l'influence de la tension d'amorçage « ϕ_{onset} » des intervalles d'air. Il est établi que la tension ϕ est inversement proportionnelle à la densité de l'air « N », ce qui signifie que des variations dans la densité de l'air peuvent avoir un impact significatif sur la tension d'amorçage

$$\phi = \frac{\phi_{\text{onset}} K_h}{N} \quad \text{I.1}$$

Avec :

N : densité de l'air

ϕ_{onset} : Tension de claquage dans les conditions normales.

K_h : Correction à apporter pour avoir les conditions normales.

I.5.3 Facteurs électriques

L'influence de l'effet couronne varie en fonction de l'application d'une tension continue ou alternative à un système d'électrodes.

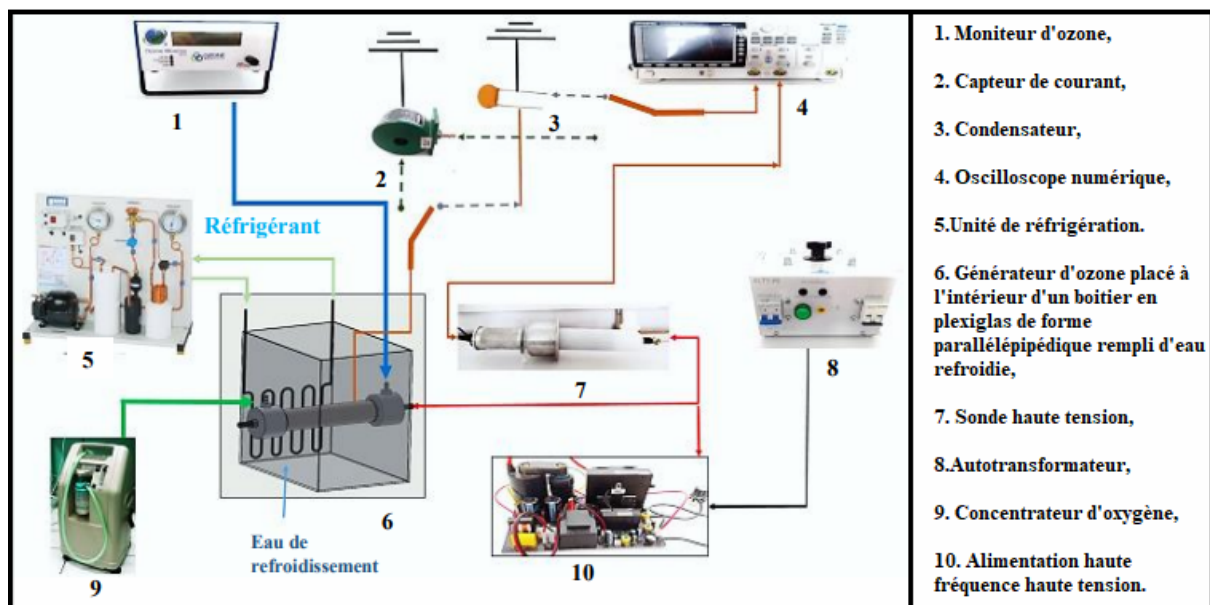
Les divers modes d'émission de charges décrits dans le contexte d'une tension alternative sont également observés lorsqu'une tension continue est appliquée. La principale distinction réside dans l'effet couronne en tension alternative. La différence réside essentiellement dans le fait qu'en tension alternative l'effet couronne implique une

concentration des émissions de charges coïncide avec la crête de la sinusoïde du courant alternatif, tandis que l'émission de charges en tension continue est permanente [19].

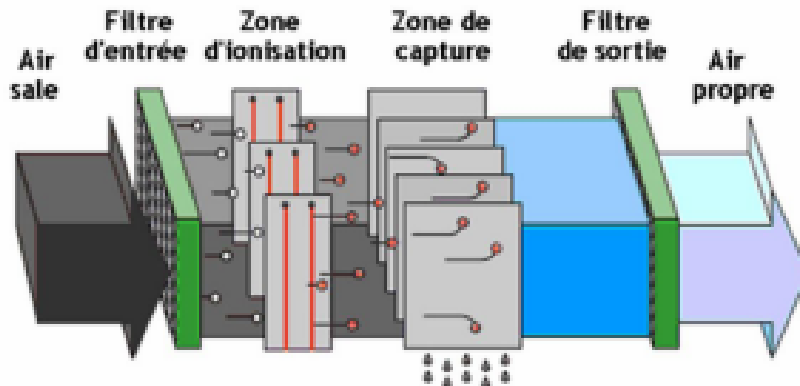
I.6 Application de la décharge couronne :

Actuellement, la décharge couronne est employée dans divers domaines (figure I.13), principalement dans des applications physico-chimiques. Parmi celles-ci, on retrouve [11] :

- le traitement de surfaces, impliquant le nettoyage et la modification de la chimie des surfaces.
- Utilisation dans le traitement et la dépollution des gaz, permettant l'élimination des effluents toxiques présents en faible quantité dans des milieux gazeux occupant de vastes volumes « gaz d'échappement ».
- Création d'ozone grâce à une production intensive d'oxygène ou de l'air sec.
- la production et création de plasma et l'éclairage.
- La séparation électrostatique de substances conductrices et non-conductrices « trier et isoler des matériaux en fonction de leurs propriétés électriques ».
- Outre ces applications, les décharges couronne sont également employées dans des contextes tels que les parafoudres, visant à accroître la conductivité de l'air autour de la pointe des paratonnerres, et dans la neutralisation, où les charges créées par l'effet couronne, éliminent par neutralisation les charges surfaciques, sur les ailes de l'avion.



(a)



(b)

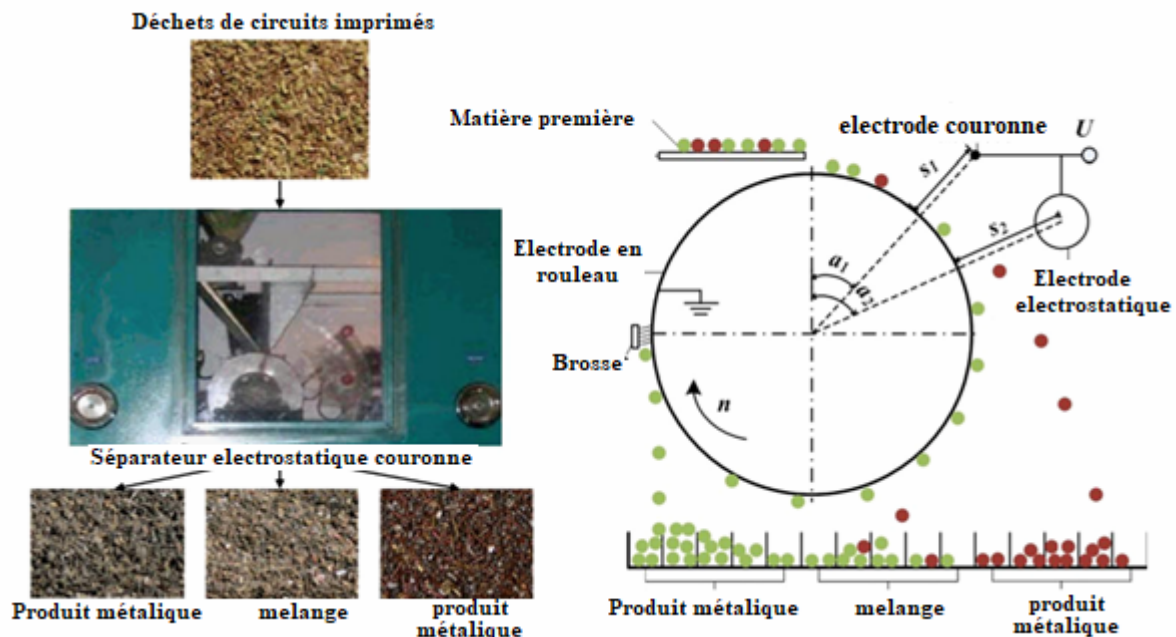


Figure [I.13 : Les Application de la décharge couronne (a) Générateur d'ozone, (b) Filtre électrostatique, (c) Séparateur électrostatique [11, 21,22].

I.7 Le vent ionique

Quand un gaz ionisé est exposé à un champ électrique, Les ions, soumis à la force de Coulomb, se déplacent en suivant les lignes de champ électrique et entrent en collision avec les molécules neutres du milieu plasmagène. Ces collisions engendrent un mouvement généralisé du gaz environnant, phénomène connu sous le nom de vent électrique ou vent ionique, Cela est particulièrement évident dans les décharges couronnes, où ce phénomène peut être aisément observé. Le système est donc formé de deux électrodes, soumises à une

différence de potentiel. Lorsqu'une décharge se produit, des espèces chargées, comprenant des ions positifs, des ions négatifs, et des électrons, émergent dans l'espace entre les électrodes. La force Coulombienne, induite par le champ électrique, accélère ces particules, les dirigeant vers la cathode pour les ions positifs et vers l'anode pour les électrons et les ions négatifs. Ces particules chargées entrent en collision avec les molécules neutres, transférant ainsi une fraction de leur quantité de mouvement au cours de ces interactions. L'efficacité du processus dépend directement du rapport des masses des particules impliquées, ce qui rend le transfert particulièrement efficace lors des collisions ion-neutre.

Sous l'effet de la décharge, le gaz s'accélère dans l'espace entre les électrodes et donne naissance à un flux de gaz. En partie, ce flux disperse et mélange les espèces actives du gaz, telles que les radicaux et les molécules excitées, présentes dans le gaz. Pour la configuration « pointe-plan », le vent électrique se dirige de la pointe vers le plan, indépendamment de la polarité de la pointe. Quand la pointe est négative, le vent ionique est engendré par les ions négatifs issus du processus d'ionisation, comme illustré dans la Figure représentant la décharge négative. Ce phénomène de vent ionique se manifeste tant dans les décharges couronnes en régime luminescent que dans celles en régime de breakdown streamer.

Toutefois, les résultats combinés de la fréquence de répétition de la décharge, généralement de l'ordre de la dizaine de kilohertz, de la dynamique des décharges caractérisée par un champ électrique intense et des charges d'espace substantielles, ainsi que des variations significatives de la température du gaz, peuvent entraîner un mouvement du gaz organisé. Ce phénomène est induit par le transfert de la quantité de mouvement des ions aux particules neutres.

I.7.1 Histoire du vent ionique

L'origine de l'effet électrohydrodynamique (EHD) remonte à l'année 1629, lorsque Niccolo Cabeo, un contemporain de Galilée, a signalé qu'un objet électrisé pourrait attirer la sciure de bois, la toucher, puis la repousser. Mais, Cabeo n'a pas complètement saisi le mécanisme sous-jacent à cet effet [23-24]. Ce n'est qu'en 1672 qu'Otto Von Guericke a conçu une sphère fractionnaire fixée à un vilebrequin et a observé également que la sphère, lorsqu'elle était frottée, brillait dans le noir. C'est la première fois qu'une décharge couronne a été observée, bien que le vent ionique n'ait pas été mentionné par Guericke [22].

Francis Hauksbee, conservateur des instruments « de Royal Society of London », a fait la première découverte du phénomène EHD reconnu par le public en 1709, lorsqu'il a tenu un tube chargé vers lui, percevant un léger flux d'air soufflant vers son visage [25]. Isaac Newton a reproduit cette expérience après plusieurs années et a été appelé ce phénomène par le vent électrique [26]. En 1750, Benjamin Wilson, secrétaire « de Royal Society of London », a réussi à tourner rapidement un moulinet en dirigeant le vent électrique d'un point de décharge vers lui. Ensuite, Hamilton, enseignant de la philosophie « de l'Université de Dublin », a modifié l'appareil de de Wilson en un dispositif à un étage composé d'un fil de forme S suspendu horizontalement au centre d'un arbre électriquement conducteur.

En 1838, Michael Faraday a apporté des contributions significatives en décrivant le vent électrique comme un processus de transfert de quantité de mouvement résultant du frottement ou de la collision entre les particules de gaz « chargées et non chargées » [27]. Ces observations marquent une étape cruciale dans les mécanismes du vent ionique. August Töpler, qui a inventé l'optique schlieren, a ensuite utilisé sa nouvelle méthode pour examiner les schémas d'écoulement du vent électrique. Par la suite, James Clerk Maxwell a apporté une analyse qualitative approfondie du mécanisme sous-jacent du vent électrique en 1873 [28].

En 19^{eme} siècle, Chattock a pionnier la première analyse expérimentale quantitative traitant du lien entre la pression et le courant électrique dans le cadre du vent électrique engendré par une disposition d'électrodes planes en parallèle [29].

En 1954, Löb a élargi l'équation reliant la pression au courant, telle que développée dans l'étude de Chattock, pour inclure diverses configurations géométriques [30]. Ensuite, Harney s'est penché sur les paramètres électriques d'une décharge couronne et a observé que l'influence du vent ionique sur les paramètres demeure minime, à moins que l'air ne soit échangé par un liquide diélectrique.

Ensuite, Robinson a entrepris une étude expérimentale exhaustive sur la production du vent ionique et les variables qui l'influencent en 1961 [31]. Un an après, Stuetzer Otmar a consolidé et étendu les recherches de Löb et Harney, fournissant ainsi la compréhension la plus complète du phénomène ELCTROHYDRODYNAMIQUE « EHD ».

I.7.2 Génération de vent ionique

La zone d'ionisation dans le processus de décharge couronne est limitée à une petite zone près de la pointe de l'électrode émettrice, et par conséquent, elle ne joue qu'un rôle

mineur dans la génération du vent ionique. Dans la zone de dérive, des collisions entre les particules à grande échelle induisent de façon directe un flux d'air macroscopique, autrement dit, un vent ionique. Les méthodes actuelles utilisées dans les investigations sur le vent ionique incluent la mesure des vitesses du vent ionique à l'aide de fils chauds pour examiner l'amélioration du transfert de chaleur des générateurs du vent ionique (GVI) [32].

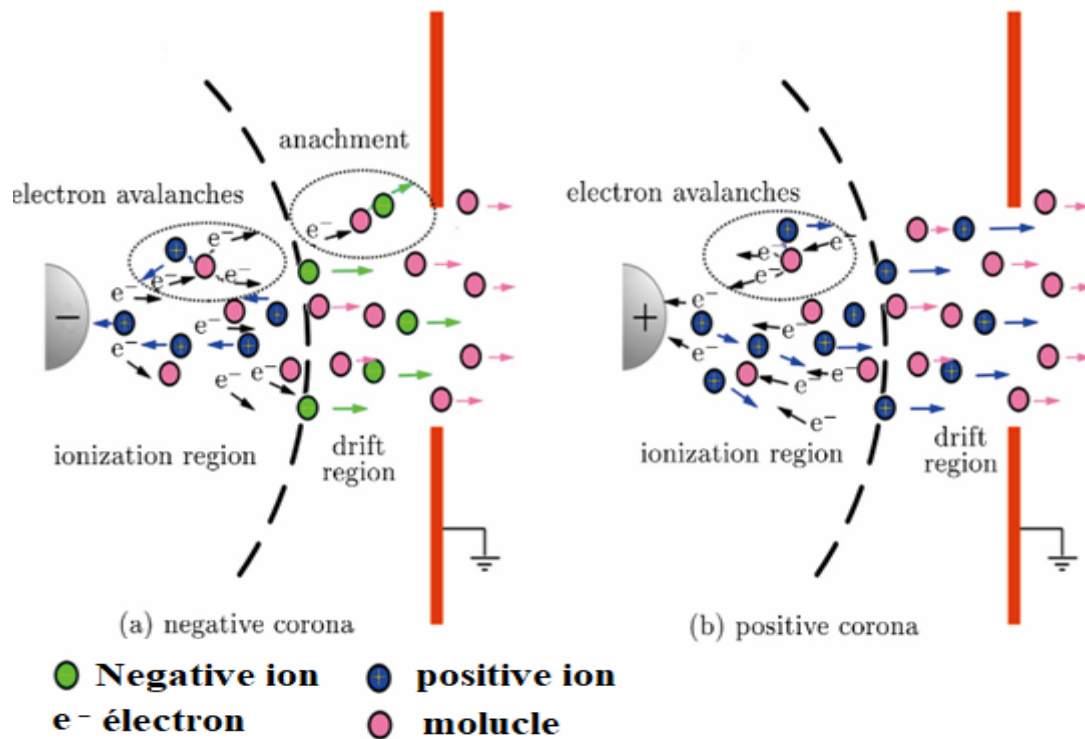


Figure I.14 : Schéma de la génération de vent ionique [32].

La figure I.14 illustre le schéma du processus de création du vent ionique au moyen d'une configuration d'électrode pointe/plaque au cours d'une décharge de polarité positive et une autre de polarité négative. En cas de polarité positive, les ions positifs subissent une répulsion hors de la zone d'ionisation sous l'effet de la force de Coulomb, sont ensuite accélérés en direction de l'électrode à plaque. En entrant en collision avec des molécules ou atomes neutres, ils transfèrent une quantité de mouvement, induisant ainsi un déplacement dans une direction spécifique, créant ainsi un phénomène de flux d'air macroscopique. Le processus de génération du vent ionique est identique lors d'une décharge corona négative.

Dans la zone de dérive, les particules impliquées dans les collisions avec des molécules ou atomes neutres sont les ions négatifs, résultant de l'attachement entre des électrons repoussés et des molécules de gaz électronégatif. Dans la plupart des générateurs (GVI),

l'électrode émettrice est munie d'une pointe de petit rayon de courbure, tandis que l'électrode de masse présente généralement un rayon de courbure plus important, favorisant ainsi la création d'un champ électrique extrêmement non uniforme. La figure I.15 illustre les différentes combinaisons d'électrodes qui peuvent produire un vent ionique doté de caractéristiques de flux variées [33-36].

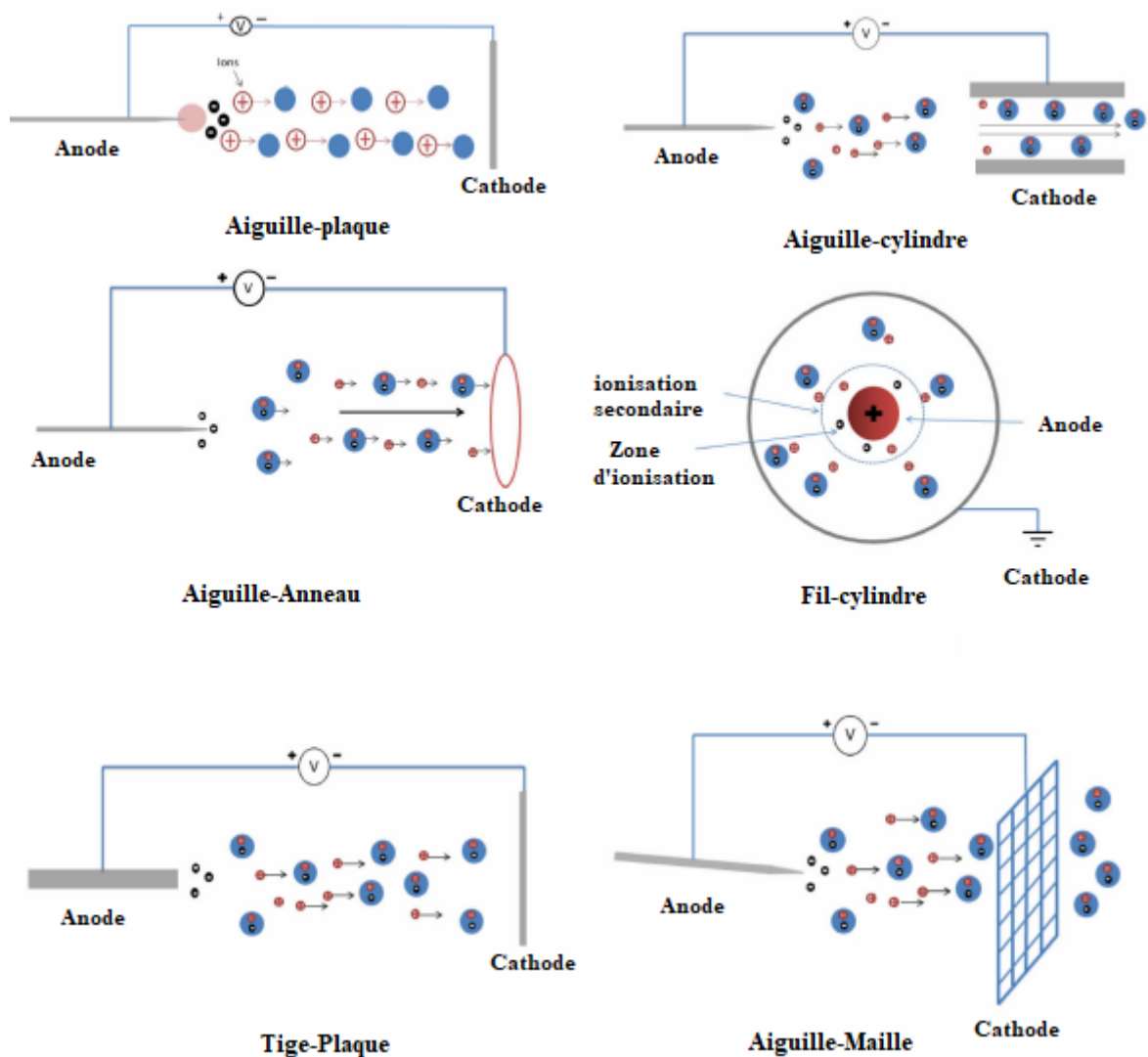


Figure I.15 : Diverses combinaisons d'électrodes pour la création du vent ionique [33-36].

I.7.3 Progrès récents dans le vent ionique et ses applications

Dans cette section, l'attention est principalement portée sur les applications récentes du vent ionique, mettant en lumière ses utilisations dans la gestion thermique, la récupération de l'eau, et les précipitations électrostatiques au cours des cinq dernières années. En ce qui

concerne la gestion thermique, les générateurs du vent ionique (GVI) sont examinés sous l'angle de la macro-échelle ainsi que de la miniaturisation.

1.7.3.1 Gestion de chaleur

Au fil des décennies passées, la taille des dispositifs électroniques a connu une réduction graduelle, conjuguée à une augmentation de la densité d'énergie, imposant ainsi de nouvelles contraintes en matière de technologie de gestion thermique : compacité structurelle, intégration, efficacité énergétique accrue et réduction du niveau de bruit.

Le vent ionique s'est révélé être une solution supérieure dans ces domaines ainsi que dans d'autres applications exigeant une gestion thermique efficace. De manière générale, la vitesse du vent ionique a connu une amélioration significative par rapport aux études antérieures.

- **Générateur de vent ionique à grande échelle**

L'application du vent ionique dans la gestion thermique repose principalement sur la configuration personnalisée des électrodes adaptées à des besoins spécifiques, avec un espacement inter-électrodes généralement de l'ordre du millimètre « souvent supérieur à 5 mm ». Une étude menée par Tsui et al [37] s'est penchée sur le processus de refroidissement d'une plaque chauffante en exploitant le vent ionique engendré par une décharge couronne au bord de l'attaque d'une électrode « à plaque mince ». La plaque chauffante est non seulement un objet à refroidir, mais elle agit également en tant que collecteur de la décharge couronne. Des expériences et des simulations ont été utilisées pour étudier les coefficients de transfert de chaleur (HTC) et la température au milieu de la plaque chauffante.

Comme illustré dans la figure I.16, Shin et al [38] ont examiné les performances de refroidissement du vent électrique à contrecourant impactant un dissipateur thermique. Deux paires d'électrodes, comprenant chacune un fil et deux plaques parallèles, sont positionnées sur les côtés du dissipateur. Le vent ionique produit lors de la décharge couronne pour chaque paire d'électrodes est dirigé vers le dissipateur thermique central. Des simulations paramétriques du champ d'écoulement du vent électrique tout autour des ailettes du dissipateur thermique ont été menées. Il a été démontré que la dissipation de chaleur en utilisant un système de refroidissement par vent ionique à contre-courant est une très bonne solution en comparant l'efficacité à un dispositif de refroidissement par ventilateur centrifuge commercial.

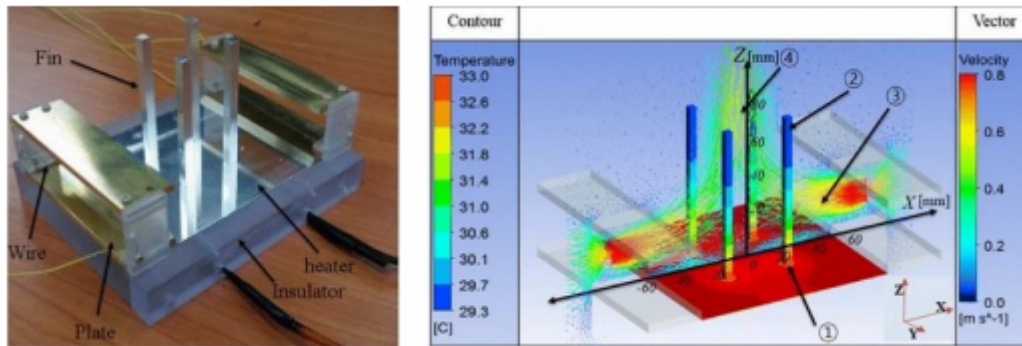


Figure I.16 : GVI à grande échelle

- **Générateur de vent ionique miniaturisés**

Les futures applications des générateurs de vent ioniques à petit échelle pour la régulation thermique d'appareils comme les dispositifs portables et la microélectronique extrêmement compacte sont entravées par les inconvénients liés à la taille et au poids considérables de ces dispositifs. Pour surmonter ces défis, des efforts significatifs ont été déployés par des chercheurs dans la recherche et le développement des générateurs de vent ionique miniaturisés (Figure I.17).

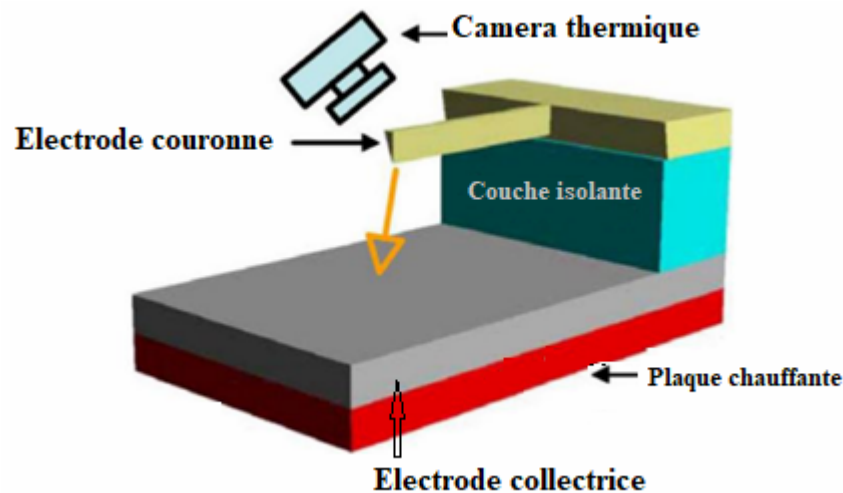


Figure I.17 : Configurations d'électrodes des GVI miniaturisés en 3D dans des études publiées récemment [39].

Au niveau microscopique, lorsque la distance entre les électrodes est inférieure à $10\text{ }\mu\text{m}$, la décharge qui se manifeste requiert une tension de décharge faible, environ 100 V , et produit une quantité réduite d'ozone. Une étude menée par des chercheurs [40] sur une configuration pointe-plan s'est penchée sur la transition de la décharge dans des micro-espaces sous la

pression atmosphérique. Ils ont noté que les tensions d'apparition associées à des courants inférieurs à 10 μA , étaient (d'environ 200 V) pour des espacements inférieurs à 5 μm .

I.7.3.2 Précipitateur électrostatique

Au cours du processus de génération de vent électrique, Les particules de poussière présentes dans l'atmosphère peuvent acquérir une charge lors de la décharge couronne. Ces particules chargées sont ensuite capturées par l'électrode collectrice grâce à l'effet combiné de la force électrique et de la force de traînée induite par le flux résultant de l'interaction entre le flux de masse et le vent électrique. Ce mécanisme sous-tend le fonctionnement des précipitateurs électrostatiques (Figure I.18), sont largement employés dans le but de diminuer la concentration « des polluants atmosphériques », contribuant ainsi à la purification de l'air.

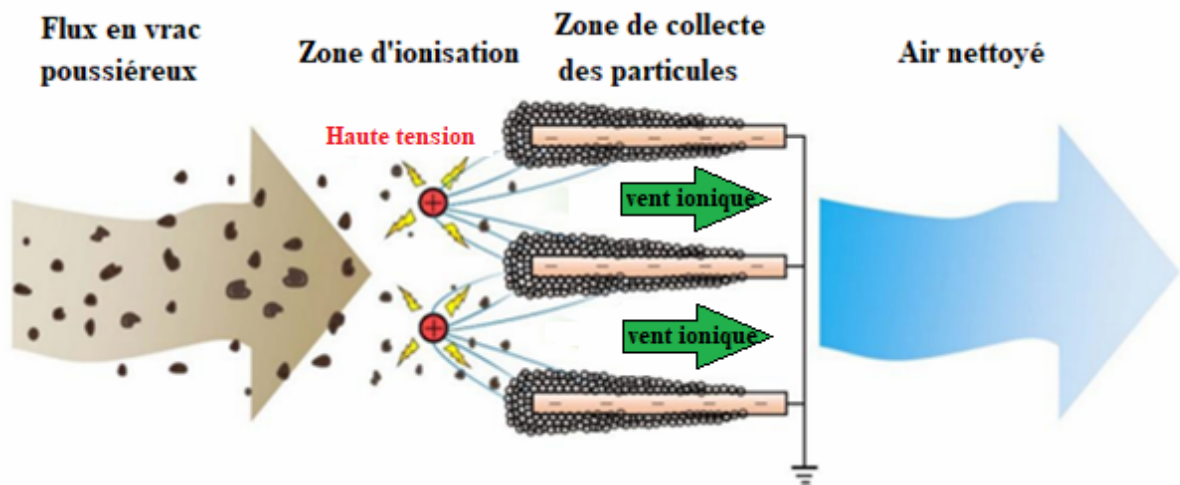


Figure I.18 : Schéma de l'accumulation de la poussière dans un ESP.

Comparativement aux filtres mécaniques, les précipitateurs électrostatiques présentent plusieurs avantages, notamment une consommation d'énergie réduite, une perte de charge minimale, une grande efficacité de collecte (supérieure à 99%), une grande flexibilité de manipulation, un coût de maintenance faible grâce à la simplicité de leur conception, et une aptitude à traiter les fumées à haute température. En tant qu'appareil de contrôle des particules fiable et efficace, les ESP demeurent l'équipement le plus largement utilisé pour le nettoyage des gaz industriels.

Les recherches portant sur les ESP ont connu une activité intense, La majorité de ces investigations se penchent sur les mécanismes des précipitateurs, explorant la manière dont la décharge couronne interagit avec le champ d'écoulement, influençant la charge des particules et guidant leur déplacement et le transport des particules, ainsi que d'autres facteurs

susceptibles d'influencer l'efficacité de la collecte. L'objectif fondamental de ces travaux demeure l'amélioration de l'efficacité de la collecte des particules, ainsi que la conception d'un dispositif de collecte plus performant.

1.7.3.3 Récupération de l'eau améliorée électrostatiquement

La technique de collecte d'eau de brouillard offre une approche pratique et écologique pour obtenir de l'eau douce destinée au reboisement, à l'agriculture et comme source d'eau potable pour les humains et les animaux. Dans les zones caractérisées par une rareté d'eau douce et où les conditions de brouillard sont fréquentes, il est envisageable de déployer un système de maillage passif dédié à la collecte d'eau de brouillard. Ce grillage « ou bien cette maille », exposé directement à l'atmosphère, le vent permet de pousser l'air brumeux à travers la maille, conduisant à la condensation des gouttelettes de brouillard sur la maille. Ces gouttelettes fusionnent pour former des gouttes plus importantes qui s'écoulent vers un réservoir de stockage [41].

Le mécanisme de collecte d'eau de brouillard par électrostatique opère de manière analogue à celui d'un précipitateur, où une décharge couronne charge les gouttelettes de brouillard en mouvement, pour ensuite être attirées et collectées par une électrode collectrice. Ce processus est rendu possible grâce à l'effet conjoint entre la force du champ électrique et la force de traînée générée par le flux d'air.

Afin de perfectionner un dispositif de collecte d'eau plus performant, il est impératif de comprendre l'amélioration du processus de collecte d'eau par électrostatique et l'influence conjointe du champ électrostatique et du vent électrique induit sur le chemin ou la trajectoire des gouttelettes d'eau. Damak et al. [42], s'inspirant des Précipitateurs Electrostatique (ESP), ont présenté un CBE « collecteur de brouillard électrostatique » de type (aiguille-maille). Ce dispositif a fait l'objet d'essais expérimentaux qui ont démontré une efficacité de collecte dépassant les 60 %. Selon l'estimation des chercheurs, ce collecteur de brouillard électrostatique nécessite environ 2 kilowattheures d'électricité pour recueillir 1 m³ d'eau, ce qui se révèle inférieur à la consommation actuelle des procédés de dessalement par osmose inverse « environ 3 à 5 kilowattheures par mètre cube ». De manière intéressante, ils ont également envisagé l'application potentielle de cette technologie pour récupérer le brouillard généré par les tours de refroidissement.

Conclusion :

Grâce à ce premier chapitre, nous avons examiné des divers régimes et des mécanismes de formation des décharges couronne négative et positive, qui sont créées sous tension continue et à la pression atmosphérique. Ces types de décharges se distinguent par des phénomènes distincts liés à leur création et aux développements de la décharge. Les changements de température et d'humidité relative de l'air peuvent aussi avoir un impact sur les caractéristiques électriques de ces types de décharges.

La décharge couronne est utilisée dans de nombreuses applications. Les techniques de nettoyage des panneaux solaires par vent ionique sont celles qui nous intéressent dans le cadre de notre étude. Nous avons identifié les paramètres clés essentiels pour garantir une efficacité optimale dans le nettoyage des panneaux solaires. Notre objectif est d'optimiser cette efficacité en mettant en place une configuration appropriée de l'actionneur de vent ionique, assurant ainsi que chaque élément contribue de manière synergique à l'ensemble du processus de nettoyage. Dans le prochain chapitre nous nous intéressons au fonctionnement du panneau solaire et les techniques de nettoyage traditionnelles des panneaux photovoltaïques pour les comparer avec la nouvelle technique que nous avons proposée.

CHAPITRE II

**ENERGIE SOLAIRE ET METHODE DE
NETTOYAGE DES PANNEAUX SOLAIRES**

CHAPITRE II

II. ENERGIE SOLAIRE ET METHODE DE NETTOYAGE DES PANNEAUX SOLAIRES

Introduction

Les énergies renouvelables sont les joyaux lumineux de notre avenir énergétique. Issues de sources naturelles telles que le soleil, le vent, l'eau et la biomasse, elles offrent une alternative cruciale aux énergies fossiles épuisables. En embrassant ces ressources inépuisables, nous aspirons à une transition énergétique durable, promouvant une planète plus propre et un avenir énergétique résilient.

L'énergie solaire, provenant du soleil, se profile comme une source abondante et gratuite d'électricité. Les panneaux solaires photovoltaïques, quant à eux, exploitent cette lumière du soleil pour générer de l'électricité de manière propre et renouvelable. Cette technologie transforme la lumière en énergie électrique, offrant ainsi une solution prometteuse pour répondre aux besoins croissants en électricité tout en réduisant notre empreinte carbone.

Les techniques de nettoyage des panneaux solaires sont essentielles pour maintenir leur efficacité et optimiser leur rendement. Des méthodes simples, telles que le nettoyage à l'eau ou manuel, jusqu'à des approches innovantes comme l'utilisation de revêtements super hydrophobes, garantissent que ces "fenêtres solaires" restent claires et réceptives à la lumière du soleil. L'application judicieuse de ces techniques de maintenance contribue à assurer une production d'énergie solaire maximale sur le long terme.

L'ENERGIE SOLAIRE DANS LE MONDE

L'énergie solaire photovoltaïque repose sur l'utilisation de modules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire [43]. En 2021, la contribution de l'énergie solaire photovoltaïque a atteint 3,7 % de la consommation énergétique mondiale totale. La capacité de production photovoltaïque a enregistré une croissance notable de 22,5 % (115 GW) en 2019, passant de 512 GW à 627 GW [44]. Cette expansion rapide positionne l'énergie solaire photovoltaïque comme la technologie d'énergie renouvelable ayant la progression la plus rapide au niveau mondial, la rendant ainsi l'une des plus répandues et compétitives sur le marché de la production d'électricité.

De nombreux pays à travers le monde ont intégré une capacité substantielle d'énergie solaire dans leurs réseaux électriques. Cet effort vise à diversifier leurs sources de production d'électricité et à proposer une alternative durable aux énergies conventionnelles, telles que les

combustibles fossiles. La figure II.1 présente la répartition mondiale de l'énergie solaire, mettant en évidence la part de cette énergie dans le mix énergétique de chaque pays en 2019 [45].

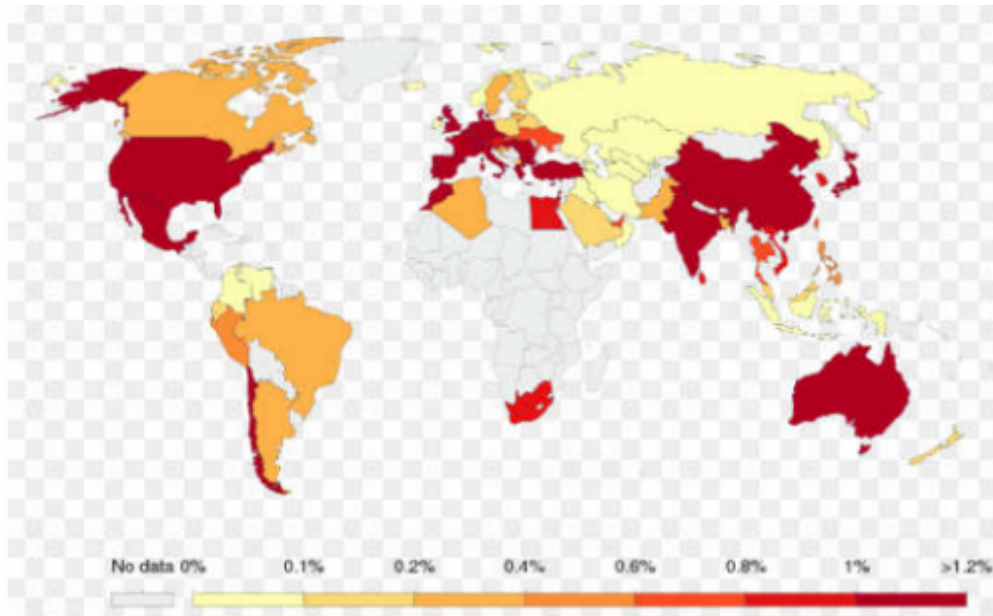


Figure II. 1 : Part de l'énergie primaire provenant du solaire, 2019 [45]

La figure II.2 présente la représentation cartographique de l'irradiation solaire à l'échelle mondiale, en moyenne annuelle et journalière. Il existe deux grandes catégories d'énergie solaire :

Les générateurs photovoltaïques, qui utilisent des panneaux solaires pour convertir directement la lumière solaire en électricité (énergie électrique).

Les centrales solaires concentrées, également appelées "solaire thermique concentré", qui exploitent l'énergie solaire thermique pour chauffer de l'eau et produire de la vapeur, utilisée pour alimenter des turbines dans le cadre de la production conventionnelle d'électricité.

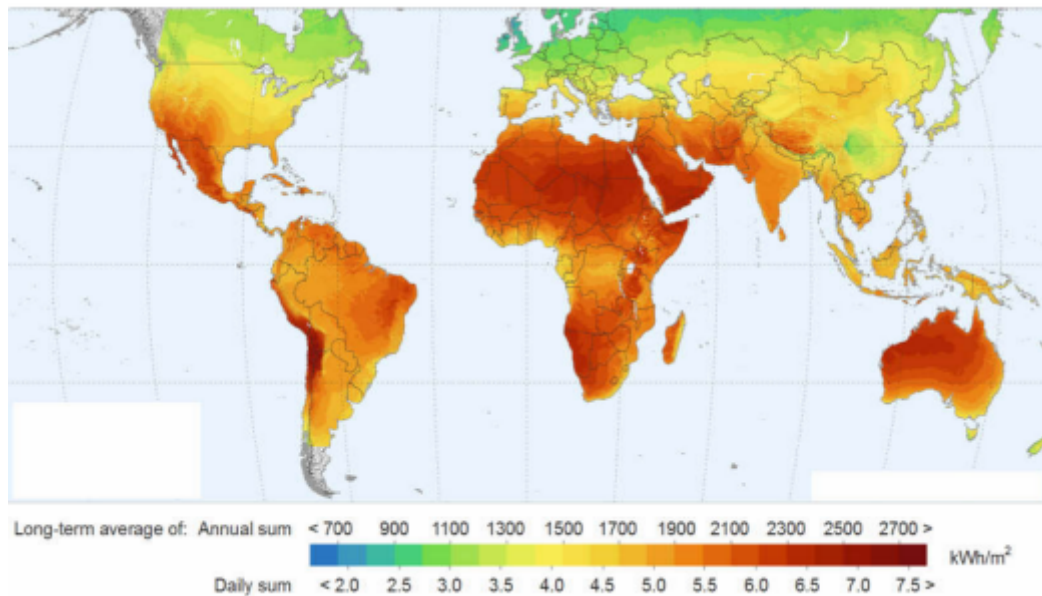


Figure II. 2 : Le potentiel mondial de l'énergie photovoltaïque [45]

L'accroissement constant de la puissance installée est clairement illustré dans la figure II.3, avec une augmentation notable de 35 % entre 2010 et 2019, atteignant une puissance de 584 GWp [46]. En 2019, la Chine s'est imposée comme le pays ayant enregistré la plus forte croissance dans la production d'électricité photovoltaïque.

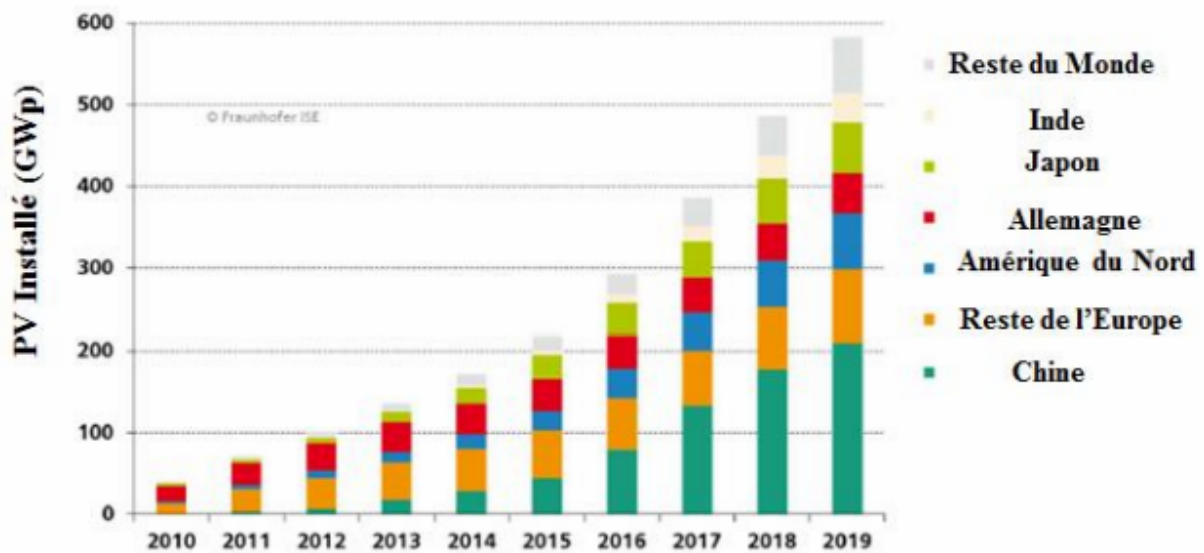


Figure II. 3 : La répartition mondiale de la production photovoltaïque [46]

II.1 LE PV SOLAIRE EN ALGERIE

En Algérie, en 2019, la proportion d'énergie primaire issue du solaire ne dépassait pas 0,5 % [43], ce qui la plaçait nettement derrière plusieurs producteurs d'énergie solaire moins favorisés en termes d'irradiation, tels que le Royaume-Uni et l'Allemagne. Malgré une

irradiation directe estimée à 169 440 kWh/m²/an et un potentiel résumé dans le tableau II.1[48, 49].

Tableau II. 1 : Potentiel solaire en Algérie [47].

	Localisation		
	Zone côtière	Zone intérieure	Zone désertique
Surface (%)	4	10	86
Durée moyenne d'Ensoleillement (heure/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kwh/m ² /an)	1700	1900	2650

Le désert algérien est reconnu comme l'une des zones mondiales présentant les niveaux les plus élevés d'irradiation solaire ainsi que des températures moyennes élevées. Avec une durée annuelle d'insolation estimée entre 2 000 et 3 900 heures, et un rayonnement horizontal de surface oscillant entre 3 et 5 kWh/m², cette région offre des conditions particulièrement favorables à l'exploitation de l'énergie solaire. L'Office National de la Météorologie (ONM) supervise un réseau de 78 stations météorologiques réparties sur l'ensemble du territoire. La répartition de l'irradiation solaire en Algérie est illustrée dans la figure II.4 [50].

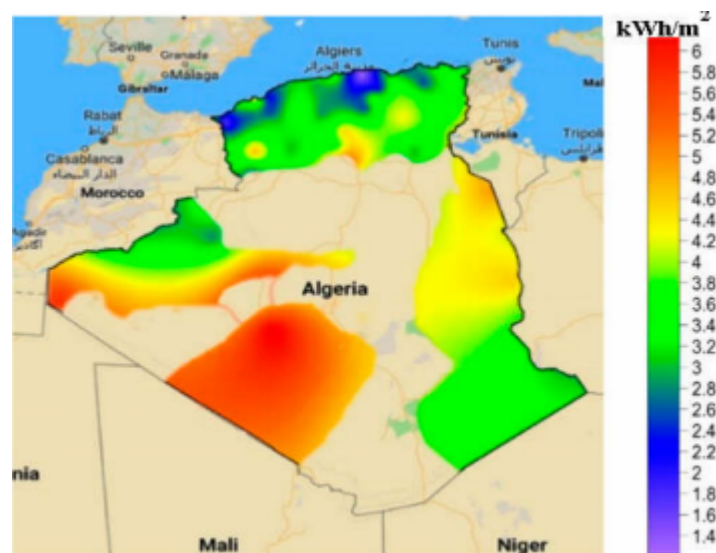


Figure II. 4 : rayonnement solaire en Algérie (kW/m2)

II.2 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

Le générateur photovoltaïque (PV) est constitué d'un ensemble d'équipements interconnectés, conçu pour exploiter l'énergie photovoltaïque afin de répondre aux besoins en charge. Selon la puissance requise, les panneaux solaires peuvent être assemblés pour former

un champ photovoltaïque. Lorsqu'il est directement connecté au récepteur, sans éléments additionnels, le panneau fonctionne en mode "au fil du soleil". Dans ce mode, la puissance électrique fournie au récepteur varie en fonction de l'intensité du rayonnement solaire [51].

Cependant, les heures d'ensoleillement ne coïncident pas toujours avec les périodes où l'électricité est nécessaire, notamment pour des usages constants tels que l'éclairage ou l'alimentation des réfrigérateurs. Pour pallier ce décalage entre la production solaire et les besoins en électricité, des batteries sont intégrées au système, permettant de stocker l'énergie produite par le générateur photovoltaïque pour une utilisation différée.

Un régulateur joue un rôle crucial dans ce système en évitant des problèmes tels que les surcharges ou les décharges profondes des batteries. En outre, dans de nombreuses applications, un onduleur photovoltaïque est indispensable pour convertir le courant continu généré par le système en courant alternatif, compatible avec la plupart des équipements électriques.

II.2.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, ou conversion photovoltaïque, se manifeste par la transformation directe de l'énergie électromagnétique, en l'occurrence le rayonnement solaire, en électricité. Ce phénomène survient lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière solaire, provoquant une interaction entre les photons de la lumière et les atomes du matériau. En conséquence, les électrons situés dans les couches électroniques externes, appelés électrons de valence, ont tendance à se libérer. Dans les cellules photovoltaïques, ces électrons libérés génèrent une faible tension électrique continue [52].

L'effet photovoltaïque consiste donc en la conversion directe de l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Pour garantir une puissance suffisante, ces cellules sont connectées entre elles pour former un module photovoltaïque, ou un ensemble de modules regroupés en un champ photovoltaïque.

II.2.2 Générateur photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque unique produit une puissance très limitée par rapport aux besoins énergétiques des applications domestiques et industrielles courantes. Par exemple, une cellule élémentaire d'environ 10 cm² génère au maximum quelques watts, avec une tension de jonction PN inférieure à un volt. Pour répondre aux exigences spécifiques de

puissance, plusieurs cellules sont assemblées pour constituer un panneau photovoltaïque, également appelé module.

La connexion en série des cellules permet d'augmenter la tension totale, tandis que la connexion en parallèle augmente le courant. Ainsi, un câblage série-parallèle est souvent utilisé pour concevoir un générateur photovoltaïque ayant les caractéristiques électriques requises (voir figure II.5) [45].

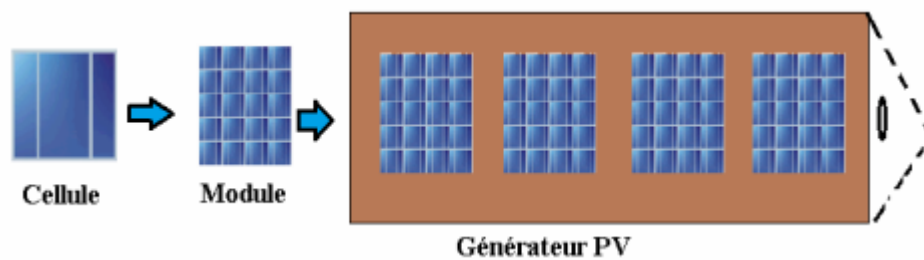


Figure II. 5 : Générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué des composants suivants (Figure II.6) [53] :

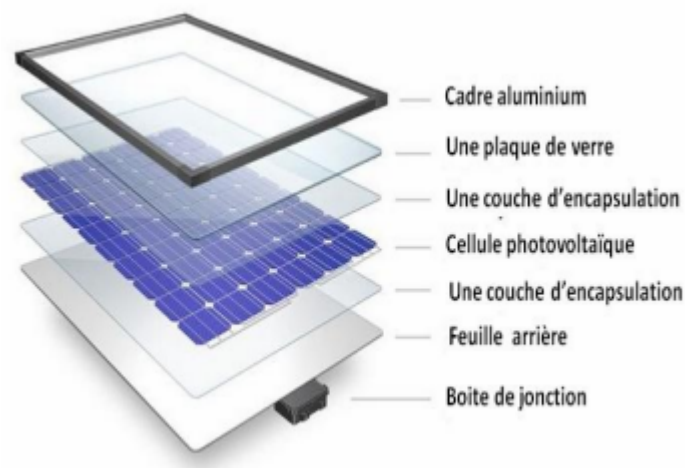


Figure II. 6 : Les Composants d'un panneau solaire

II.2.2.1 Cadre :

Les châssis des modules photovoltaïques sont principalement constitués de profilés en aluminium, assurant la fixation du stratifié au cadre. Les coins du châssis (cadre) sont solidement fixés à l'aide d'inserts en dents de scie ou de vis en acier inoxydable.

II.2.2.2 Surface avant (couvercle avant) :

La couche externe du module doit posséder un grand coefficient de transmission de lumière afin d'optimiser l'absorption des photons par la cellule photovoltaïque. Le matériau favorisé pour utiliser à cet effet est généralement le verre thermodurcissable (à faible teneur en fer), présentant une transmission lumineuse dépassant les 90% dans la plage de longueurs d'onde entre 400 et 1100 nm, avec une épaisseur de 4 mm environ [54].

II.2.2.3 Encapsulant :

Le matériau d'encapsulation joue un rôle crucial en liant les cellules aux couches de protection situées à l'avant et à l'arrière. Il s'agit d'un plastique souple et transparent, d'une épaisseur comprise entre 0,5 et 0,7 mm, positionné au-dessus et en dessous de la cellule. Divers polymères ont été utilisés dans l'industrie photovoltaïque comme encapsulants, tels que la silicone, le poly (butyral vinylique) (PVB), le polyuréthane (TPU) et l'éthylène-acétate de vinyle (EVA). Toutefois, l'EVA domine le marché, représentant 80 % de la part de marché, en raison de sa résistance aux intempéries, de sa grande transparence optique, de sa facilité de traitement et de son coût réduit [55].

II.2.2.4 Cellule photovoltaïque :

La conversion de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique est réalisée par la cellule photovoltaïque.

II.2.2.5 Surface arrière (feuille arrière):

Feuille arrière, également appelée La couche de support arrière, a pour fonction de protéger le module solaire contre les rayons ultraviolets, l'humidité et les conditions météorologiques défavorables. Elle est constituée d'une feuille composite, résultant de la combinaison de différentes couches (telles que Tedlar-Aluminium-Tedlar, ou bien Tedlar-Polyester-Tedlar ou « le Tedlar étant un film de polyfluorure de vinyle (PVF) »). Alternativement, le verre peut être utilisé comme la couche de support à l'arrière [54].

II.2.2.6 Boîte de jonction :

La boîte de jonction de panneau solaire est en effet le point central où se réalisent les connexions importantes dans le système. Elle abrite les connexions électriques entre les cellules solaires du panneau, permettant la création d'un circuit électrique efficace. De plus, elle intègre souvent des diodes de dérivation (bypass diodes) qui sont essentielles pour minimiser les pertes d'énergie causées par l'ombre partielle ou d'autres conditions défavorables. Ces diodes contournent les cellules partiellement ombragées, assurant ainsi que

le courant électrique peut continuer à circuler sans interruption dans le reste du panneau solaire. La boîte de jonction est donc une composante cruciale pour garantir la fiabilité et l'efficacité des panneaux solaires.

II.2.3 Structure de la cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est conçue à partir d'un semi-conducteur qui présente des bandes de conduction et de valence. Une région connue sous le nom de bande interdite sépare ces deux bandes, comme la montre la figure II.7 comme tout autre matériau, un semi-conducteur possède son niveau de Fermi « E_f », représentant le potentiel électrochimique ou le travail nécessaire pour libérer les électrons dans le matériau solide [56,57]. Le niveau de Fermi se trouve entre la bande de conduction et la bande de valence. L'électron a besoin d'une énergie du photon de lumière pour passer de la bande de valence à l'autre bande (de conduction). Cette énergie doit dépasser la valeur d'énergie de transition, également appelée écart d'énergie ou "gap", nécessaire pour franchir la bande interdite et accéder à la bande de conduction [56,57].

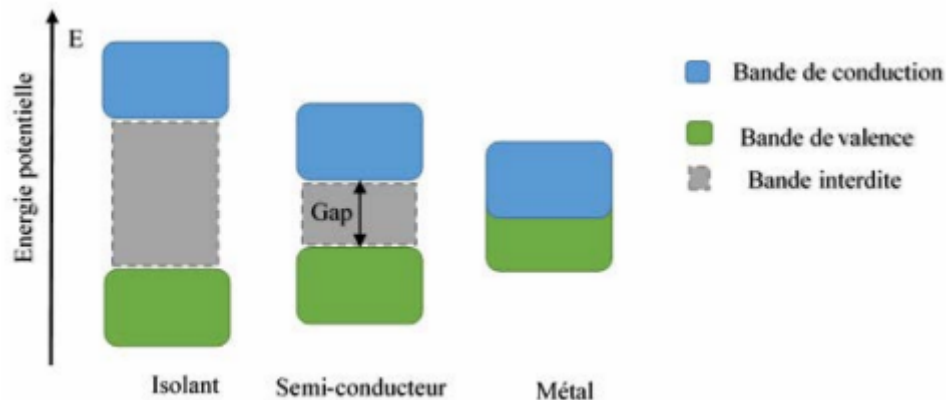


Figure II. 7 : Illustration des bandes d'énergie des divers matériaux [57].

La cellule photovoltaïque n'absorbe, au mieux, que 25 % de la lumière solaire. Cela s'explique par le fait que la lumière solaire est constituée de diverses radiations, et il est nécessaire que le rayonnement possède une quantité d'énergie suffisante pour libérer les électrons de la cellule photovoltaïque. Cependant, choisir un matériau avec un gap plus réduit pour exploiter davantage de photons de la lumière solaire aurait pour conséquence de produire une tension plus faible. Le gap idéal serait de 1,4 eV. En outre, les électrons doivent parcourir un circuit externe, d'un côté de la cellule à l'autre.

Il est possible d'utiliser un métal hautement conducteur et très résistant à la corrosion pour recouvrir le dessous de la cellule. Cependant, si le dessus est recouvert, les photons seraient bloqués. La meilleure solution consiste à placer une grille en métal aux dessus ou sur la face supérieure de la cellule. Étant donné que le silicium possède une forte capacité de réflexion, un revêtement anti-réflexion est appliqué sur la surface supérieure de la cellule pour maximiser la capture de la lumière solaire. Au noyau de la cellule on trouve deux couches : l'une est un semi-conducteur dopé négativement (N), tandis que l'autre est dopée positivement (P). Enfin La jonction P-N (Figure II.8) formée par ces deux couches créent un champ électrique.

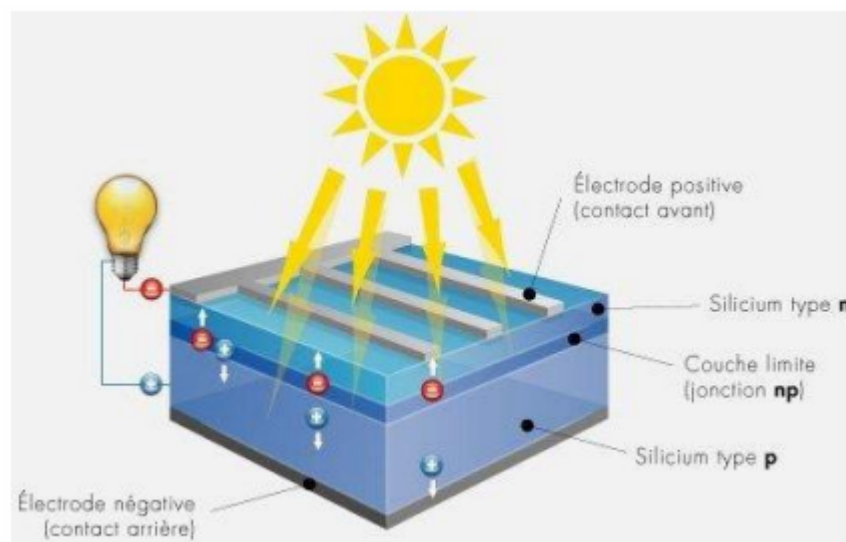


Figure II. 8 : La structure générale de la cellule photovoltaïque [58].

II.2.4 Les différentes technologies de cellule PV

La fabrication des cellules solaires repose sur diverses technologies, chacune possédant ses propres caractéristiques distinctives. Parmi les plus couramment utilisées figurent celles basées sur le silicium, notamment le monocristallin, le polycristallin et l'amorphe. Cependant, des recherches quotidiennes explorent de nouvelles technologies dans le but d'atteindre des rendements plus élevés à des coûts réduits [59].

II.2.4.1 Silicium monocristallin

Matériau largement répandu, offrant une efficacité notable sous des niveaux d'éclairement élevés et modérés, il constitue la base des panneaux solaires "terrestres" les plus performants, après ceux fabriqués à partir d'arséniure de gallium [60] (voir Figure II.9).

- Efficacité ou rendement électrique des panneaux : 15 à 20 % en conditions standard de test (STC).
- La plage de puissance des panneaux s'étend de 5 à 300 Wc.
- Plage d'éclairement: 100 à 1000 watts par mètre carré (W/m²).
- Utilisation: adapté à toutes les applications en extérieur nécessitant une puissance moyenne et puissance élevée, telles que les télécommunications, l'habitat, les centrales solaires et les toits solaires.

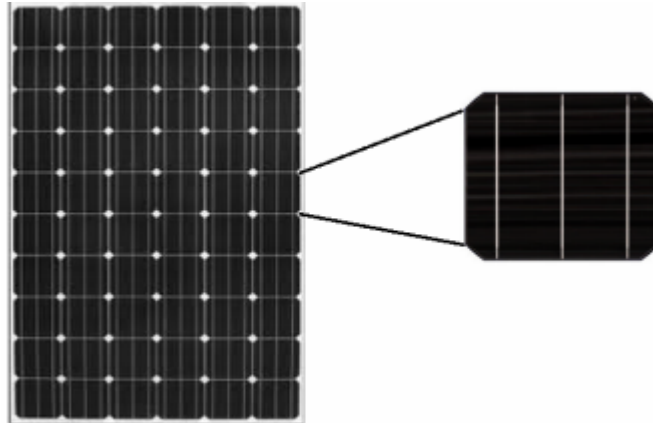


Figure II. 9 : Cellule au Silicium monocristallin

II.2.4.2 Cellules au Silicium poly cristallin

Ces cellules sont élaborées à partir de découpes d'un lingot de silicium fondu qui subit un processus de recristallisation (voir Figure II.10). Lors de la phase de production, le silicium fondu est versé pour former des lingots de silicium polycristallin, lesquels sont ensuite tranchés en fines tranches et assemblés pour constituer les cellules. Les cellules en silicium polycristallin sont plus économiques à fabriquer que leurs homologues monocristallins, en raison de la simplicité de leur processus de fabrication. Cependant, elles présentent un inconvénient en termes de productivité (une efficacité qui se situe autour de 13%) [61].

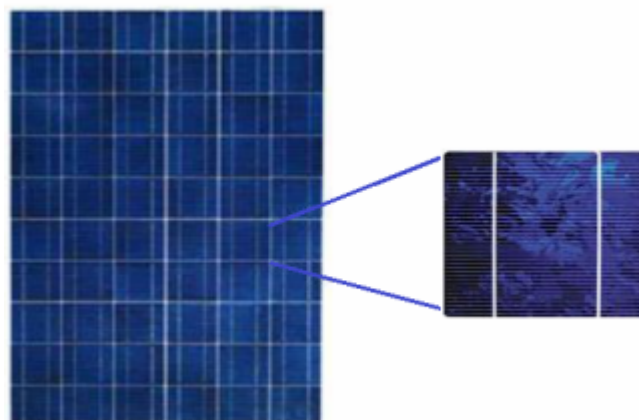


Figure II. 10 : Cellule au Silicium poly cristallin

- le Rendement varie de 13% à 16%.
- L'épaisseur varie entre 0,24 mm et 0,3 mm.
- Disponible en bleu avec une couche antiréflexion, en argent, brun, gris or et en vert sans couche antiréflexion.

II.2.4.3 Silicium amorphe

Moins performant en termes de puissance sous l'exposition directe au soleil par rapport aux deux types mentionnés précédemment, Cependant, ce silicium en couche très fine fonctionne avec tous les types d'éclairages, tant en extérieur qu'en intérieur. Sa fabrication, théoriquement moins coûteuse (la production n'ait pas encore atteint des niveaux similaires), permet la réalisation de petits formats grâce à une intégration en série et une découpe simplifiée (voir Figure II.11) [60].

**Figure II. 11 : Silicium amorphe**

- Efficacité électrique des panneaux : 5-7 % en conditions standard de test (STC), pouvant atteindre jusqu'à 12 % pour les cellules "multi-jonctions".
- La Puissance des panneaux photovoltaïques extérieurs : de 0,5 à 90 watt-crête Wc.
- Plage d'éclairage : de 20 lux en intérieur à 1 000 watts par mètre carré (W/m^2) en extérieur.
- Utilisation : adaptés à l'électronique professionnelle et grand public (comme les montres et les calculatrices), ainsi qu'à l'électronique à faible consommation (en extérieur), et les centrales solaires au sol.

II.2.4.4 Autres films minces.

Les cellules utilisées dans la fabrication de panneaux solaires peuvent être élaborées à partir d'autres matériaux, comme le cuivre et le tellure de cadmium (CdTe), le dyséléniure de cuivre et d'indium (CIS) et l'indium. Ce qui rend cette technologie attrayante, c'est la possibilité de la produire grâce à des procédés industriels moins coûteux par rapport aux technologies reposant sur le silicium cristallin. Cependant, il est important de noter que son rendement n'excède pas celui des technologies basées sur le silicium amorphe [53].

II.2.5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

Chaque module photovoltaïque possède ses caractéristiques opérationnelles, représentées par des courbes $I(V)$ et $P(V)$ non linéaires (Figure II.12). Ces courbes décrivent les performances électriques du module et mettent en évidence plusieurs paramètres essentiels [62-63].

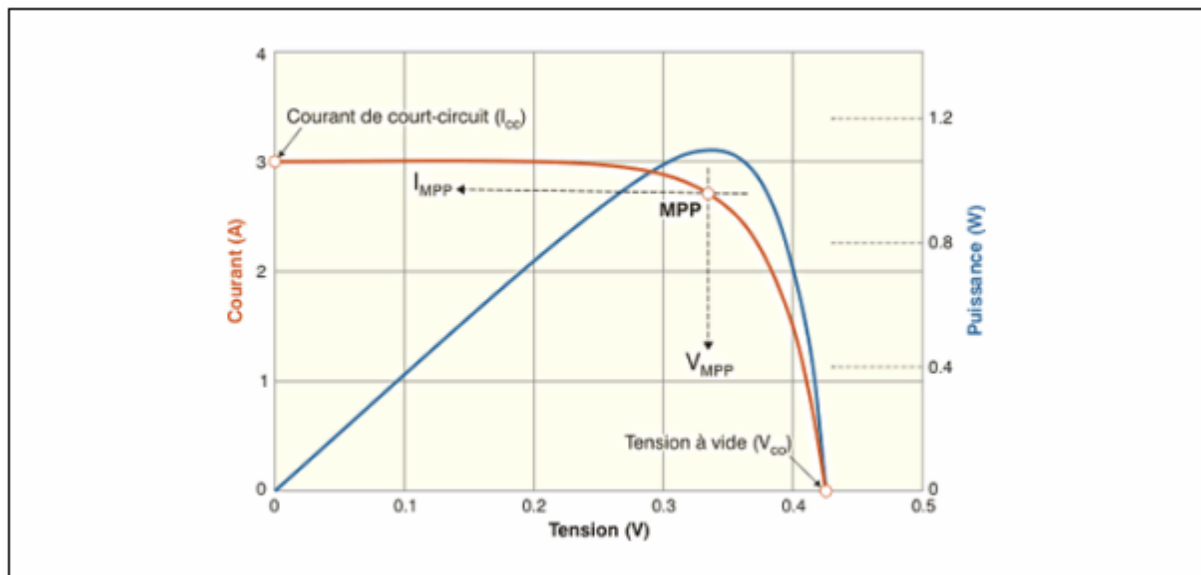


Figure II. 12 : Les Caractéristiques de la cellule PV

II.2.5.1 Le courant de court-circuit I_{cc} :

Représente le courant maximal produit par une cellule solaire. Il est généré lorsque les conditions de court-circuit ($V_{oc}=0$) sont présentes. La valeur de I_{cc} dépend directement de l'éclairement et de la température ambiante, et également varié par la surface de la cellule. Sa mesure s'obtient en connectant un ampèremètre aux bornes d'une cellule solaire.

II.2.5.2 La tension à vide V_{oc} :

La tension en circuit ouvert, notée V_{oc} , représente la tension maximale produite par une cellule photovoltaïque. Cette tension est générée lorsque le courant à travers la cellule est nul ($I_c=0$), dans des conditions de circuit ouvert. La valeur de La tension du circuit ouvert V_{oc} de la cellule photovoltaïque varie de manière logarithmique en fonction de l'éclairement et diminue avec l'augmentation de température. Pour mesurer cette tension, on connecte directement un voltmètre aux bornes de la cellule solaire.

II.2.5.3 Point de puissance maximale (P_{max}) :

V_{max} et I_{max} sont déterminés de manière à maximiser le produit $|V_{max} \cdot I_{max}|$, ce qui correspond à la puissance maximale (P_{max}) que la cellule photovoltaïque est capable de fournir. La recherche de ces valeurs optimales vise à garantir l'efficacité maximale de la cellule en assurant que le produit de tension maximale et de courant maximal est optimal pour la production d'énergie [54].

II.2.5.4 Courant de puissance maximum (I_{max}) :

C'est la valeur du courant nominale qui est utilisée pour obtenir une puissance maximale.

II.2.5.5 Tension de puissance maximale (V_{max}) :

Il s'agit de la valeur de tension nominale de la tension, au point d'obtention d'une puissance maximale.

II.2.5.6 Le Facteur de forme F :

Le facteur de performance des cellules solaires est une mesure cruciale de leur efficacité. À mesure qu'il se rapproche de l'unité, il indique une plus grande perfection des cellules. En termes mathématiques, ce facteur est le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (P_{max}) dans les conditions spécifiques d'éclairement et de température, par le produit de la tension en circuit ouvert (V_{oc}) et du courant (I_{cc}) de court-circuit [54], exprimé selon la formule II.1.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad \text{II.1}$$

II.2.5.7 Le rendement du module

Le rendement de conversion (η), exprimé en pourcentage, se définit comme le rapport entre la puissance maximale fournie par une cellule photovoltaïque et la puissance lumineuse

incidente (P_{inci}). Cette dernière correspond à l'énergie solaire acquise par la cellule PV (A_{cell}). Mathématiquement, le rendement de conversion est défini par la formule II.2 [54].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inci}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{A_{cell} \cdot E} \quad \text{II.2}$$

II.2.6 Association des panneaux PV

II.2.6.1 Association des panneaux photovoltaïques en série

En connectant plusieurs panneaux solaires en série, on permet d'élever la tension. Dans ce cas, la tension globale est la somme des tensions délivrées par ces panneaux, tandis que le courant traversant tous les panneaux reste constant (le même courant). Cette configuration en série a pour effet d'augmenter la puissance produite par les modules solaires. [64]

Les Figures II.13 et II.14 illustrent les caractéristiques obtenues en connectant en série les panneaux solaires identiques [64].

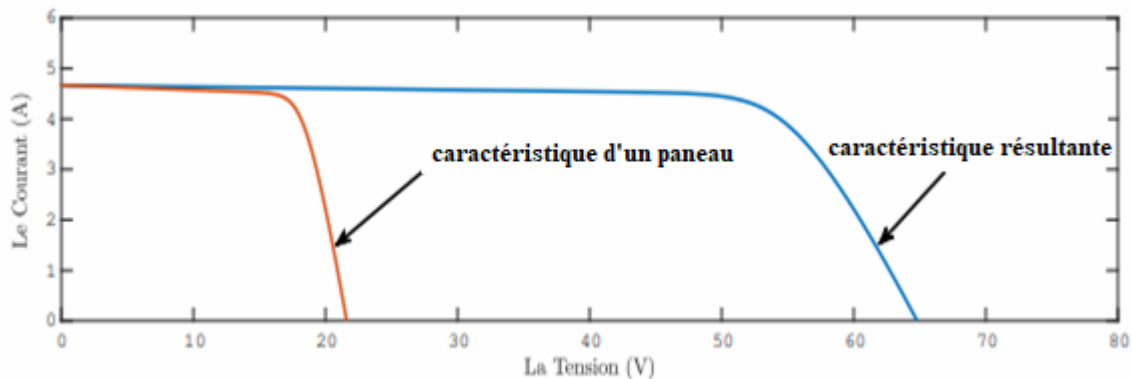


Figure II. 13 : Caractéristique de courant $I(V)$ résultante de l'association des panneaux PV en série

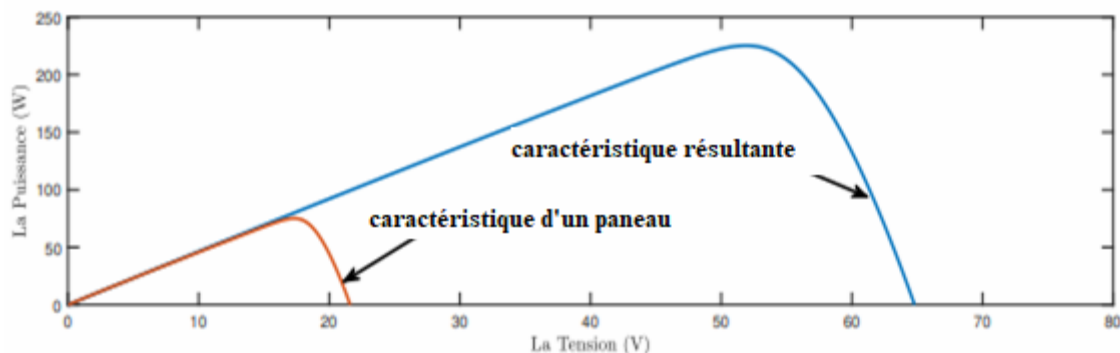


Figure II. 14 : Caractéristique de la puissance $P(V)$ résultante de l'association des panneaux PV en série

II.2.6.2 Association parallèle

Lorsque les modules photovoltaïques sont connectés en parallèle, les intensités de courant s'additionnent tandis que la tension reste constante. Cette configuration conduit à une augmentation de la puissance générée par les modules [65].

Les caractéristiques résultantes de cette connexion en parallèle sont illustrées dans les figures II.15 et II.16 [65].

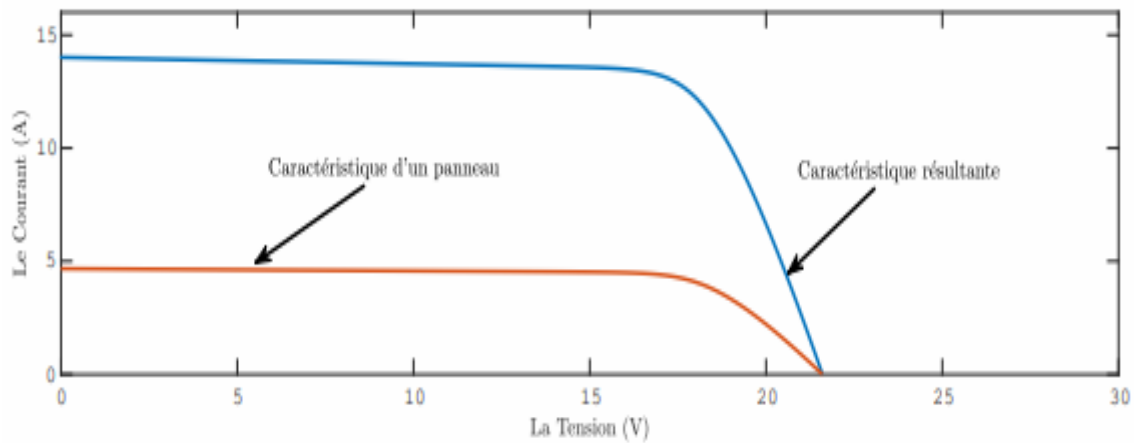


Figure II. 15 : Caractéristique de courant $I(V)$ résultante de l'association des panneaux PV en parallèle

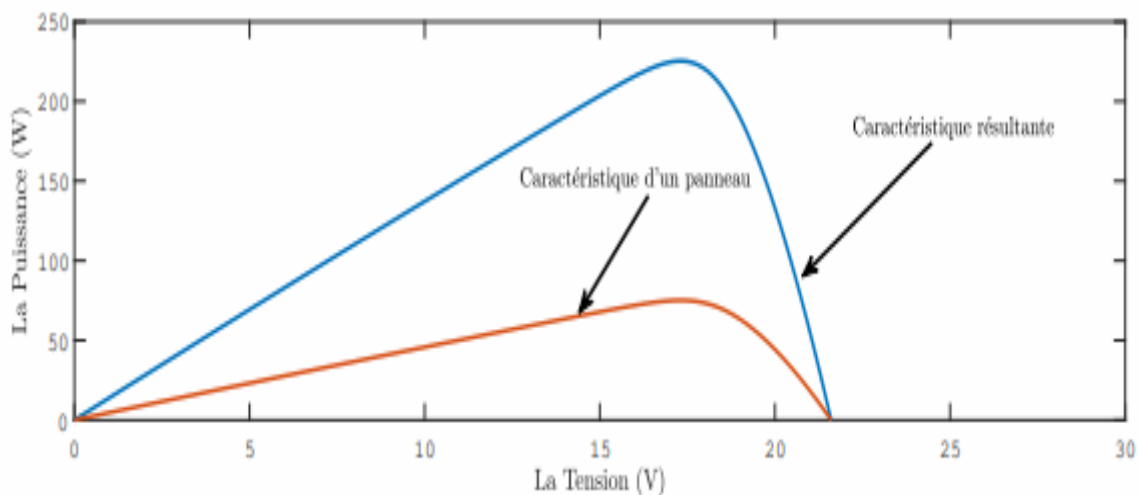


Figure II. 16 : Caractéristique de la puissance $P(V)$ résultante de l'association des panneaux PV en parallèle

II.2.7 Influence de l'éclairement et de la température sur les courbes $I=f(V)$ et $P=f(V)$

II.2.7.1 Influence de l'éclairement

Divers éléments influent sur le rayonnement solaire dans la surface d'un module photovoltaïque, parmi lesquels le mouvement du soleil au fil du temps et les variations liées aux journées nuageuses. Étant donné que les panneaux PV sont généralement fixés dans une

position spécifique, il devient crucial de déterminer l'inclinaison optimale du module photovoltaïque afin d'optimiser l'exposition au rayonnement solaire incident. La figure II.17 montre les caractéristiques $I-V$ et $P-V$ d'une cellule photovoltaïque soumise à différents niveaux d'éclairement, tout en gardant une température stable d'environ 25 °C [66]. On observe clairement que lorsque l'éclairement incident sur les panneaux photovoltaïques augmente, le courant électrique à la sortie de la cellule augmente également, entraînant une augmentation de la puissance générée. Cependant, cette variation affecte beaucoup moins la tension.

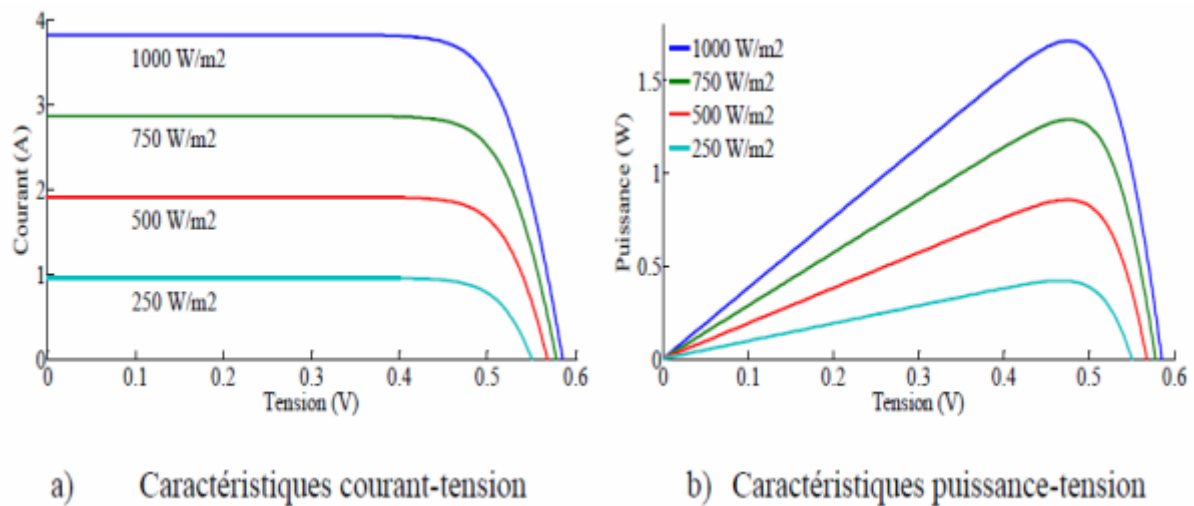


Figure II. 17 : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques de la cellule PV

II.2.7.2 Influence de la température

La température joue un rôle crucial dans le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, influençant significativement ses caractéristiques électriques. Une augmentation de la température entraîne une réduction proportionnelle de la tension (V_{oc}) de sortie et une légère augmentation du courant (I_{cc}) de court-circuit. En conséquence, ces variations conduisent à la diminution du MPPT (point de puissance maximale) des modules photovoltaïques [67]. La figure II.18 montre les caractéristiques du courant en fonction de la tension ($I-V$) et de la puissance en fonction de la tension ($P-V$) d'une cellule photovoltaïque sous un éclairement constant de 1000 W/m², en variant les températures.

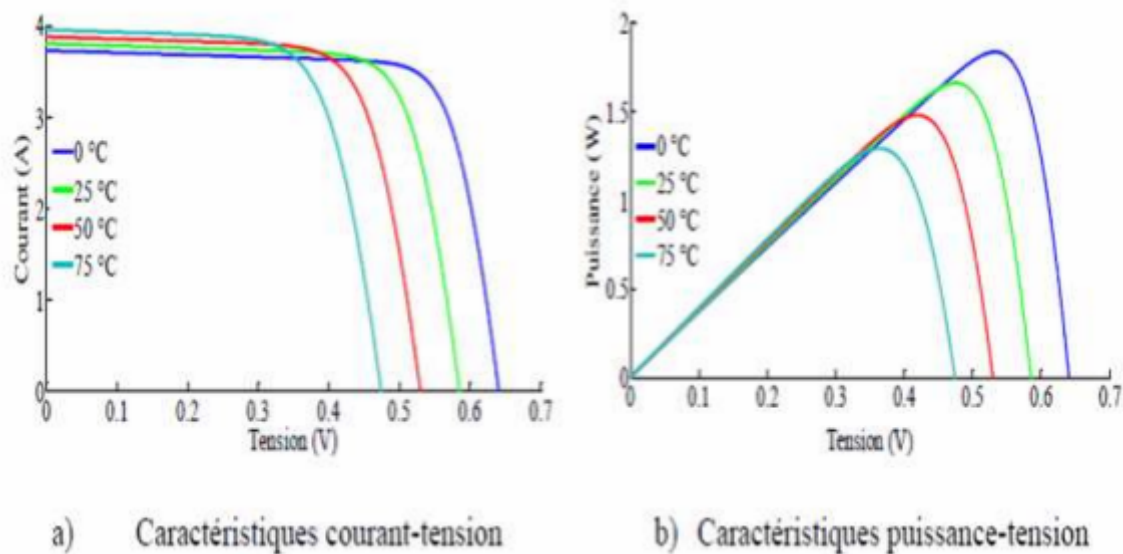


Figure II. 18 : Influence de la température sur les caractéristiques de la cellule PV

II.2.7.3 Influence d'ombrage

Le phénomène d'ombrage partiel survient lorsqu'une cellule reçoit une quantité réduite de lumière par rapport aux autres cellules connectées en série. Par conséquent, la cellule ombragée limite le courant circulant dans l'ensemble, Cela entraîne la dissipation d'une partie de la puissance produite par les autres cellules de l'ensemble. Cette dissipation d'énergie augmente proportionnellement à l'augmentation de l'ombrage [58]. Cette dynamique est illustrée de manière graphique sur la figure II.19.

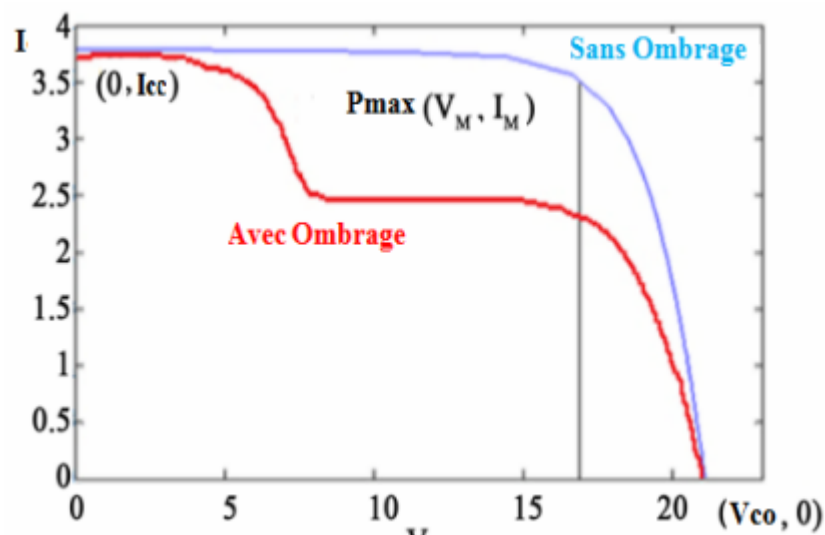


Figure II. 19 : Effet d'ombrage sur les caractéristique I(V) du module PV [58].

II.2.8 La protection des modules solaires

Afin d'assurer une longue durée de vie d'une installation PV destinée à la production d'énergie électrique sur plusieurs années, des dispositifs de protection électrique doivent être intégrés aux modules commerciaux. Ceci vise à prévenir d'éventuelles défaillances dévastatrices (résultant de la connexion de cellules « en série » et de panneaux « en parallèle »). Actuellement, deux sortes de protections conventionnelles sont couramment utilisées dans les installations photovoltaïques [68], comme illustré dans la figure II.20.

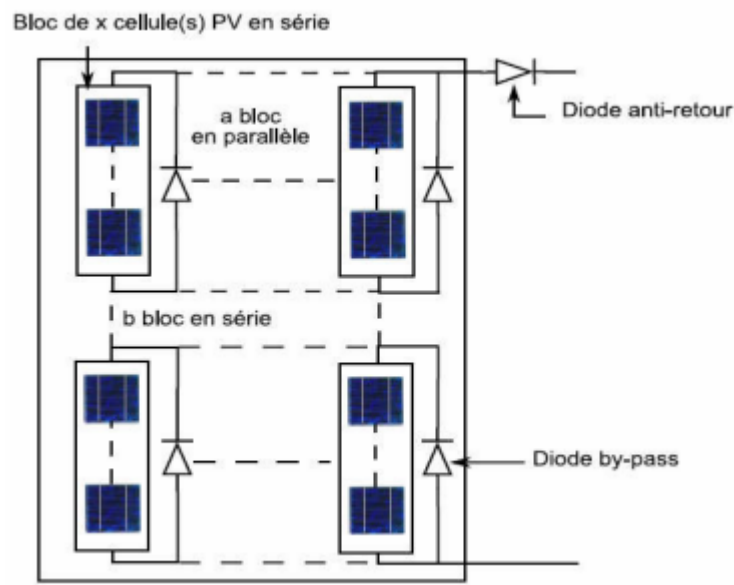


Figure II. 20 : Schéma d'un module solaire avec protections [68].

II.2.8.1 La diode anti-retour

Son rôle principal consiste à prévenir la circulation d'un courant négatif dans les générateurs photovoltaïques afin d'éviter les courants inverses (voir Figure II. 21). Ce phénomène peut se produire lorsqu'il y a une connexion en parallèle de plusieurs modules, ou lorsque toute charge connectée directement peut basculer du mode récepteur au mode générateur [68].

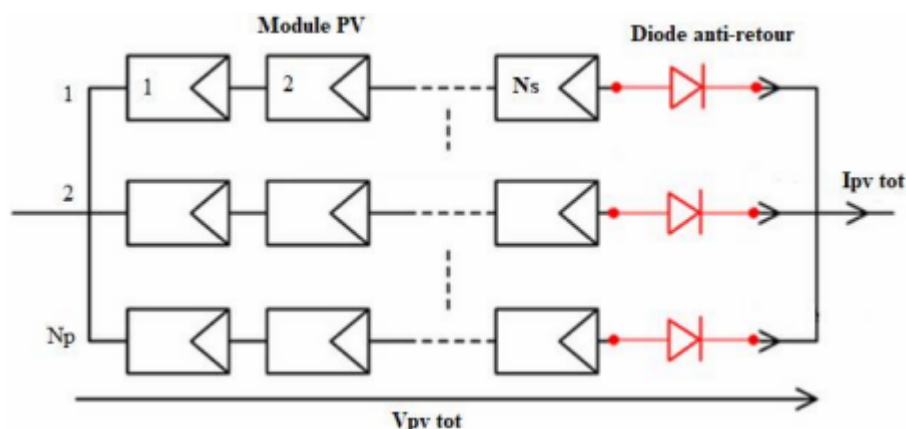


Figure II. 21 : Un champ photovoltaïque associé avec la diode de protection anti-retour (N_s : modules en séries et N_p : branches en parallèle) [68].

II.2.8.2 Les diodes by-pass

Comme indiqué sur la figure II.22, une diode by-pass peut isoler un groupe de cellules d'un sous-réseau (une diode by-pass est connectée en parallèle à un groupe de N cellules en série).

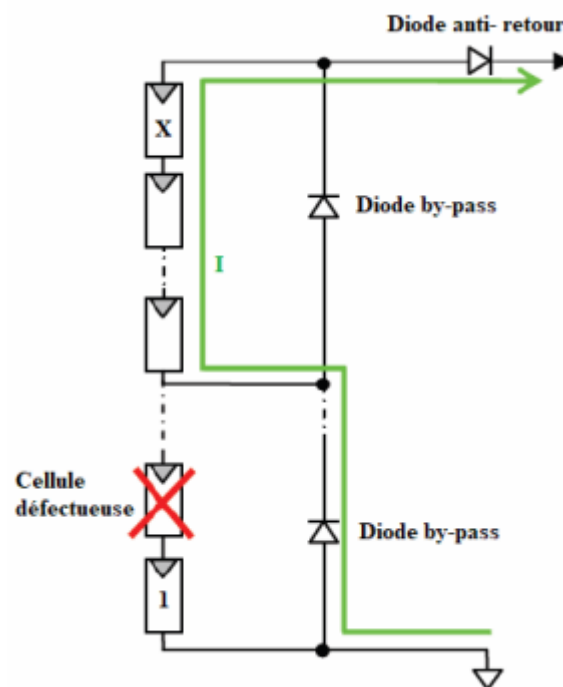


Figure II. 22 : Association des cellules en séries avec la diode de protection by-pass [68].

L'agencement en série des cellules photovoltaïques requiert que le courant traversant chaque cellule soit identique à celui circulant dans l'ensemble du générateur photovoltaïque (GPV) associé. Ainsi, lorsqu'un générateur photovoltaïque ou une section de celui-ci, comme une cellule, est ombragé, la partie du module qui est sous-irradiée peut être polarisée en inverse, se comportant alors comme un récepteur et dissipant la puissance non utilisée (qui ne peut pas être extraite). Cette dissipation entraîne un réchauffement immédiat de la zone ombragée susceptible de créer des "points chauds" qui pourraient endommager la zone affectée, entraînant une dégradation permanente des performances de l'ensemble du module photovoltaïque. Afin de prévenir ces conséquences néfastes, des diodes by-pass sont intégrées à des sous-réseaux de cellules [69,70].

II.2.9 Les différents types de systèmes photovoltaïques

II.2.9.1 Système PV autonome

Les systèmes autonomes, également appelés "stand-alone", fonctionnent de manière indépendante sans être connectés au réseau électrique, mais doivent être capables de couvrir la demande de charge en tout temps. Souvent, la puissance produite par le générateur photovoltaïque n'est pas à elle seule suffisante pour répondre à la demande de la charge. C'est pourquoi ces systèmes intègrent un dispositif de stockage d'énergie pour assurer leur autonomie [71]. En règle générale, ces installations se composent de quatre éléments principaux (Figure II.23) :

- Les modules photovoltaïques.
- Régulateur (Système de régulation).
- Les accumulateurs (Batteries).
- Convertisseur DC/AC (L'onduleur).

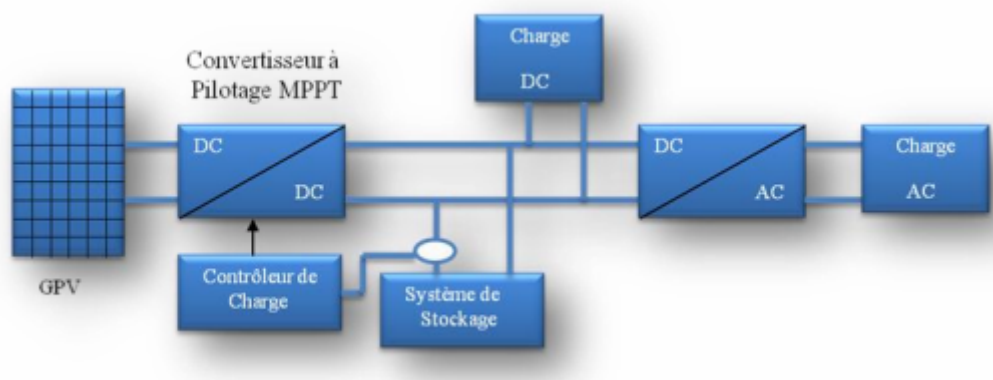


Figure II. 23 : Installation PV autonome

II.2.9.2 Système PV connecté directement au réseau

Les systèmes PV reliés au réseau électrique favorisent la décentralisation de la production au sein de ce réseau (voir Figure II.24). Cela signifie que l'énergie est générée à proximité des points de consommation, plutôt que d'être exclusivement produite par de grandes centrales thermiques, nucléaires, ou hydroélectriques. Avec le temps, les systèmes photovoltaïques connectés au réseau contribueront à réduire la nécessité d'accroître la capacité des lignes de distribution et de transmission, car ils auront simplement à acheminer leur surplus d'énergie vers les zones déficitaires en production [71].

La mutualisation des productions offre également l'avantage de sous-dimensionner les équipements de production supplémentaires. Ces échanges d'énergie éliminent la contrainte

d'acquérir et d'entretenir les batteries. Cependant, il reste toujours la possibilité de les utiliser comme source d'alimentation de secours en cas de panne du réseau électrique.

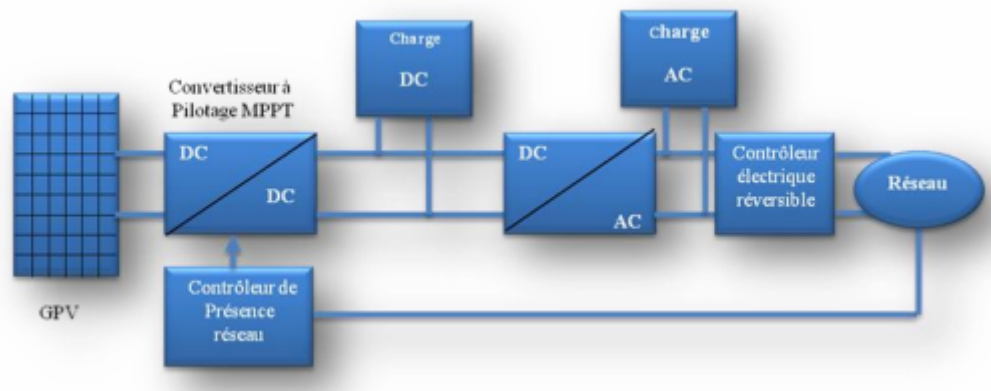


Figure II. 24 : Installation PV couplée au réseau [71].

II.2.10 Avantages et inconvénients du PV

L'énergie photovoltaïque présente de nombreux avantages, notamment [72] :

- Le potentiel énorme de cette ressource et sa gratuité,
- Maintien de la propreté pendant l'utilisation,
- Faible entretien
- Excellente fiabilité,
- Une grande variété de possibilités de production (allant des milliwatts aux mégawatts),
- Peut être utilisé partout.

Bien qu'il y ait des avantages intéressants, il y a également des **inconvénients**, tels que :

- Une source de rayonnement solaire diffuse nécessitant de vastes surfaces,
- Technologie cher,
- Stockage compliqué,
- Faible facteur de charge,
- Le recyclage des composants du système est difficile
- Investissement important.

II.3 LES TECHNIQUES DE NETTOYAGE DES PANNEAUX SOLAIRES

Les mécanismes destinés aux nettoyages des panneaux PV sont élaborés pour enlever les impuretés, la poussière et d'autres résidus susceptibles de s'accumuler aux dessus des panneaux solaires, entraînant une diminution de leur rendement. Diverses méthodes et technologies sont disponibles pour le nettoyage des panneaux solaires, comme détaillé dans les prochains paragraphes.

II.3.1 Nettoyage naturel à l'aide de la pluie et du vent

Dans le processus de nettoyage naturel, on tire parti de l'eau de pluie qui s'écoule sur la surface des panneaux PV inclinés, ces derniers étant généralement orientés à un angle propice pour une meilleure capture de l'irradiation solaire. Cependant, cette méthode présente un inconvénient majeur : elle n'assure pas un nettoyage complet des panneaux solaires, laissant ainsi la poussière adhérente à leur surface suite à l'interaction avec l'humidité atmosphérique. Cette adhérence nécessite généralement des pluies abondantes pour être éliminée. Elle se révèle peu fiable, surtout dans les zones fortement polluées ou en cas de précipitations insuffisantes [73]. Après une légère pluie, on a constaté une baisse significative de la production d'électricité des panneaux solaires, entraînant la formation d'une couche d'argile sur leur surface.

Dans une analyse théorique, Y. Jiang a examiné l'influence de la taille et de la composition des particules sur la faisabilité du nettoyage, ainsi que sur la vitesse requise pour que l'air effectue le processus d'élimination. Le vent est capable d'éliminer facilement les particules ayant un diamètre de 1 micron et plus. En revanche, l'élimination des plus petites particules par le vent s'est révélée inefficace en raison de l'exigence d'une grande vitesse de cisaillement pour parvenir à la séparation de ces particules de la surface [74].

II.3.2 Nettoyage à l'eau

Dans cette approche, un conduit alimenté en eau est guidé vers la surface des panneaux afin d'enlever la poussière accumulée. Ce procédé nécessite des volumes importants d'eau et l'emploi de pompes pour générer la pression élevée requise. Dans les techniques actuelles, il arrive parfois que de l'eau comprimée soit associée à un agent de nettoyage spécifique pour une élimination plus efficace de la poussière. L'utilisation de l'eau sert également au refroidissement des panneaux solaires et présente des similitudes avec le nettoyage à l'eau de pluie. Cependant, cette méthode présente des inconvénients tels que la difficulté d'utilisation

dans des zones où l'eau est rare. De plus, elle entraîne une importante consommation d'eau, en plus du risque de la provocation aux bords des panneaux solaires d'un dépôt chimique.

L'emploi de pompes à eau haute pression implique la consommation d'une fraction de l'énergie produite par les panneaux solaires, entraînant ainsi une diminution de l'efficacité. Il existe aussi des risques potentiels tels que le blocage ou la rupture des conduites d'eau, en plus du risque de choc thermique sur les panneaux solaires de température élevée lorsque l'eau est pulvérisée, laquelle sera généralement plus froide que les plaques. L'opération de nettoyage des panneaux solaires est habituellement planifiée vers midi, après le coucher du soleil, et étant donné que ces panneaux resteront humides jusqu'à leur séchage, accroissant ainsi le risque d'attirer encore la poussière pour s'accumuler à leur surface. Ceci est d'autant plus que l'air stagne, et la période critique de dépôt de la poussière débute après le coucher du soleil. Pour éviter les chocs thermiques, il est courant d'utiliser l'eau à une température proche de celles des panneaux solaires, en chauffant les réservoirs d'eau exposés au soleil [75]. Une étude approuve que l'utilisation de l'eau pour le nettoyage des panneaux solaires soit la meilleure méthode. Alors que cette méthode présente un coût élevé dans les champs solaires avec un espace large, ainsi dans les zones qui souffrent de pénurie d'eau [76].

II.3.3 Nettoyage manuel

Cela nécessite souvent l'intervention de professionnels en raison du caractère potentiellement dangereux de la tâche et de la nécessité d'un équipement adéquat. Toutefois, cette méthode est limitée sur les performances annuelles des panneaux, à moins d'être effectuée de manière régulière [77]. Les outils et les appareils de nettoyage manuel entraînent un coût important en raison de la grande quantité d'eau et de la main-d'œuvre requise [78]. Même si la main-d'œuvre impliquée est non qualifiée, elle entraîne des dommages au panneau solaire. En outre, des employés compétents peuvent réaliser des inspections périodiques, ce qui accroît le coût de main-d'œuvre [79]. Une représentation visuelle de cette technique est présentée dans la figure II.25.



Figure II. 25 : Nettoyage manuel des panneaux PV [80].

II.3.4 Nettoyage mécanique

Quelquefois, il est indispensable d'utiliser des dispositifs mécaniques comme des robots ou des moteurs pour faire fonctionner des brosses ou des balais, en plus l'emploi de pompes à eau haute pression avec un réservoir de stockage d'eau. Mani and Pillai [81], ont été observés que le nettoyage des panneaux solaires requiert une maintenance régulière une fois par semaine pendant les jours secs, mais cette maintenance est renforcée à une opération quotidienne lorsque la poussière s'accumule à des niveaux élevés. Dans l'opération de nettoyage mécanique, on utilise l'automatisation comme le montre la figure II.26 et figure II.27. Le système est contrôlé par des régulateurs bien précis et des capteurs. Cette technique est considérée très efficace dans les situations où il n'est pas possible de nettoyer à l'eau. Cependant, bien qu'il soit possible de nettoyer avec l'eau, le contact des brosses et le poids des appareils de nettoyage mécaniques peuvent entraîner des éraflures sur les surfaces des panneaux solaires. Cette technique nécessite une consommation d'énergie plus importante que dans toutes les autres techniques de nettoyages mentionnés précédemment, en plus les pièces

mécaniques nécessitent de l'entretien. Jusqu'à présent, il n'y a pas de confirmation de l'efficacité totale de cette méthode pour une accumulation significative de poussière



Figure II. 26 : Panneaux solaires nettoyés automatiquement [81].



Figure II. 27 : Panneaux solaires nettoyés par brosses automatisées [82].

II.3.5 L'écran électrodynamique (EDS)

L'application d'un écran électrodynamique (EDS) au-dessus de la surface du panneau solaire, comme il est montré dans la Figure, peut assurer l'enlèvement automatique de la poussière sèche accumulée sans avoir besoin d'eau ni de composants mécaniques mobiles [83]. L'utilisation de cette méthode de nettoyage repose sur la transformation de la poussière en poussière active. Elle utilise un champ électrique de haute tension pour produire de l'électricité sur un écran qui charge les particules de poussière et rendre l'élimination de ces particules plus faciles en les déplaçant le long du bord de la surface. Ce procédé a été évalué par les chercheurs, démontrant qu'il permet de retirer 90 % des particules de poussière accumulée en seulement deux minutes de fonctionnement du dispositif. Cette méthode a été

appliquée avec succès dans des régions arides, sèches et désertiques [84], La figure II.28 illustre de manière typique le schéma de l'EDS.

Ce procédé est notable pour son efficacité rapide dans l'élimination de la poussière par rapport à d'autres techniques ; il a une consommation d'énergie limitée et ne requiert pas un système de contrôle compliqué, étant commandé par un régulateur branché à des capteurs. Cependant, un éventuel inconvénient de cette méthode est la possible dégradation de l'écran sous l'effet de l'exposition aux rayons ultraviolets. Le système requiert une alimentation haute tension pour produire le champ électrique, entraînant une réduction de l'efficacité de génération (de 15 %). Il a été démontré par des recherches que cette méthode ne fonctionne pas pour éliminer les particules de poussière humide ou d'origine cimentière, et son efficacité est restreinte aux particules de taille micro et petite [85].

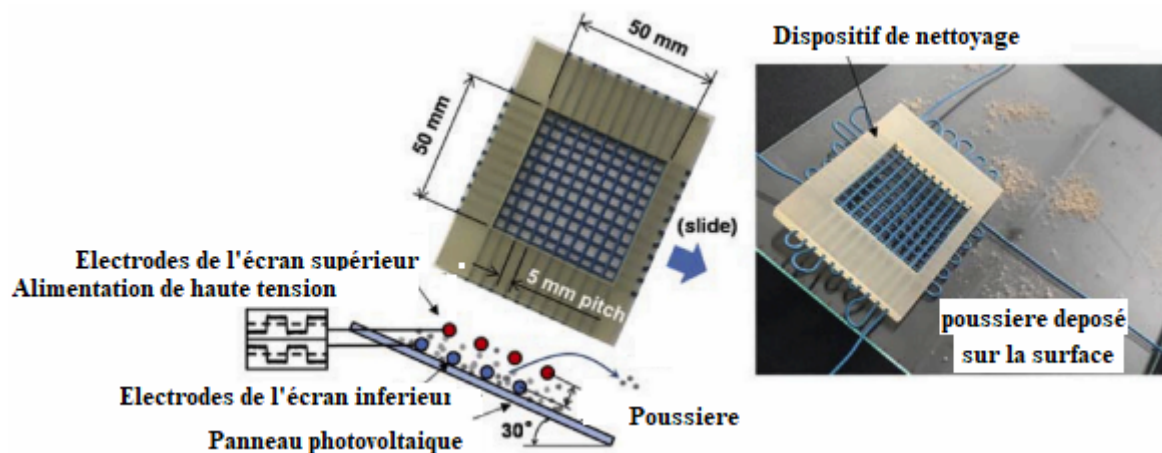


Figure II. 28 : Système de nettoyage électrodynamique détachable pour l'élimination de la poussière des panneaux solaires

II.3.6 Revêtement super hydrophobe

Dans cette approche, le processus de nettoyage repose sur l'utilisation d'une surface poreuse à la couche externe. Le principe sous-jacent à cette méthode implique l'application d'un revêtement hydrophobe sur la surface des panneaux solaires, ainsi qu'une fine couche agit comme une barrière. Cette configuration empêche l'eau recueillie au panneau de s'y accrocher en raison de la présence de cette barrière.

Les gouttes d'eau s'écoulent de la surface de la même manière qu'une balle glisse sur un toboggan en inclinant la surface des panneaux solaires à un angle, comme illustré dans la figure II.29 L'eau utilisée pour le nettoyage des panneaux solaires se déposent dans les zones basses, ensuite s'évaporent rapidement, laissant derrière eux les déchets qui ont été éliminés.

Cependant, il est nécessaire de continuer à évaluer la viabilité de cette méthode et son coût économique dans diverses conditions environnementales et météorologiques [87].



Figure II. 29 : Revêtement super hydrophobe [87].

II.3.7 Autonettoyant ultrasonique

Dans cette méthode de nettoyage, une fréquence ultrasonore élevée standard au-dessus de l'ouïe humaine (jusqu'à 20 kHz) est employée. Ce procédé vise à éliminer certains polluants qui se trouvent dans un environnement humide. Ces contaminants peuvent inclure de la saleté, de la graisse, de l'huile et des composés de polissage. On peut utiliser cette méthode pour nettoyer divers matériaux tels que le verre, la céramique, les métaux, etc. Le processus se produit en créant ce qu'on nomme la cavité, où des bulles de taille micronique se forment et se développent en raison de l'alternance d'ondes de pression positive et négative. Avant d'éclater, les bulles emmagasinent de grandes quantités d'énergie. À l'intérieur de la bulle de cavité, les températures peuvent atteindre des niveaux extrêmement élevés, avec des pressions pouvant atteindre 500 atmosphères. La bulle subit une explosion interne à proximité de la surface dure, modifiant ainsi sa forme et la transformant en gouttelette de proximité d'un dixième (1/10) de sa taille. Ces gouttelettes se propagent à des vitesses pouvant atteindre quatre cents kilomètres par heure (400 km/h) vers la surface solide. Grâce à cette combinaison de température, de pression et de vitesse élevée, les contaminants sont libérés de leurs liaisons [88].

La méthode de nettoyage ultrasonique est capable d'atteindre les petites fissures et de supprimer efficacement les fines particules de poussière en raison de la petite taille des gouttelettes, qui sont relativement grandes. La fréquence de résonance « du transformateur » est déterminée par la taille des bulles et du jet, En règle générale, les transducteurs

ultrasoniques employés dans le domaine du nettoyage ont une fréquence de 20 à 80 kHz, comme le montre la figure II.30.

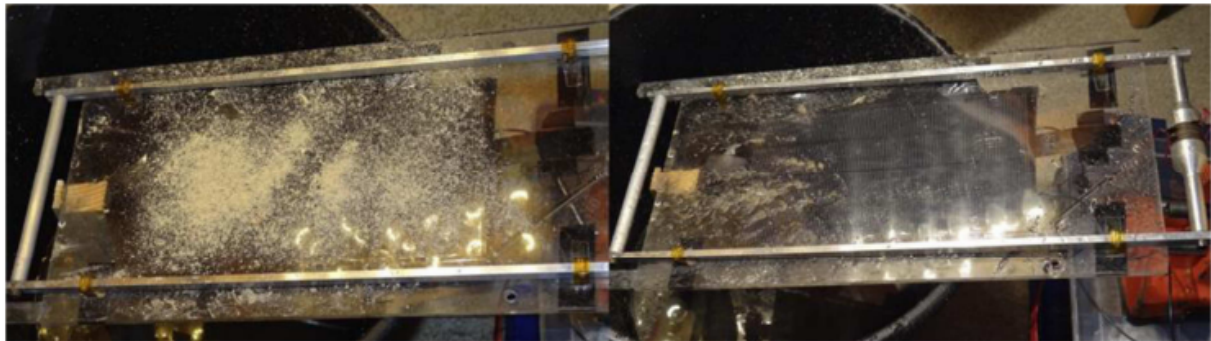


Figure II. 30 : Observations générales d'une section du panneau solaire : à gauche - panneau ayant subi une pollution artificielle ; à droite - panneau après le processus de nettoyage par ultrasons [88].

Dans la figure II.31, on peut observer quatre actionneurs piézoélectriques qui sont fixés à la surface supérieure du panneau et qui sont entraînés par un générateur d'impulsions, ce qui produit des vibrations comme des impulsions. Le dispositif piézoélectrique est situé à une distance de 7 cm et fonctionne à la fréquence de résonance. Les particules de poussière de surface sont soumises à une accélération due à l'impulsion mobile, ce qui entraîne une migration de la poussière depuis la surface du panneau. Des expériences ont démontré que, en raison de la gravité, les particules plus volumineuses peuvent s'étirer vers le bas et s'éloigner de la surface du panneau.

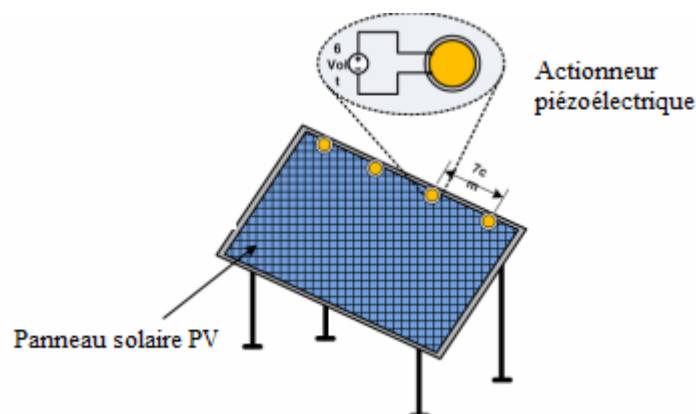


Figure II. 31 : Applications de nettoyage de panneaux solaires basées sur des actionneurs piézoélectriques situés à la surface du panneau.

Conclusion :

Ce chapitre offre une introduction aux situations énergétiques mondiales, puis à l'Algérie. Les prévisions soulignent l'importance de poursuivre les études en vue de

l'exploitation des énergies renouvelables. Il est indéniable que l'utilisation croissante des ressources énergétiques renouvelables, en particulier de l'énergie solaire, semble être une solution très logique pour satisfaire les besoins énergétiques de l'humanité. D'un autre côté, les techniques de nettoyage des panneaux solaires jouent un rôle vital dans le maintien de leur performance. Ces pratiques de maintenance, allant du nettoyage manuel aux technologies plus avancées, garantissent que les installations photovoltaïques continuent de produire de l'électricité de manière optimale. Cet aspect est essentiel pour maximiser l'efficacité des panneaux solaires et prolonger leur durée de vie, contribuant ainsi à une utilisation plus efficace des énergies renouvelables dans le contexte de notre dépendance énergétique croissante. Dans le prochain chapitre, nous allons aborder l'une des techniques de nettoyage électrostatique par décharge couronne utilisant le vent ionique, le matériel utilisé dans cette technologie, les appareils de mesure et la méthode expérimentale seront détaillés dans la prochaine partie.

CHAPITRE III

MATERIEL ET METHODE

III. MATERIEL ET METHODE

Introduction

Le nettoyage électrostatique des panneaux solaires est un système qui contient plusieurs facteurs peuvent influencer son efficacité. Le présent chapitre est une présentation d'un nouveau dispositif de nettoyage électrostatique des panneaux solaires utilisant le phénomène de la décharge couronne avec deux configurations différentes qui présentent un nettoyage optimal. En premier lieu, le processus est étudié avec la configuration fil/rectangle qui a donné des résultats intéressants, puis nous avons étudié la configuration fil/plaque qui nous a donné les meilleurs résultats d'efficacité de nettoyage des panneaux photovoltaïques.

Ce chapitre contient trois parties. La première concerne une description du matériau utilisé (le sable), les dispositifs et les appareils utilisés pour les différentes mesures. La seconde partie est réservée à la description du dispositif de nettoyage et enfin, nous présentons dans la troisième partie un aperçu du principe de fonctionnement du dispositif de nettoyage et la procédure expérimentale pour déterminer l'influence des paramètres sur le processus de nettoyage

III.1 Matériaux

III.1.1 La poussière de sable

La poussière de sable utilisée dans cette étude provient de Ouargla, une ville située dans le Sahara algérien. La taille des particules de poussière a été analysée à l'aide d'un granulomètre laser (Fritsch, Analyzer 22) et a montré une valeur moyenne de 484,1 μm , comme le montre la Figure III.1.

La composition chimique des particules a été déterminée à l'aide d'un spectromètre à rayons X (M4 Tornado), et il a été constaté que la substance prédominante était la silice, représentant plus de 87 % de la composition totale. La procédure d'utilisation du spectromètre à rayons X consiste à diriger des rayons X sur l'échantillon et à détecter les signaux caractéristiques résultants, permettant d'analyser la composition élémentaire et la structure électronique de l'échantillon.



Figure III. 1 : Analyse des particules de sable [89]

III.2 GENERATEUR DE LA HAUTE TENSION CONTINUE

L'actionneur de vent ionique est relié à une source de haute tension, d'où la nécessité d'utiliser des tensions élevées pour générer un vent ionique suffisamment fort. Le générateur haute tension réglable, dont la plage varie entre 0 et ± 40 kV, permet d'obtenir différentes polarités (Figure III.2).



Figure III. 2: Source haute tension continu (XP Glassman, 40 kV, 15 mA).

III.3 APPAREILLAGE DE MESURE

III.3.1 Mesure de la vitesse du vent

La vitesse du vent générée par l'actionneur, pour le nettoyage des panneaux solaires, est mesurée pour chaque expérience à l'aide de deux types d'anémomètres. Les essais de la première configuration sont réalisés avec un anémomètre de type Testo 405i, tandis que ceux

de la deuxième configuration sont effectués à l'aide d'un anémomètre de type Benetech GM8903 (voir Figure III.3) [90-91].

❖ *Caractéristiques techniques de Testo 405i :*

- Température : Étendue de mesure -20 à +60 °C,
- Précision : $\pm 0,5$ °C, Résolution : 0,1 °C
- Dimensions : 200 x 30 x 41 mm
- Température de service : -20 à +50 °C
- Type de pile : 3 piles Micro AAA
- Diamètre du tube de sonde : 12 mm

❖ *Caractéristiques techniques de Benetech GM8903 :*

- Plage de mesure : vitesse de l'air, 0-30 m/s; Température de l'air, 0 - 45 °C,
- Unité de vitesse : m / s, Nœuds, Km / h,
- Précision de mesure de la température de l'air : ± 2 °C
- Précision de mesure de la vitesse de l'air : $\pm 3\%$ ± 0.1 dgts
- Type de pile : 4 piles Micro AAA



Figure III. 3 : Anémomètre de type (a) Anémomètre testo 405i [90], (b) Anémomètre Benetech GM8903 [91].

(a)

(b)

III.3.2 Mesure de l'humidité relative

La mesure de l'humidité relative est un élément essentiel et un des paramètres principaux avant chaque série d'expériences, pour une étude expérimentale en utilisant Le thermomètre hygromètre CA 1246, qui est un instrument 2 en 1 permettant la mesure de l'humidité relative, ainsi que la température ambiante [92].



Figure III. 4 : Thermo-hygrometer CA 1246

❖ *Caractéristiques techniques*

- Humidité relative : de 3,0 à 98,0 %HR
- Température ambiante : de - 10,0 à +60,0°C
- Enregistrement jusqu'à 1 million de points
- Dimensions : 187 x 72 x 32 mm, Masse : 260 g avec piles
- Interfaces USB ou Bluetooth
- Gaine de protection antichoc disponible en accessoire

III.3.3 Mesure de la masse granulaire

La masse granulaire est mesurée avant chaque expérience à l'aide d'une balance électronique de précision de marque CAS MWP-600H [93]

❖ *Caractéristiques techniques*

- Haute précision
- 8 unités de mesure
- Fonction comptage, pesage et pourcentage
- Affichage rétroéclairé
- Alarme de surcharge
- Mise hors tension automatique

- Calibration automatique
- Capacité x précision : 600 x 0.01 g.



Figure III. 5 : Balance numérique CAS MWP-600H.

III.3.4 Analyseur de la taille des particules de sable

La taille des particules de poussière a été analysée à l'aide d'un granulomètre laser (Fritsch) (voir figure III.6), il fait L'analyse automatique de la taille des particules jusqu'à la nano-gamme [94].

L'ANALYSETTE 22 NeXT Nano entièrement revue avec une plage de mesure extra large de 0,01 - 3800 μm pour une précision et une sensibilité maximale pour les plus petites particules avec un système de détection supplémentaire. La conception de mesure intelligemment revisitée rend l'ANALYSETTE 22 NeXT particulièrement compacte et peu encombrante. Pour la plupart des mesures, le temps de mesure est inférieur à une minute, y compris un nettoyage fiable sans résidus.

L'évaluation complète de l'analyse granulométrique se fait automatiquement avec des résultats clairement organisés visibles directement sur l'écran.

- Plage de mesure : 0,01 - 3800 μm
- Méthode d'analyse : diffusion statique de la lumière (diffraction laser)
- Grandeur de mesure : taille de particule
- Norme : ISO 13320
- Alignement du rayon laser : automatique
- Classe laser selon CEI 60825-1 : classe 1
- Capteur : capteur à semi-conducteurs spécialement conçu

- Capteurs grand angle : oui
- Canaux rétrodiffusion : oui
- Durée de mesure typique : 5 – 10 s (saisie de la valeur d'une mesure individuelle)
1 min (cycle de mesure complet)
- Analyse : distribution granulométrique représentée sous forme de courbe de total, de diagramme à barres ou de tableau
- Raccordement électrique : 100-240 V/1~, 50-60 Hz, 120 W
- Dimensions (L x P x H) : 66,6 x 31,9 x 29,4 cm
- Logiciel : MaS control, qui commande, saisit et analyse les résultats de mesure.
- Conditions système requises (ordinateur personnel du client) : PC Windows standard, 4 Go de RAM, au moins Windows 10, port USB, afficheur, clavier, souris



Figure III. 6 : Granulométrie laser (Fritsch, Analyzer 22) [94].

III.3.5 Analyseur de La composition chimique des particules de sable : spectromètre à rayons X (M4 Tornado)

La microfluorescence X permet une analyse localisée d'un échantillon avec une résolution spatiale maximale de l'ordre de 20 μm . Le M4 TORNADO PLUS capable de mesurer n'importe quel élément à partir du carbone. De plus, les performances de tous les éléments lumineux sont fortement augmentées [95].



Figure III. 7 : Spectromètre à rayons X (M4 Tornado) [94].

III.3.5.1 Caractéristiques techniques :

- La mesure des solides, des particules et des liquides.
- Identifier des échantillons inégaux avec une grande profondeur de champ en utilisant le système AMS de gestion de l'ouverture.
- Tube à rayons X (source Rh) avec optiques polycapillaires pour focaliser le faisceau et obtenir une brillance élevée dans un spot de taille de 100 μ m ou de 20 μ m.
- Double détecteur Bruker XFlash (type SDD) pour augmenter la vitesse d'acquisition, identifier les pics de diffraction et limiter les effets d'ombrage sur les échantillons non plans.
- Augmentez les résultats grâce à des mises à jour et des offres de services pendant toute la durée de vie de l'appareil.

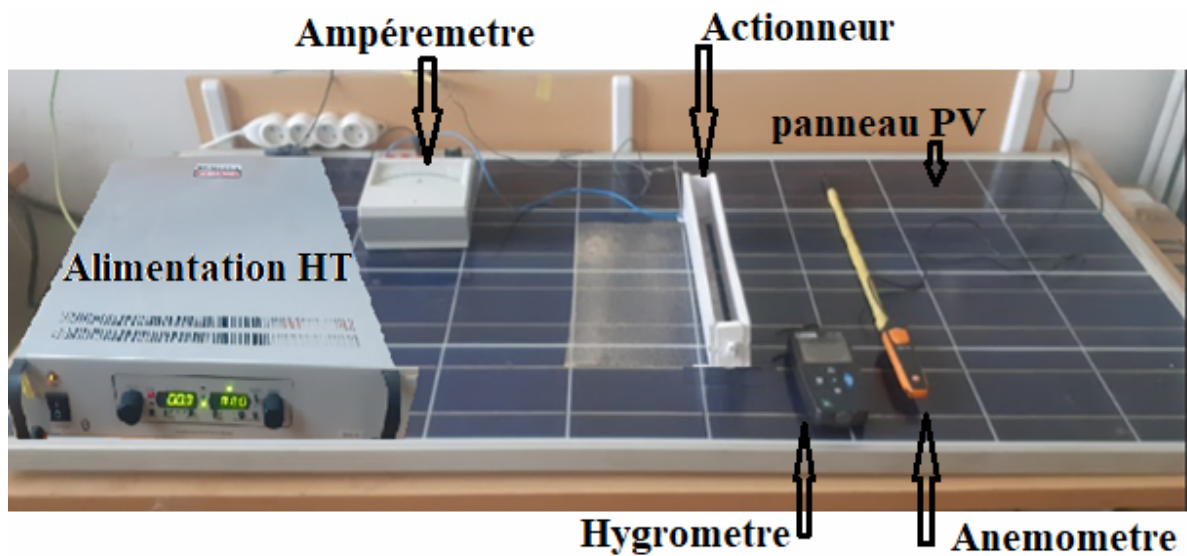
III.4 DESCRIPTION DE DISPOSITIF DE NETTOYAGE :

Un nouveau dispositif de nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques, basé sur une technique de nettoyage électrostatique par décharge couronne utilisant le vent ionique, a été développé au sein du Laboratoire APELEC de l'Université de Sidi Bel Abbés. Ce procédé électrostatique repose sur l'utilisation de haute tension continue [96-98]. Le dispositif permet de varier plusieurs paramètres, offrant ainsi la possibilité d'étudier l'influence de chacun d'eux sur l'efficacité du nettoyage, ce qui en fait un outil de laboratoire précieux.

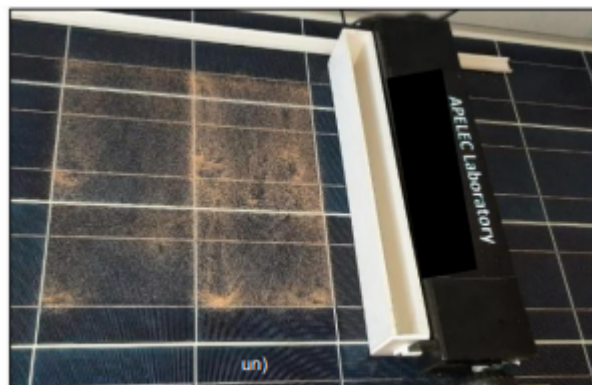
Pour obtenir un nettoyage efficace de la poussière de sable des panneaux solaires, il est d'abord nécessaire de créer un vent électrique à l'aide du champ électrique appliqué entre deux électrodes : l'électrode active reliée à la haute tension (un fil) et l'électrode reliée à la terre (rectangle ou plaque). La photographie de l'actionneur, avec le générateur de haute tension et les appareils de mesure utilisés, est présentée dans les Figures III.8 et III.9.

Le dispositif de nettoyage est constitué des éléments suivants :

1. Actionneur du vent ionique
2. Véhicule assure le déplacement de dispositif



(a)



(b)

Figure III. 8 : Photographie du dispositif de nettoyage (a) Actionneur avec matériels utilisés, (b) Actionneur lié au véhicule [98].

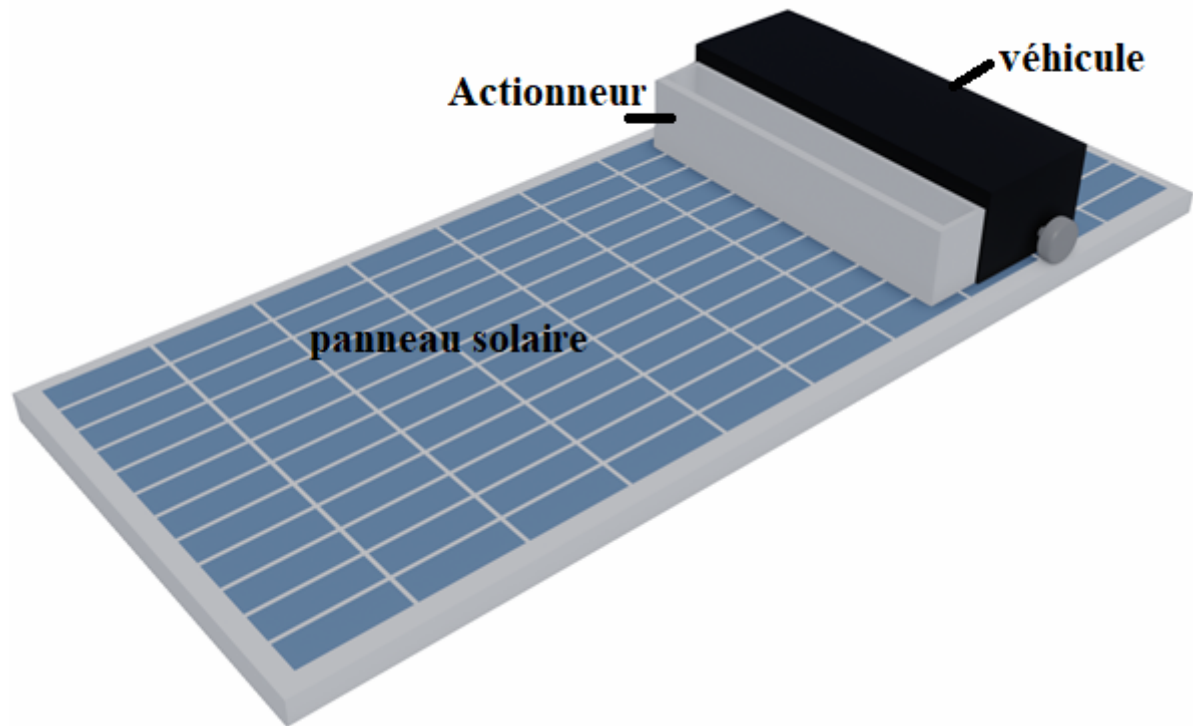


Figure III. 9 : Schéma descriptif du dispositif de nettoyage [96].

III.4.1 Actionneur de nettoyage :

III.4.1.1 Configuration fil/rectangle :

L'actionneur électrostatique utilisé dans cette configuration est constitué d'un fil de 0,1 mm de diamètre relié à la haute tension et d'un cadre rectangulaire mis à la terre. Le cadre mesure 230 mm de longueur et une largeur interne variable, notée "d". Il est fabriqué à partir d'une bande d'aluminium de 1 cm de largeur (Figure III.10) [97]. Le fil haute tension est positionné à 3 cm au-dessus de l'électrode mise à la terre et est alimenté par une source de courant continu haute tension (Xpower, 40 kV, 15 mA).

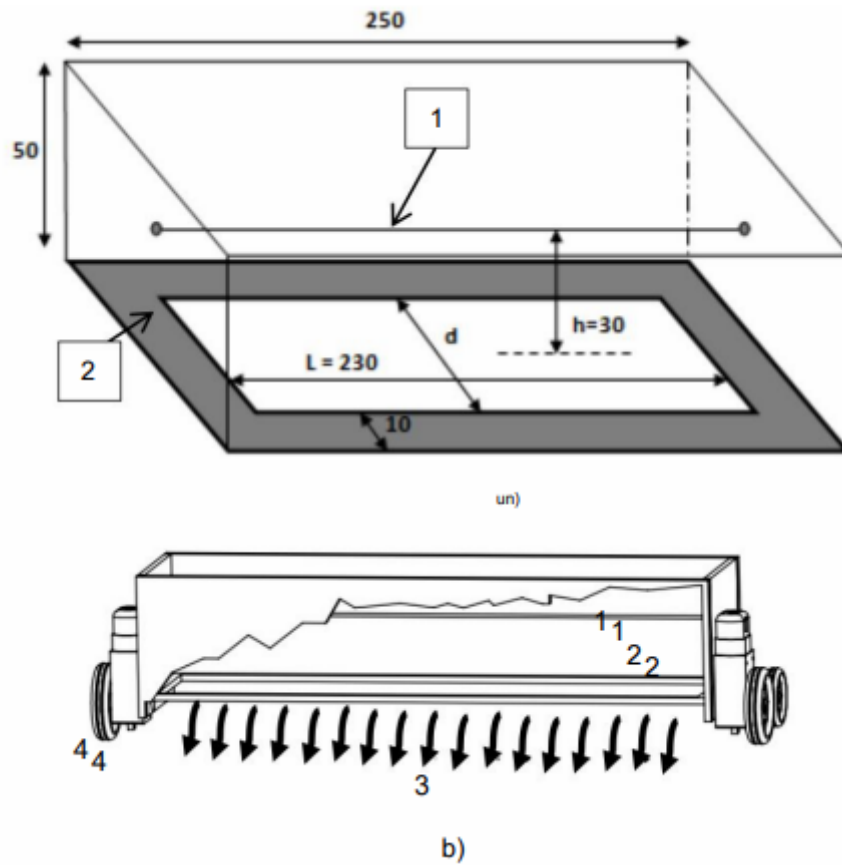
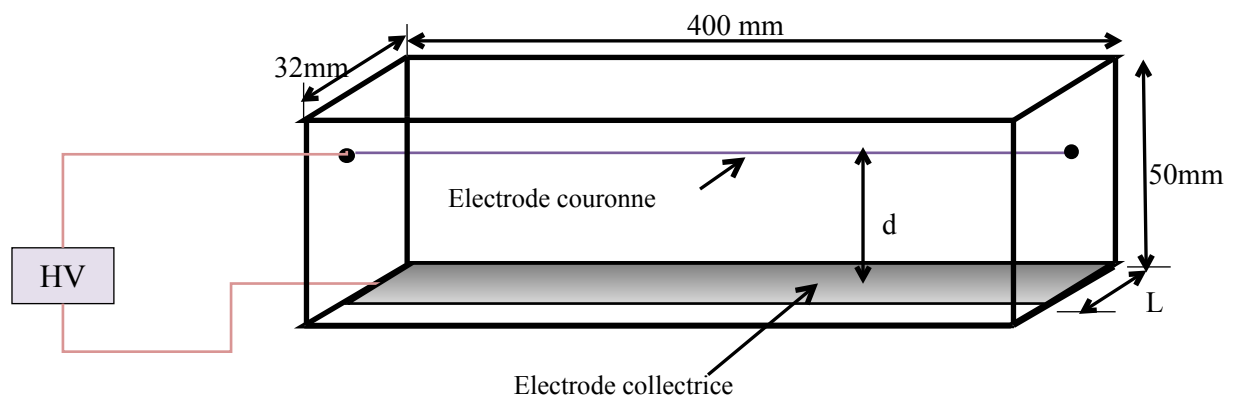


Figure III. 10 : Schéma descriptif de la Configuration fil/rectangle [97].

III.4.1.2 Configuration fil/plaque

La Figure III.11 illustre la configuration de l'appareil de nettoyage par vent ionique proposé (fil-plaque). L'actionneur est composé d'un fil de 0,1 mm de diamètre (comme électrode active) et d'une plaque en acier reliée à la terre (comme électrode passive). La longueur de la plaque est de 400 mm et sa largeur est variable, notée "L". Le fil de l'électrode active est situé au-dessus de la plaque à une distance "d" [96].



(a)



(b)

Figure III. 11 : Schéma descriptif de la configuration fil/plaque. (a) actionneur de vent, (b) actionneur + véhicule.

III.5 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU DISPOSITIF DE NETTOYAGE

Pour la création du vent électrique utilisé pour le nettoyage des panneaux solaires, un actionneur est nécessaire, équipé d'un cadre métallique ou d'une plaque qui canalise le flux d'air à travers une petite ouverture située en bas de cet actionneur (Figure III.12). Cette petite ouverture forme un espace étroit entre le dispositif et la surface du panneau, permettant au vent ionique de passer. L'actionneur présente une forme parallélépipédique en plastique PVC et contient deux ouvertures de largeur différente, situées respectivement sur les côtés supérieur et inférieur. La partie supérieure de l'actionneur permet à l'air d'entrer, tandis que l'ouverture inférieure permet à l'air de s'échapper. L'étude de la variation de la distance inter-électrodes et de la largeur de l'électrode reliée à la terre présente plusieurs configurations pour analyser les effets de ces paramètres sur l'efficacité du nettoyage.

Le dispositif de nettoyage se déplace à l'aide d'un véhicule équipé de moteurs pas à pas, contrôlés par une carte de commande « Arduino », et de roues additionnelles pour faciliter le mouvement de l'appareil. Le déplacement se fait de manière linéaire le long du panneau (Figure III.13). Grâce au vent généré à la surface du panneau solaire, le dispositif déplace la poussière de sable dans une direction longitudinale. Ce mouvement ressemble à celui d'un balai, permettant de nettoyer le panneau solaire sans contact direct avec la surface.

Une fois le dispositif arrivé à l'extrémité du panneau, il s'arrête, puis revient à sa position initiale. Il peut ensuite être réactivé plusieurs fois pour effectuer d'autres passages et

éliminer la poussière restante. L'utilisation de deux rails situés aux extrémités du panneau solaire est nécessaire pour assurer le déplacement précis du dispositif de nettoyage.

Les charges électriques engendrées par la décharge couronne sont orientées vers l'électrode mise à la terre suivant les lignes de champ. Ainsi, ces charges ne pénètrent pas dans les particules de sable, ce qui signifie que ces particules demeurent non chargées pendant le processus de nettoyage.

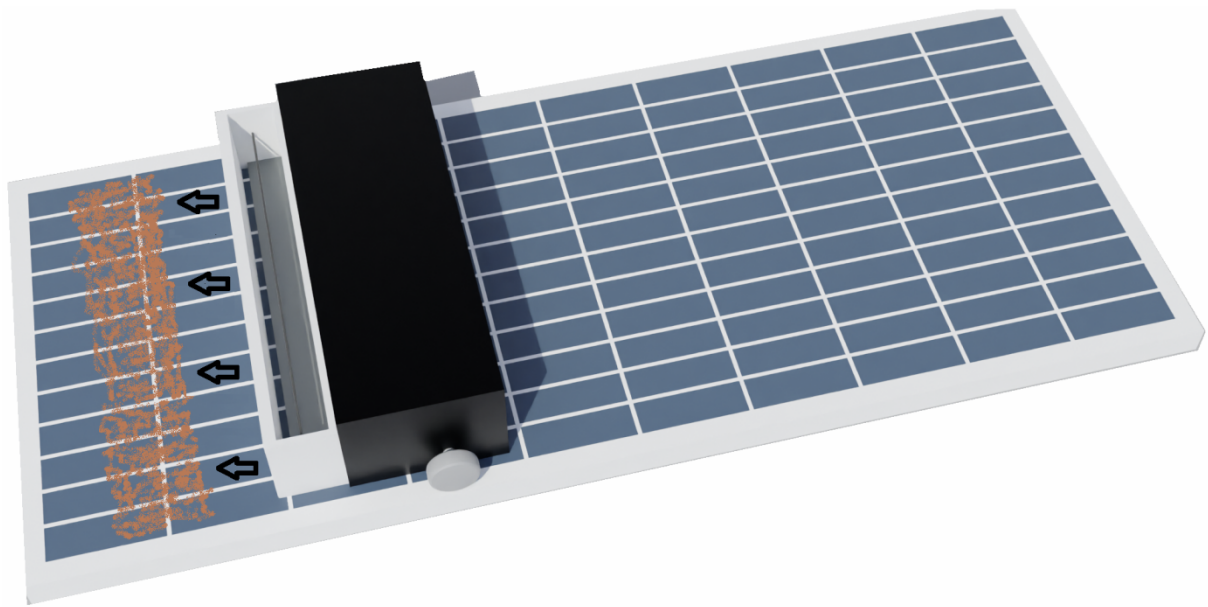


Figure III. 12 : Schéma descriptif du Principe de fonctionnement du dispositif « Configuration Fil/Plaque » [96].

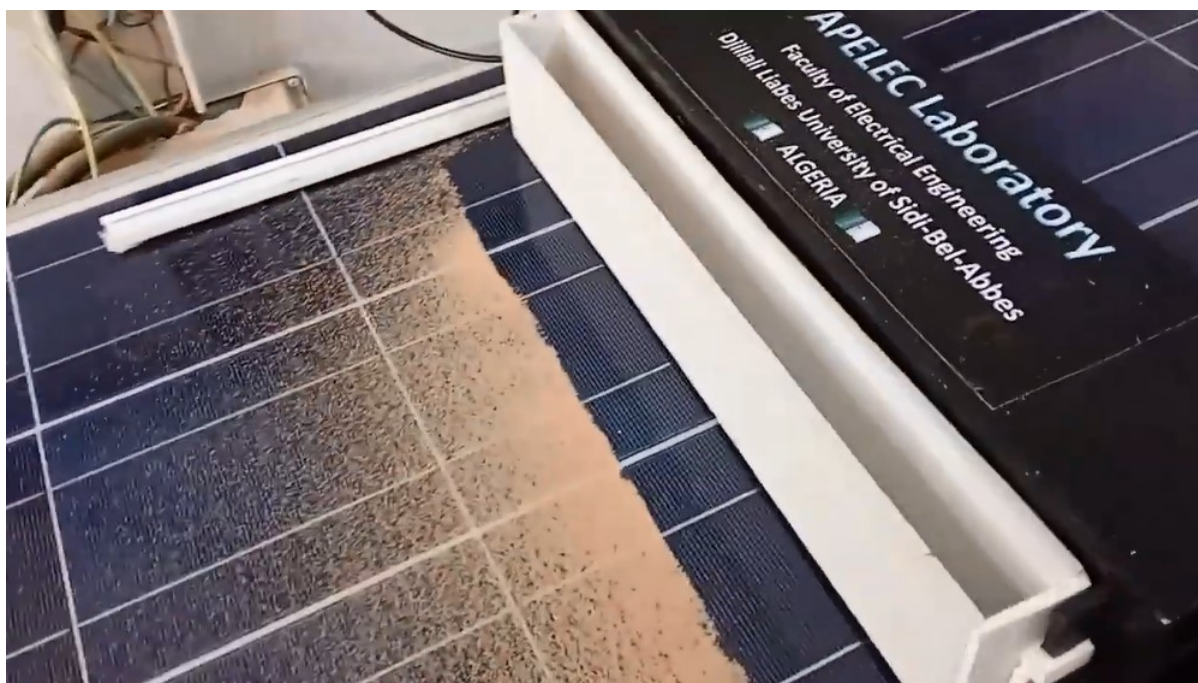


Figure III. 13 : Photographie descriptif de l'opération de nettoyage [98].

III.6 PROCEDURE EXPERIMENTALE

Au début de chaque expérience, la poussière a été répartie manuellement sur la surface du panneau solaire à l'aide d'un tamis à maille de 500 μm . La zone de dépôt, d'une superficie de 30 x 16 cm^2 ou 30 x 15 cm^2 (selon la configuration), était délimitée par un cadre rectangulaire de dimensions similaires. Afin d'assurer la cohérence des résultats, 3 g de sable ont été déposés pour les configurations fil/rectangle et 5 g pour la configuration fil/plaque, ce qui correspond à une densité de 6,25 mg/cm^2 pour chaque expérience. Avant chaque essai, il était essentiel de nettoyer soigneusement la surface du panneau à l'aide d'une brosse. Il convient de souligner que toutes les expériences ont été réalisées avec les panneaux installés horizontalement, sans angle d'inclinaison.

Les échantillons de sable utilisés dans cette étude ont été prélevés à Ouargla, une ville située dans le Sahara algérien. La taille des particules de poussière a été mesurée à l'aide d'un granulomètre laser « Fritsch, Analyseur 22 », ce qui a permis d'obtenir une taille moyenne de 484,1 μm . Par ailleurs, une analyse de la composition chimique des particules a été réalisée à l'aide d'un spectromètre à rayons X (M4 Tornado), et il a été constaté que la silice constituait plus de 87 % de la composition totale.

III.6.1 Procédure de déroulement des expériences de mesure du courant ou de puissance

Une étude a été réalisée sur la décharge couronne, en évaluant le courant consommé par l'actionneur dans la configuration fil/rectangle pour les deux polarités, positive et négative. En outre, la puissance consommée a été étudiée en fonction de la tension pour la configuration fil/plaque en polarité négative. Pour mesurer le courant généré, un microampèremètre a été utilisé, tandis que la valeur de la tension était affichée sur l'écran du générateur haute tension. Les essais ont été réalisés avec une augmentation progressive de la tension, jusqu'à atteindre la tension de claquage pour toutes les configurations.

III.6.2 Procédure de déroulement des expériences de mesure de la vitesse du vent

Afin d'évaluer la vitesse du vent électrique, un anémomètre à fil chaud a été placé sous l'actionneur, avec le capteur positionné près de l'ouverture par laquelle le vent ionique s'échappe. Les essais de mesure de la vitesse du vent ont été réalisés en augmentant progressivement la tension, depuis la tension d'apparition de la décharge couronne jusqu'à atteindre la tension de claquage.

III.6.3 Procédure de déroulement des expériences de mesure de l'efficacité

Des expériences ont été réalisées pour évaluer l'efficacité du nettoyage en dispersant de la poussière de sable sur un panneau solaire. Lors de chaque essai, une quantité homogène de sable (3g ou 5g, selon la configuration) a été répartie sur une zone spécifique de la surface du panneau (30 x 16 cm² ou 30 x 15 cm², selon la configuration). Des expériences de nettoyage ont été effectuées pour différentes configurations. Après chaque essai de nettoyage, la quantité de sable restant sur le panneau a été mesurée, puis la masse nettoyée a été calculée.

Le rapport suivant explique la méthode de calcul de l'efficacité du nettoyage :

$$M_0 = M_T - M_R \quad (\text{III.1})$$

$$M_0 / M_T \times 100 \quad (\text{III.2})$$

M_0 : la masse de poussière enlevée

M_T : la masse de poussière totale versée sur la surface du panneau

M_R : la masse restante

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les matériels et les appareils de mesure utilisés dans les différents essais de nettoyage, ensuite une description du nouveau dispositif de nettoyage par procédé électrostatique avec les deux configurations développées, De plus, une explication du principe de fonctionnement ainsi que les techniques expérimentales utilisées pour mesurer le courant ou la puissance, la vitesse du vent ionique et l'efficacité de nettoyage pour les deux configurations développées.

L'étude et les résultats expérimentaux paramétriques de procédé de nettoyage électrostatique seront abordés dans le prochain chapitre.

CHAPITRE VI

ETUDE EXPERIMENTAL

**PARAMETRIQUE DE PROCEDE DE
NETTOYAGE ELECTROSTATIQUE**

IV. ETUDE EXPERIMENTAL PARAMETRIQUE DE PROCEDE DE NETTOYAGE ELECTROSTATIQUE

Introduction

Dans ce chapitre, nous aborderons l'analyse expérimentale paramétrique du dispositif de nettoyage électrostatique pour les deux configurations fil/rectangle, et fil/plaque. L'objectif des expériences est de déterminer comment les divers paramètres tels que la tension, la vitesse du vent et la vitesse de déplacement du véhicule influencent le processus de nettoyage des panneaux solaires. La relation interconnectée entre tous ces paramètres peut déterminer les caractéristiques optimales pour une meilleure efficacité de nettoyage.

IV.1 ANALYSE DE L'EFFICACITE DE NETTOYAGE

IV.1.1 Configuration Fil/Rectangle :

Dans cette partie nous avons analysés l'efficacité de nettoyage en fonction de la tension appliquée de polarité positive et polarité négative et en fonction de la vitesse de véhicule, mais avant tout ça nous avons commencé par voir les caractéristiques du courant électrique consommé et la vitesse du vent en fonction de la tension appliquée de polarité positive et polarité négative pour la configuration Fil/Rectangle

IV.1.1.1 Caractéristiques du courant électrique

Dans cet essai, On a réalisé une étude sur la décharge couronne en évaluant le courant consommé par l'actionneur de nettoyage en fonction de la tension en polarité positive et en polarité négative. Les essais ont été effectués avec une augmentation progressive de la tension depuis la tension d'apparition de la décharge couronne jusqu'à atteindre la tension de claquage pour trois valeurs différentes de la largeur d'ouverture de rectangle ($d = 1 \text{ cm}$, $d = 3 \text{ cm}$ et $d = 5 \text{ cm}$).

La Figure IV.1 présente les caractéristiques courant-tension $I(V)$ pour les polarités positives et négatives. Au début on observe une augmentation significative du courant électrique en polarité négative par rapport à celui en polarité positive à cause de la mobilité des charges, qui est élevée en polarité négative. Comme il est bien connu, les ions négatifs sont les principaux porteurs de charge en polarité négative, tandis que les ions positifs sont les porteurs de charge en polarité positive. L'interaction avec les matériaux environnants est une distinction majeure entre la décharge couronne positive et la décharge couronne négative. La couronne positive a tendance à générer davantage d'ozone que la décharge négative qui provoque l'oxydation des matériaux voisins, ce qui entraîne des implications sur les performances et la durée de vie de l'appareil et leurs accessoires.

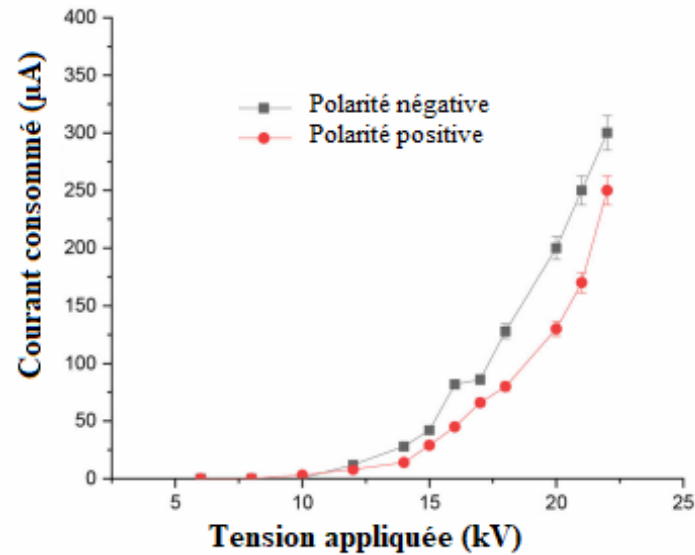


Figure IV. 1 : Caractéristique courant-tension de la décharge couronne en polarité positive et en négative pour $d=1$ cm

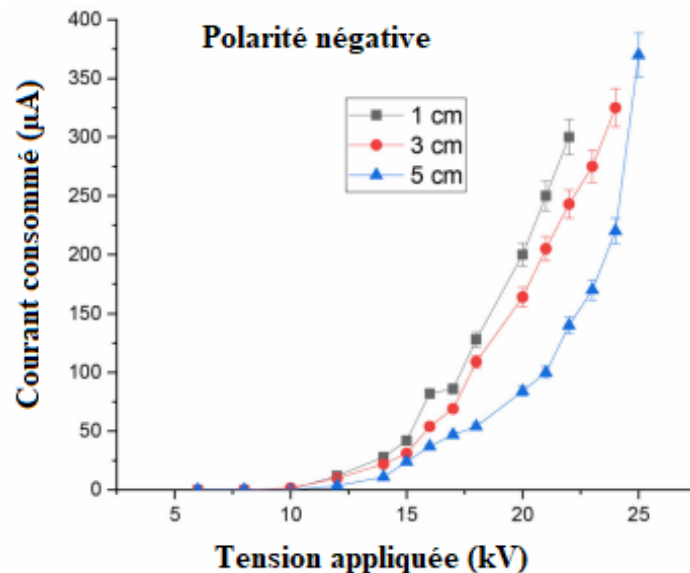


Figure IV. 2 : Caractéristique courant-tension de la décharge couronne en polarité négative pour trois largeurs d'ouverture ($d = 1$ cm, $d = 3$ cm et $d = 5$ cm).

IV.1.1.2 Caractéristiques de la vitesse du vent

Au cours de cette expérience, On a mesuré la vitesse du vent ionique généré par l'actionneur de nettoyage au niveau de la petite ouverture en bas de l'actionneur dans les deux polarités positive et négative et pour les trois valeurs de la largeur d'ouverture ($d = 1$ cm, $d = 3$ cm, et $d = 5$ cm).

La Figure IV.3 présente une corrélation quasi linéaire entre la tension et la vitesse du vent, pour les polarités positives et négatives. En appliquant une tension de 23 kV, la polarité négative génère une vitesse du vent de 1,6 m/s et la polarité positive produit une vitesse légèrement moins de 1,4 m/s. Toutefois, il est important de souligner que les expériences ont

prouvé que l'emploi de la polarité négative est nettement plus efficace par rapport à la polarité positive, car elle permet d'appliquer des tensions plus élevées sans risque de claquage. En outre, le vent électrique est déclenché par une tension d'apparition de la décharge de 14 kV, avec une augmentation rapide de la vitesse du vent, passant de zéro à environ 0,6 m/s en polarité négative et 0,2 m/s pour la polarité positive.

La polarité de la tension appliquée a un impact sur le mouvement du vent ionique dans la décharge couronne. Plus spécifiquement, une tension positive provoque la formation d'un vent par le transfert des charges (entre les ions positifs et les particules neutres). Par contre, la décharge négative entraîne la formation d'un vent résultant du transfert (entre les ions négatifs et les particules neutres). Donc, la vitesse du vent électrique est influencée par la polarité de la décharge couronne (elle est influencée par les différentes particules qui participent à sa production).

La relation entre la vitesse du vent ionique et la tension en polarité négative est présentée dans la Figure IV.4 pour trois distances d'ouverture du rectangle "d". Nous avons trouvé que lorsque la tension appliquée est de 17,5 kV, la vitesse du vent ionique diminue à mesure que la distance d'ouverture "d" augmente, ce qui indique que le courant est plus grand à des distances d'ouverture plus petite, comme il est démontré dans la Figure IV.2. En raison de la densité des lignes de courant de la décharge couronne, les valeurs de courant sont plus importantes pour de distances "d" réduite car elles sont concentrées dans un intervalle plus court que pour les grandes valeurs.

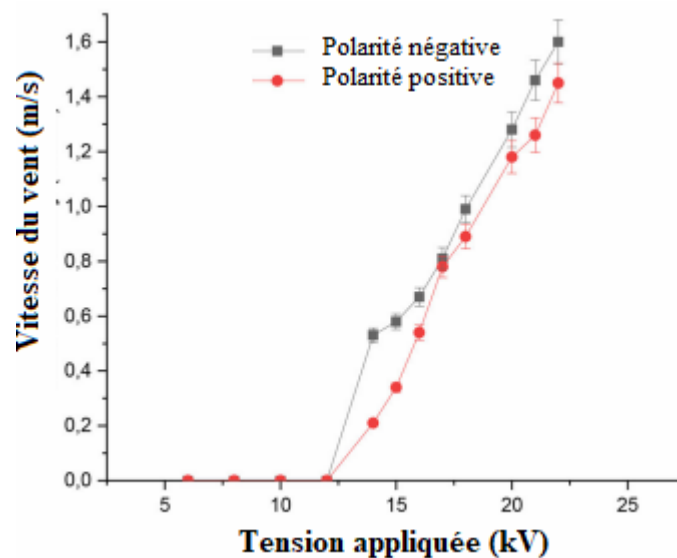


Figure IV. 3 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique en fonction de la tension en polarité négative et en positive pour $d=1$ cm.

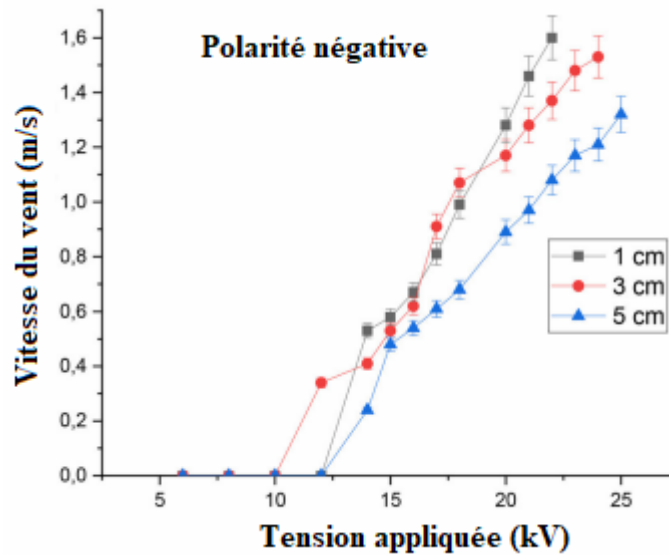


Figure IV. 4 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique en fonction de la tension en polarité négative pour trois valeurs différentes de la distance d'ouverture ($d = 1, 3$ et 5 cm).

IV.1.1.3 Caractéristiques de l'efficacité

Dans cette configuration, des essais ont été réalisés pour évaluer l'efficacité du nettoyage. Pour chaque essai, on a réparti de manière homogène 3g de sable sur une zone spécifique sur la surface du panneau de $30 \times 15 \text{ cm}^2$. Nous avons effectué des expériences de nettoyage pour trois configurations de différentes largeurs d'ouverture du rectangle.

La Figure IV.5 illustre comment le panneau solaire peut être nettoyé efficacement pour les deux polarités, en utilisant trois niveaux de tension différents (15, 20 et 25 kV) et avec une vitesse de déplacement de l'actionneur fixée de 0,7 cm/s.

Selon les tests réalisés sur des échantillons de poussière de sable pour évaluer l'efficacité du nettoyage, l'actionneur à vent électrique a démontré une grande efficacité dans l'élimination des particules de poussière, atteignant un taux de nettoyage du panneau solaire supérieur à 95 %. En raison du courant électrique élevé en polarité négative, le processus de nettoyage s'est révélé plus performant.

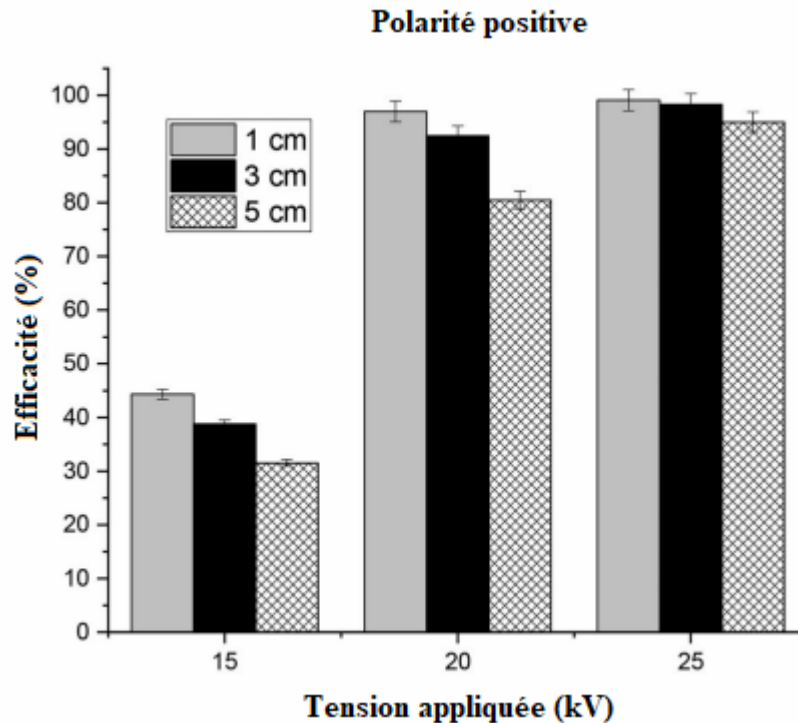
L'efficacité de nettoyage est particulièrement élevée pour les petites distances d'ouverture, grâce à la grande vitesse du vent, comme le montre la Figure IV.5, dans la configuration avec une petite distance d'ouverture.

Il est important de souligner que ce résultat a été obtenu après un seul balayage ou dépoussiérage du panneau solaire, avec une efficacité proche de 100 % lors d'un deuxième balayage similaire.

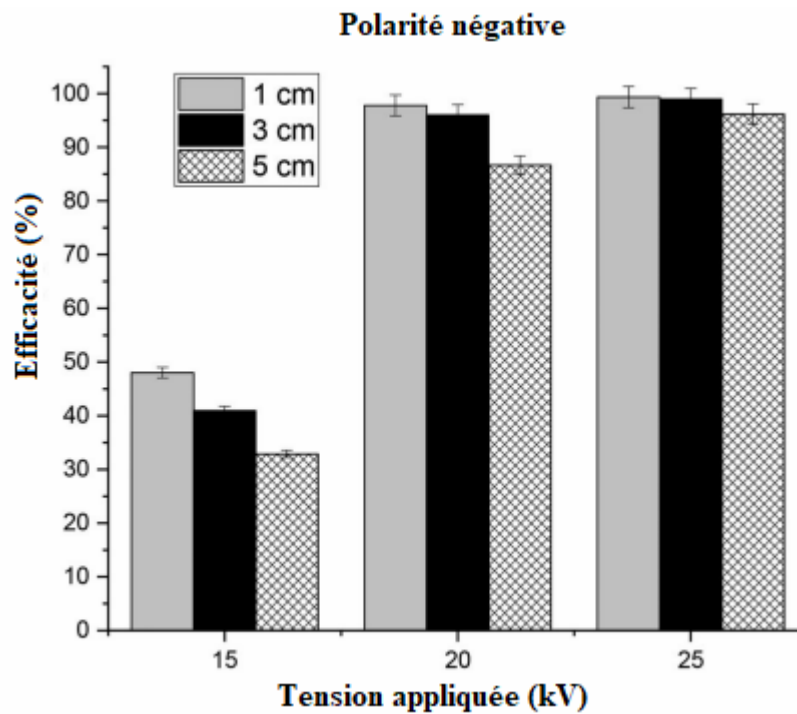
Les résultats présentés dans la Figure IV.6 montrent l'impact de la vitesse de l'actionneur sur l'efficacité du nettoyage pour deux valeurs de tension distinctes (20 kV et 25 kV). Selon ces résultats, l'opération de nettoyage est plus performante à des vitesses

d'actionneur plus faibles, car un temps de nettoyage plus long permet un dépoussiérage plus efficace du panneau solaire.

Cette étude a déterminé que la vitesse optimale est de 0,7 cm/s, correspondant à un temps de nettoyage d'environ 140 secondes pour une longueur de panneau solaire de 1 mètre.



a)



b)

Figure IV. 5 : Caractéristique de l'efficacité de nettoyage pour les tensions appliquées (15, 20, et 25 kV) et trois distances d'ouverture d pour ($V_a = 0,7$ cm/s), a) polarité positive, et b) polarité négative.

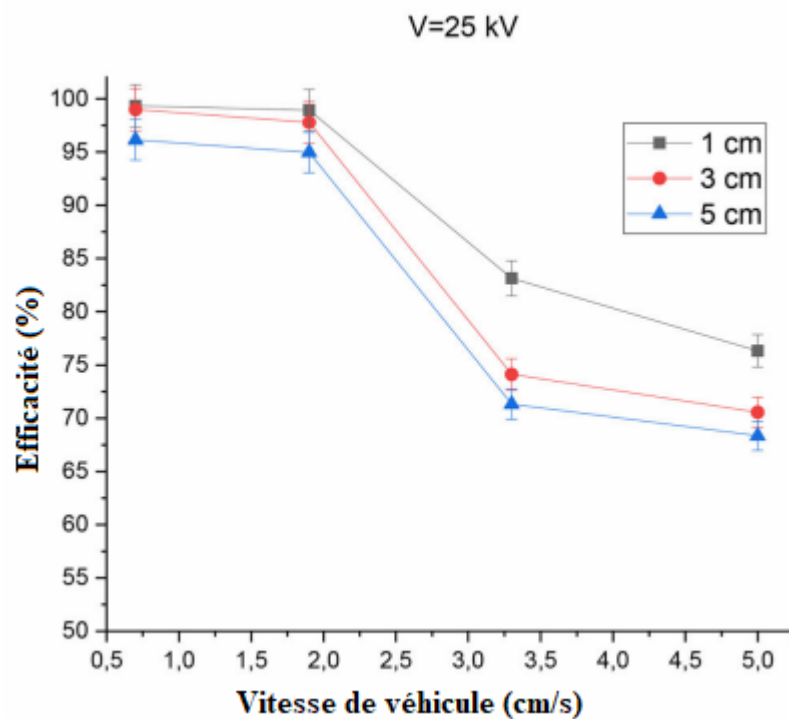
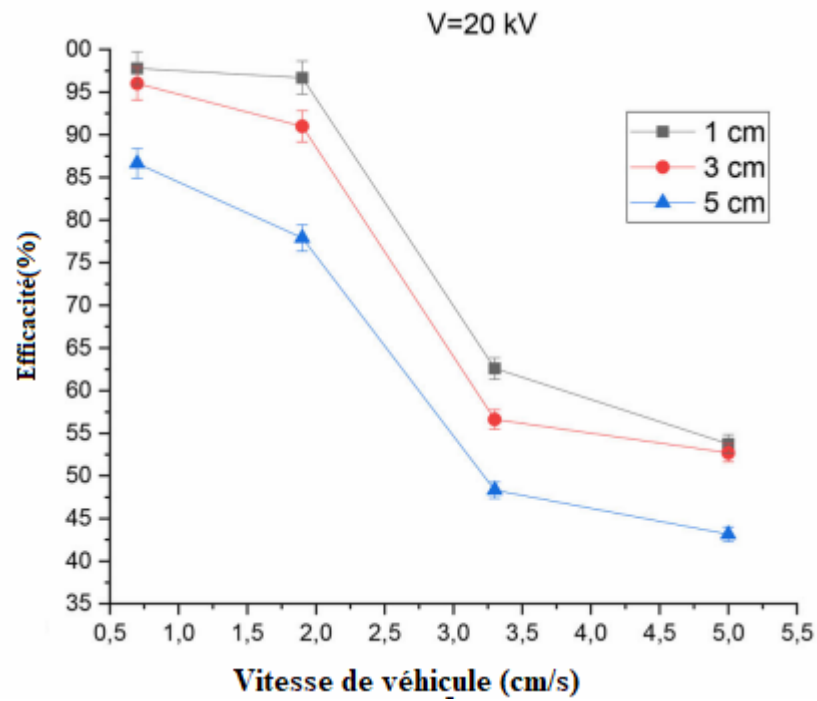


Figure IV. 6 : Caractéristique de l'efficacité de nettoyage en fonction de la vitesse de dispositif pour trois distances d'ouverture ($d = 1, 3$ et 5 cm) avec polarité négative, a) $V=20$ kV, et b) $V=25$ kV.

IV.1.2 CONFIGURATION FIL/PLAQUE

IV.1.2.1 Caractéristiques de la puissance électrique

Pour cette configuration fil/plaque, nous avons réalisé une étude sur la décharge couronne en évaluant la puissance consommée en fonction de la tension appliquée pour la polarité négative. Les essais ont été effectués pour différentes distances entre les électrodes ($d = 20 \text{ mm}$, 30 mm et 40 mm) et pour deux valeurs de largeur de la plaque ($L = 20 \text{ mm}$ et $L = 30 \text{ mm}$).

- **Effet de l'écart inter-électrodes sur la puissance consommée :**

Selon la Figure IV.7, l'augmentation de l'écart inter-électrodes de 20 mm à 40 mm entraîne une hausse de la tension d'apparition, de la tension de claquage et de la puissance maximale de l'actionneur au voisinage de la tension de claquage. Il a été observé que la distance inter-électrodes influence l'intensité du champ électrique, ce qui impacte directement la tension d'apparition de la décharge couronne, la tension de claquage et la consommation de puissance électrique de l'actionneur.

En outre, il est constaté qu'à tension constante, la puissance électrique diminue à mesure que l'écart inter-électrodes augmente. Cela s'explique par la diminution de la densité de charge entre les électrodes lorsque la distance s'accroît.

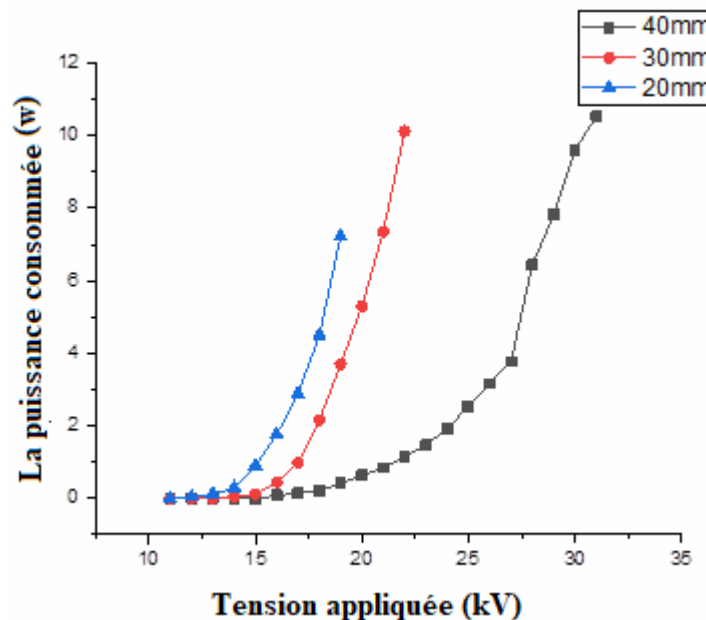


Figure IV. 7 : Variation de la puissance en fonction de l'écart inter-électrodes ($d = 20, 30$ et 40 mm)

- **Effet de la largeur des plaques sur la puissance consommée :**

La Figure IV.8 montre l'impact de la largeur de la "plaque" sur la puissance consommée. La variation de cette largeur influence l'intensité du champ électrique, ce qui se répercute sur la puissance de l'actionneur.

Il est observé que la puissance consommée pour une largeur de plaque plus élevée et pour une tension proche de la tension de claquage, dépasse celle correspondant à $L = 2$ cm. Cette différence s'explique par l'accroissement du courant circulant dans la plaque, entraînant une augmentation de la densité de charge dans la zone de collecte des ions. Cette densité croît proportionnellement à la surface de l'électrode collectrice (plaque).

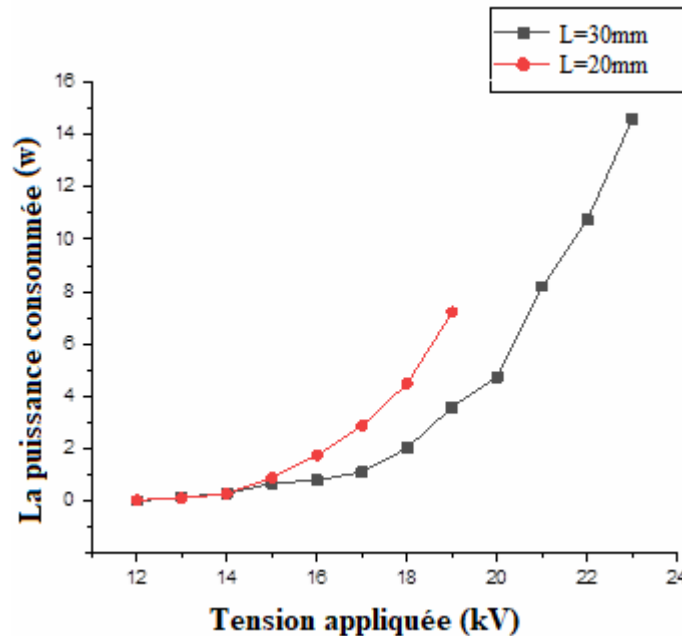


Figure IV. 8 : Influence de la largeur de plaque sur la puissance consommée pour ($L=20$ mm et 30 mm)

IV.1.2.2 Caractéristiques de la vitesse du vent en fonction de la tension :

Afin d'évaluer la vitesse du vent ionique, nous avons placé un anémomètre à fil chaud Benetech GM8903, équipé d'un enregistreur de données, sous l'actionneur, à l'emplacement où le vent électrique s'échappe. Nous avons mesuré la vitesse du vent pour trois distances inter-électrodes différentes ($d = 20, 30$ et 40 mm) et pour deux valeurs de largeur de plaque ($L = 20$ mm et $L = 30$ mm).

• Effet de l'écart entre les électrodes sur la vitesse du vent ionique :

Les résultats des tests sur le vent ionique pour différents écarts inter-électrodes sont présentés dans la Figure IV.9. Nous avons observé une augmentation de la vitesse du vent lorsque l'intensité du champ électrique croît avec l'augmentation de la tension. La meilleure performance est obtenue pour une distance inter-électrodes de seulement 20 mm, qui génère une vitesse du vent bien supérieure à celles obtenues pour $d = 30$ mm et $d = 40$ mm.

Lorsque la tension reste constante, la vitesse du vent ionique diminue à mesure que l'écart inter-électrodes augmente, ce qui reflète une baisse de la densité de charge dans l'espace. Cependant, la distance inter-électrodes influence l'intensité du champ électrique, ce qui, à son tour, affecte la vitesse du vent générée par l'actionneur.

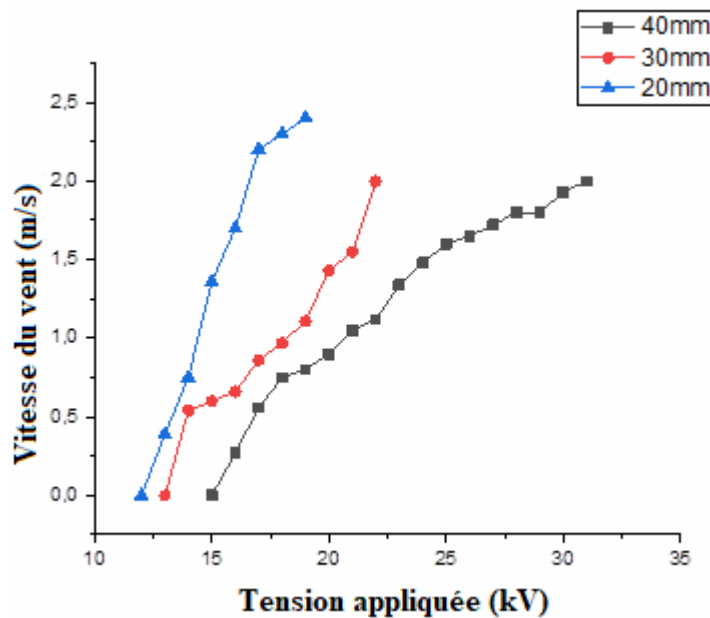


Figure IV. 9 : Caractéristique de la vitesse du vent ionique pour les différents écarts d'électrodes (d=20, 30 et 40 mm)

- **Effet de la largeur de la plaque sur la vitesse du vent ionique :**

Dans cette section, nous analysons la fluctuation de la vitesse du vent ionique en fonction de la tension, pour deux valeurs de largeur de plaque. La Figure IV.10 montre clairement que, pour une tension maximale de 23 kV (proche de la tension de claquage), la vitesse du vent atteint 2,45 m/s lorsque la largeur de la plaque est de 30 mm.

Cela implique qu'une augmentation de la largeur de la plaque réduit la distance d'ouverture par laquelle le vent s'échappe, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse du vent par effet Venturi. Enfin, la configuration optimale, générant le vent le plus efficace, est celle avec une largeur de plaque de 30 mm.

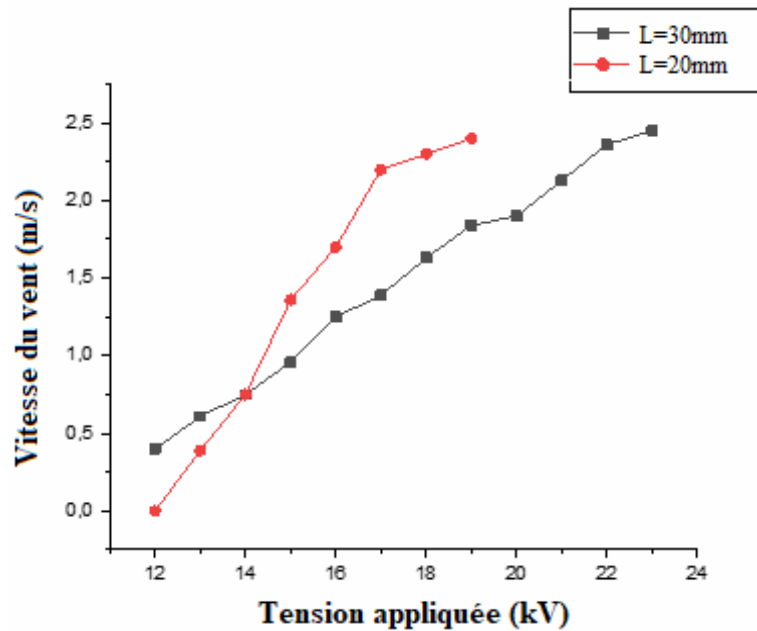


Figure IV. 10 : Influence de la largeur de plaques sur la variation de la vitesse du vent pour (L=20 mm et 30).

IV.1.2.3 Caractéristiques de l'efficacité

L'efficacité de nettoyage du panneau solaire photovoltaïque varie en fonction des niveaux de tension et des vitesses de déplacement du dispositif : 0,273 cm/s et 0,815 cm/s pour deux actionneurs à configuration fil/plaque, avec des largeurs de plaque différentes, à savoir $L = 20$ mm et $L = 30$ mm. Les meilleures performances de nettoyage ont été obtenues pour des tensions proches de la tension de claquage.

Comme le montre la Figure IV.11, pour une largeur de plaque de 30 mm, les caractéristiques de l'efficacité de nettoyage approchent les 100 %, ce qui correspond au maximum, en accord avec les résultats précédemment obtenus concernant la puissance consommée et la vitesse du vent ionique. En revanche, pour une largeur de plaque de $L = 20$ mm, l'efficacité de nettoyage est de seulement 68 %, ce qui est inférieur à celle obtenue pour la largeur de 30 mm. Cela peut être expliqué par l'effet Venturi, qui augmente la vitesse du vent et, par conséquent, l'efficacité de nettoyage pour des petites distances d'ouverture de l'actionneur.

Selon la Figure IV.12, l'efficacité du nettoyage est influencée par la variation de la vitesse de l'appareil de nettoyage. Les meilleurs résultats en termes de nettoyage sont obtenus à des vitesses de déplacement plus faibles. Il est observé que, lorsqu'on approche de la tension de claquage de 24 kV, une diminution de la vitesse de déplacement de 0,815 à 0,273 cm/s entraîne une augmentation de l'efficacité de nettoyage de 98 % à 99,8 %. De plus, pour une tension de 16 kV, avec les mêmes vitesses précédentes, on observe une augmentation de l'efficacité de nettoyage de 21 % à 42,8 %. L'augmentation de la vitesse de déplacement entraîne une baisse de l'efficacité du nettoyage en raison de la réduction du temps de

nettoyage. Enfin, l'efficacité de nettoyage optimale a été obtenue à la vitesse la plus lente, soit $V = 0,273 \text{ cm/s}$.

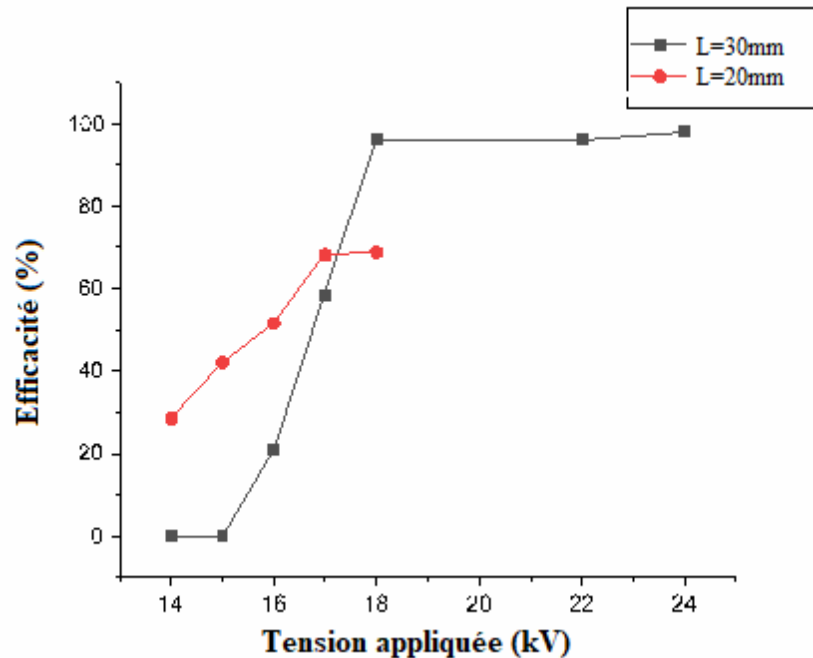


Figure IV. 11 : Caractéristique de l'efficacité du nettoyage des panneaux solaires en fonction de la tension pour deux valeurs de largeurs de plaques ($L=20 \text{ mm}$ et 30 mm).

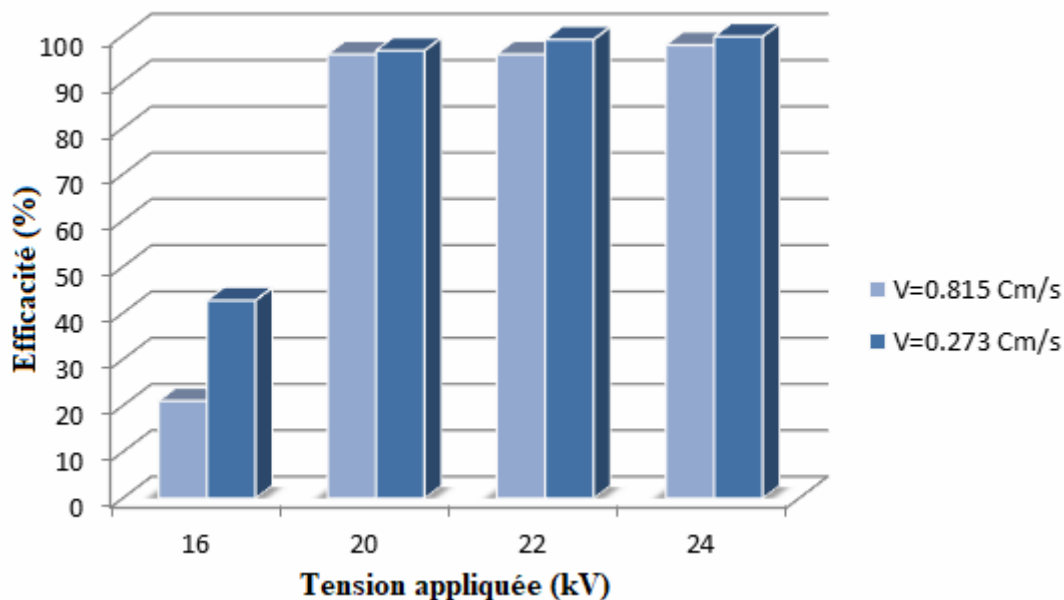


Figure IV. 12 : L'efficacité de dispositif de nettoyage pour deux vitesses de déplacement en fonction de la tension (pour $L= 30 \text{ mm}$)

Conclusion

Les performances de ce nouvel appareil de nettoyage électrostatique par vent ionique ont démontré son efficacité dans le nettoyage des particules de sable. D'un autre côté, il a été

démontré que la configuration fil/plaque a donné les meilleurs résultats de nettoyage, avec une efficacité atteignant 99 % avec une vitesse du vent de 2,45 m/s. Par ailleurs, il a été constaté que pour la configuration fil/rectangle, la polarité négative offre des résultats plus performants en raison d'un courant de décharge couronne plus élevé par rapport à la polarité positive qui a conduit à une vitesse de vent plus élevée. En outre, le nettoyage est optimal pour les actionneurs qui se déplacent à des vitesses de déplacement plus lentes.

Dans le prochain chapitre, nous aborderons la modélisation d'une nouvelle configuration lame à pointes/Tubes qui nous a donné une vitesse de vent optimale pour l'application des procédés de nettoyage des panneaux solaires en utilisant la méthode des plans d'expériences.

CHAPITRE V

MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE NETTOYAGE

V. MODELISATION ET OPTIMISATION DU PROCEDE DE NETTOYAGE

Introduction

La théorie des plans d'expérience est utilisée pour définir le nombre d'expériences à réaliser en fonction d'un objectif précis, afin d'analyser simultanément plusieurs facteurs, de réduire la dispersion liée aux mesures, d'évaluer les effets de couplage entre les facteurs, et finalement, il convient d'évaluer les impacts des différents facteurs et leurs interactions. Plusieurs publications ont abordé l'utilisation de cette approche dans les domaines de l'électricité et d'électrostatique. Les principes fondamentaux de la modélisation expérimentale du dispositif de nettoyage électrostatique sont présentés à travers l'utilisation du logiciel MODDE 5.0 [99].

L'objectif de ce chapitre est la modélisation expérimentale d'un actionneur de vent ionique pour un dispositif de nettoyage électrostatique avec la configuration Lame à pointes/Tubes. Nous avons utilisé le logiciel MODDE.5 pour élaborer et optimiser ce dispositif, afin d'analyser trois facteurs (Tension, Distance inter-électrodes, et la Distance inter-tubes) et d'évaluer l'influence entre ces facteurs et leurs interactions, afin de déterminer le meilleur point de fonctionnement pour un nettoyage optimal.

V.1 Concepts fondamentaux

V.1.1 Facteurs, réponses et interactions

Les chercheurs doivent fréquemment saisir la réaction d'un système en fonction des éléments ou facteurs qui pourraient le modifier. Afin de mettre en évidence cette évolution, il mesure et évalue une réponse et tente ensuite d'établir des liens de cause à effet entre les différentes réponses et les facteurs, comme illustré dans la figure V.1 [100].

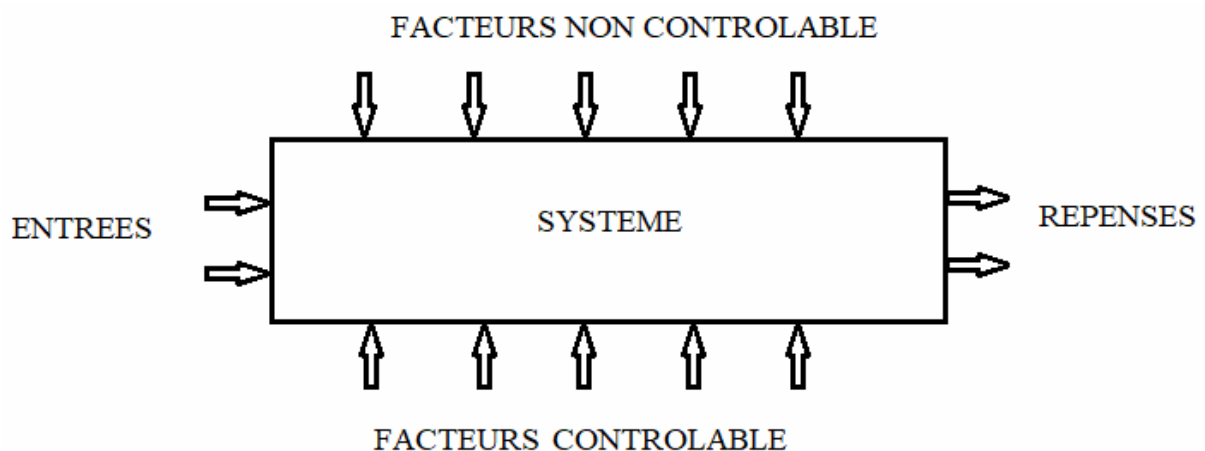


Figure V. 1: Environnement du système. [100]

V.1.1.1 Un facteur :

C'est une grandeur qui est dans la plupart des cas mesurable, On peut distinguer parmi les facteurs :

- **Les facteurs qui peuvent être contrôlés** : ce sont les éléments qui sont directement influencés par le choix du technicien (Tension, Distance...)
- **Les facteurs qui ne peuvent pas être contrôlés** : ce sont ceux qui diffèrent indépendamment de la décision du technicien (Température, Humidité...).

V.1.1.2 Une réponse :

Il s'agit de la mesure de la grandeur à chaque essai ; le plan a pour objectif de déterminer les facteurs qui l'influencent ou son évolution en fonction de ces facteurs.

V.1.1.3 L'interaction :

L'interaction entre deux facteurs d'entrée est une notion essentielle. L'interaction entre deux facteurs A et B se produit lorsque l'impact du facteur A sur la réponse sera influencé par la valeur du facteur B. [100]

La structure mathématique des phénomènes étudiés est la suivante :

$$Y = (U_{ij}) \quad (V.1)$$

Où :

- ✓ Y est la réponse dont l'expérimentateur est intéressé,
- ✓ U_{ij} : les facteurs qui ont un impact sur un phénomène.
- ✓ F : fonction mathématique qui permet de prédire les fluctuations de la réponse en fonction des valeurs données aux U_{ij} . En général, c'est un polynôme de premier ou deuxième degré dans les plans d'expériences.

Lorsque l'on étudie un facteur U_{ij} , on définit toujours, en fonction des besoins de l'étude, une valeur inférieure et une valeur supérieure. Les variations du facteur sont donc limitées par deux bornes qui sont appelées niveau bas et niveau haut. On désigne le niveau bas (codé -1) par le signe (-) et le niveau haut (codé +1) par le signe (+). [101]

V.2 Les variables Codées

Afin de pouvoir comparer les "poids" des facteurs entre eux, il est préférable de ne pas prendre en compte les valeurs des variables naturelles U_{ij} qui varient en fonction des unités utilisées. Afin de résoudre cette difficulté, on se sert des valeurs des variables codées X_{ij} qui sont à l'origine du centre du domaine expérimental. Les variables codées ont des valeurs définies de la façon suivante :

$$X_{ij} = \quad (V.2)$$

Avec :

X_{ij} : c'est la valeur de la variable codée j de l'expérience i ;

U_{ij} : c'est la valeur de la variable naturelle j à l'expérience i ;

U_{0j} : c'est la valeur de la variable naturelle au centre du domaine ;

ΔU_j : la moitié de l'écart entre la valeur maximale et la valeur minimale.

La recherche de modèles mathématiques de qualité avec un effort minimal repose sur la sélection des intervalles des facteurs. On peut utiliser cette méthode de la manière suivante :

- Choix des facteurs les plus influents et intéressants.
- Des valeurs centrales, minimales et maximales de chaque facteur doivent être déterminées.
- Effectuer une matrice d'expériences comprenant tous les états envisageables et les résultats correspondants [101]

V.3 Modélisation Mathématique

Nous choisissons à priori la fonction mathématique qui relie « la réponse aux facteurs ». Le développement de la série de Taylor-Mac Laurin est limité. On suppose que les dérivées restent constantes et que le développement consiste en un polynôme de degré « plus ou moins élevé »

$$Y = a_0 + \sum a_{i.} x_i + \sum a_{ij.} x_i. x_j + \cdots + \sum a_{ii.} x_i^2 + a_{ij \dots z.} x_i. x_j \dots x_z \quad (V.3)$$

Où :

- Y : elle s'agit de la réponse ou de la grandeur de l'intérêt. On la mesure pendant l'expérimentation et on l'obtient avec une précision spécifique.
- x_i désigne le niveau attribué par l'expérimentateur au facteur i afin de réaliser un essai. Cette valeur est absolument connue. Il est même supposé que ce niveau soit établi sans erreurs (L'hypothèse classique de la régression).
- Les coefficients $a_0, a_{i.}, a_{ij.}, a_{ii.}$: sont les coefficients du modèle mathématique initialement utilisé. Ils sont inconnus et nécessitent un calcul basé sur les résultats des expériences.

L'avantage de modéliser la réponse sous forme de polynôme afin de pouvoir ensuite calculer les réponses du domaine d'étude sans avoir à effectuer des expériences. On désigne ce modèle sous le nom de "modèle a priori" ou "modèle postulé".

V.4 Avantages de la méthode de Plan d'expériences

Les avantages majeurs de cette approche incluent :

- ❖ Réduction du nombre d'essais ;

- ❖ Capacité d'analyser un large éventail de facteurs ;
- ❖ Détection d'interactions entre ces facteurs ;
- ❖ La modélisation de réponses ;
- ❖ Précision optimale des résultats.

Grâce aux plans d'expériences, il est possible d'interpréter rapidement le système étudié en donnant un modèle expérimental précis.

V.5 Les plans composites à faces centrées :

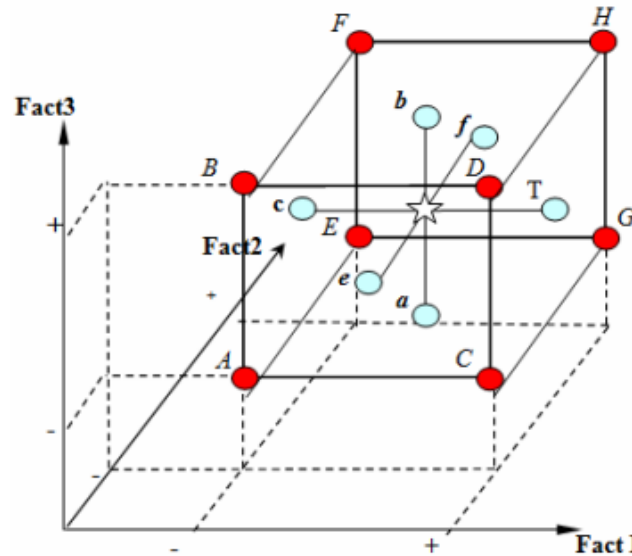
Les plans composites à faces centrées, également appelés (design of experiment), sont utilisés dans les expériences pour étudier les surfaces de réponse. L'utilisation de ce genre de dispositif expérimental permet d'évaluer les effets moyens des différents facteurs et les interactions entre eux. Quand ils sont quantitatifs, il est parfois nécessaire d'approfondir cette première approche en effectuant une étude d'optimisation. L'étude débute par un plan factoriel complet ou fractionnaire, avec des points au centre pour la vérification de la validité du modèle de premier degré. En cas de résultats positifs des tests de validation, l'étude est généralement terminée, tandis que si les tests statistiques ne sont pas adéquats, des essais supplémentaires sont effectués afin de créer un modèle du second degré. Les tests supplémentaires représentent la deuxième phase de l'étude. Des points d'expérience sont situés sur les axes de coordonnées et des points centraux nouveaux sont utilisés pour représenter ces nouveaux essais. Les points présents sur les axes de coordonnées sont désignés comme les points en étoile, comme illustré dans la figure V.2.

Les plans composites sont donc composés de trois éléments :

- **le plan factoriel** : il s'agit d'un plan factoriel complet ou fractionnaire comprenant deux niveaux par facteurs. Les éléments expérimentaux se trouvent au sommet du domaine cubique d'analyse.
- **Le plan en étoile** consiste en des points situés sur les axes et se trouvent généralement à la même distance du centre du domaine d'étude.
- **Les points au centre du domaine d'étude** : Il est toujours nécessaire d'inclure des points expérimentaux qui se trouvent au centre du domaine d'étude, que ce soit pour les plans en étoile ou les plans factoriels

n : est le nombre total d'essais à effectuer, c'est la somme des :

- Essais du plan factoriel, représentés par **n_f** ;
- Essais du plan en étoile, représentés par **n_a** ;
- Essais au centre, représentés par **n₀**.



Le nombre d'essais d'un plan composite 'n' est calculé en utilisant la relation suivante :

(V.4)

Ainsi, lorsque le domaine expérimental est déterminé en fonction des variations de k facteurs, le nombre de traitements expérimentaux suggérés par un plan composite centré est égal à :

$$n = 2^k + 2.k + n_0 \quad (V.5)$$

- 2^k : représente le nombre d'essais qui correspond au plan factoriel.
- $2k$: représente le nombre d'essais qui correspond au le plan en étoile.
- n_0 : représente le nombre d'essais au centre.

Les plans composites présentent un intérêt dans leur capacité de prendre facilement la suite du premier plan factoriel dans lequel les résultats ne sont pas bien expliqués par le modèle de premier degré. Il vous suffit de réaliser les expériences correspondantes aux points en étoile et d'effectuer les calculs sur toutes les expériences concernées. Les plans composites sont absolument adaptés pour acquérir progressivement les résultats. Il y a cinq niveaux dans un plan composite par facteur [102] :

- les 2 niveaux du plan factoriel
- les 2 niveaux des points en étoile
- Le point central.

V.6 Logiciel MODDE 5.0 :

C'est un programme Windows appelé MODDE (MODeling et DEsign), il permet de créer et d'évaluer des plans expérimentaux statistiques. Depuis les travaux pionniers de Fisher en 1926, les techniques de plans d'expériences statistiques ont connu une évolution. Box, Hunter, Scheffé, Tagushi et d'autres ont perfectionné ces méthodes afin de leur offrir une méthodologie puissante pour une expérimentation efficace.

Le logiciel permet à l'utilisateur d'analyser les résultats et de prévoir les réponses. Il évalue les valeurs des coefficients du modèle mathématique et repère les meilleures modifications des facteurs afin d'améliorer l'expérience [103].

V.7 Méthodes et résultats expérimentaux des plans d'expériences :

C'est un programme Windows appelé MODDE (MODeling et DEsign), il permet de créer et d'évaluer des plans expérimentaux statistiques. Depuis les travaux pionniers de Fisher en 1926, les techniques de plans d'expériences statistiques ont connu une évolution. Box, Hunter, Scheffé, Tagushi et d'autres ont perfectionné ces méthodes afin de leur offrir une méthodologie puissante pour une expérimentation efficace. Le logiciel permet à l'utilisateur d'analyser les résultats et de prévoir les réponses. Il évalue les valeurs des coefficients du modèle mathématique et repère les meilleures modifications des facteurs afin d'améliorer l'expérience [103].

V.8 Méthodes et résultats expérimentaux des plans d'expériences :

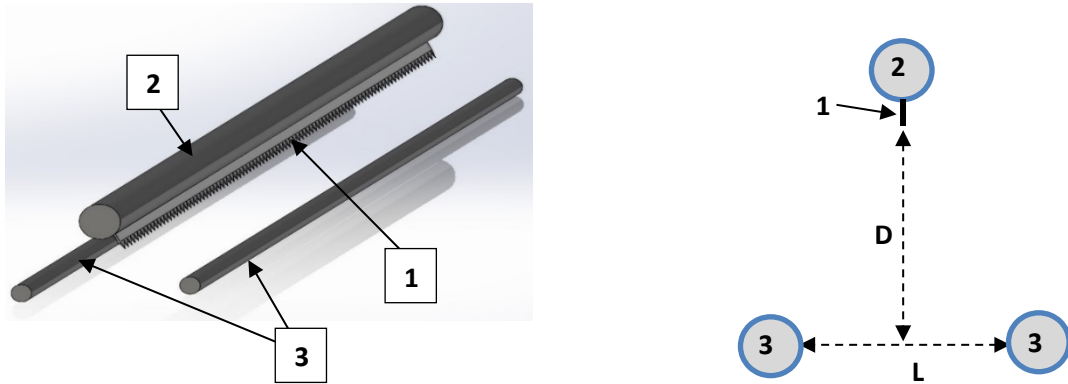
La configuration de l'actionneur étudiée ici est composée d'une électrode reliée à une haute tension, constituée d'une lame à pointe en acier inoxydable de 600 mm de long, fixée à un tube de cuivre de 20 mm de diamètre. Cette électrode est alimentée par une source de haute tension continue (40 kV, 15 mA). L'électrode de mise à la terre est formée par deux tubes de cuivre parallèles, chacun de 600 mm de long et 14 mm de diamètre, permettant au vent de traverser l'espace qui les sépare (voir Figure V.3).

Trois facteurs ont été sélectionnés comme variables d'entrée pour les tests dans le cadre du plan d'expériences composites à faces centrées, car ils impactent le processus de nettoyage électrostatique des panneaux solaires :

- La tension continue appliquée (U) [kV],
- La distance inter-électrodes (D) [cm],
- La distance inter-tubes (L) [cm].

Des expériences préliminaires ont été menées en adoptant une approche "un facteur à la fois", où deux facteurs étaient maintenus constants, tandis que le troisième variait. Les résultats de ces essais ont permis de définir les plages de variation appropriées pour chaque facteur. Ces plages ont ensuite été utilisées pour la modélisation expérimentale, en utilisant la méthodologie de conception des expériences. Un plan composite à face centrée, comprenant

17 expériences, a été réalisé, en tenant compte à la fois de la vitesse du vent ionique et de la consommation de courant comme variables de réponse.



V.8.1 Domaines de variation des facteurs étudiés

Expérience 1 : Tension variable U (12-31 kV), avec des valeurs constantes pour la distance inter-électrodes $D = 2.4$ Cm et la distance inter-tubes $L = 8$ mm.

Expérience 2 : Distance inter-électrodes variable D (1.8-2.8 Cm), avec des valeurs constantes pour la tension $U = 22$ kV et la distance inter-tubes $L = 8$ mm.

Expérience 3 : Distance inter-tubes variable L (6-16 mm), avec des valeurs constantes pour la tension $U = 30$ kV et la distance inter-électrodes $D = 2.8$ Cm.

Les Figures V.4 à V.6 illustrent respectivement les expériences préliminaires 1 à 3, et en plus la Figure V.4 illustre la variation de la consommation du courant en fonction de la tension U .

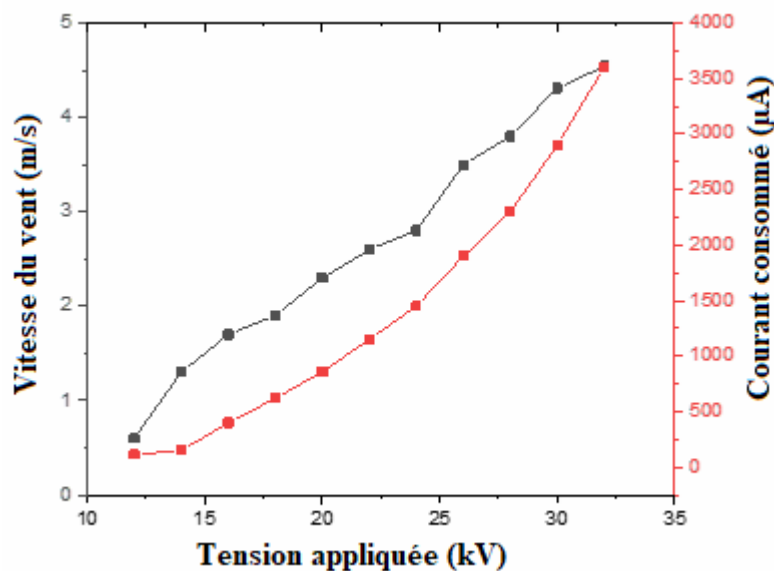


Figure V. 4 : Variation de la vitesse du vent et de la consommation de courant en fonction de la tension appliquée ($D = 2.4$ Cm, $L = 8$ mm).

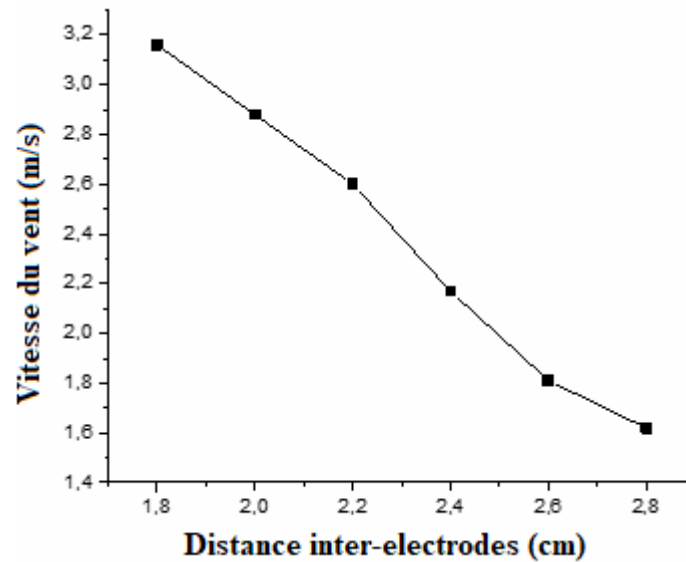
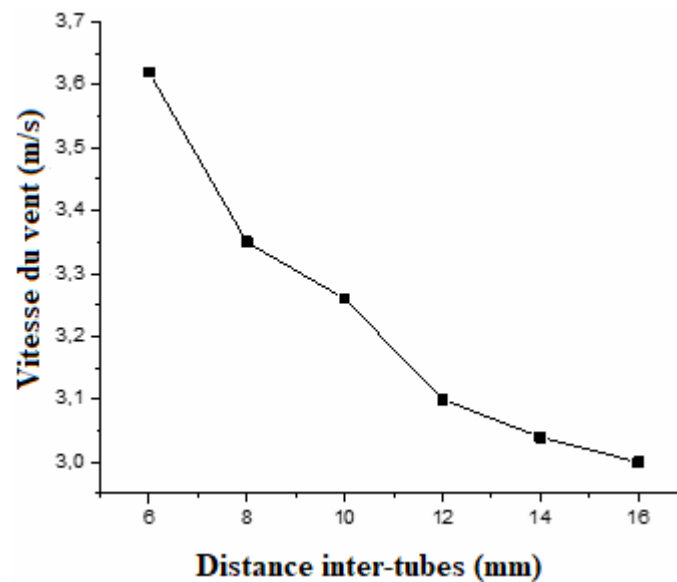


Figure V. 5 : Variation de la vitesse du vent en fonction de la distance inter-électrodes ($U = 22$ kV, $L = 8$ mm).

Les résultats obtenus l'expérience 1, illustrés Figure V.4, montrent que la appliquée (U) ne doit pas 32 kV dans nos conditions expérimentales. À cette la vitesse du vent atteint maximum, mais la consommation de courant



lors de dans la tension dépasser tension, son devient

importante. La tension de claquage se produit lorsque la tension dépasse 32 kV. À l'inverse, si la tension appliquée est trop faible, la décharge corona n'est pas observée, car il est nécessaire d'atteindre un seuil minimal d'environ 12 kV. En dessous de ce seuil, aucune puissance n'est produite et aucun vent n'est généré. Par conséquent, la plage de tension idéale pour U se situe entre 21 et 31 kV.

Dans l'expérience 2, comme le montre la Figure V.5, l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne une diminution de la vitesse du vent ionique. Cela s'explique par le fait que la force du champ électrique diminue à mesure que la distance inter-électrodes augmente, ce qui réduit l'efficacité de l'ionisation et, par conséquent, la production de vent. L'intervalle de variation de ce facteur a été sélectionné dans la conception expérimentale entre $D = 2,4$ cm

et $D = 2,8$ cm, afin d'étudier l'interaction avec le facteur tension, dans le but d'augmenter la tension de claquage à des valeurs élevées et d'obtenir des vitesses plus importantes.

Enfin, dans les conditions de l'expérience 3, comme prévu, la vitesse du vent diminue à mesure que la distance inter-tubes augmente, comme l'illustre la Figure V.6. Lorsque le vent traverse un espace plus restreint, sa vitesse augmente en raison de la réduction de la zone de flux, ce qui oblige l'air à s'accélérer. L'effet Venturi, qui se produit lorsque le même volume d'air doit traverser un espace plus étroit, est ici mis en évidence. Le champ de variation pour ce facteur a été défini entre $L = 6$ mm et $L = 12$ mm.

V.8.2 Identification du point de fonctionnement optimal

Les mêmes facteurs précédente ont été sélectionnés comme variables d'entrée pour les tests du plan d'expériences. Les niveaux "min" et "max" correspondent aux limites définies pour les trois variables de contrôle. Le point central (U_c , D_c et L_c) a été déterminé de la manière suivante :

♣ Tension continue appliquée à haute tension U [kV], $U_{\min} = 21$ kV; $U_{\max} = 31$ kV ;

♣ Distance entre les électrodes D [cm], $D_{\min} = 2.4$ cm ; $D_{\max} = 2.8$ cm ;

♣ Distance entre les tubes L [cm], $L_{\min} = 6$ mm ; $L_{\max} = 12$ mm.

Le point central des facteurs (U_c , D_c et L_c) a été déterminé comme suit :

$$U_c = (U_{\max} + U_{\min}) / 2 = (21+31) / 2 = 26 \text{ kV} \quad (\text{V.6})$$

$$D_c = (D_{\max} + D_{\min}) / 2 = (2.4+2.8) / 2 = 2.6 \text{ cm} \quad (\text{V.7})$$

$$L_c = (L_{\max} + L_{\min}) / 2 = (6 + 12) / 2 = 9 \text{ mm} \quad (\text{V.8})$$

Le tableau V-1 suivant présente les conclusions du plan élaboré :

Tableau V. 1 : Résultats expérimentaux du plan composites à faces centrées

N Expériences	Tension (kV)	Distance inter-électrode (Cm)	Distance tube (mm)	Vitesse du vent (m/s)	Courant (μ A)
N 1	21	2,4	6	2,5	1000
N 2	31	2,4	6	4,54	3650
N 3	21	2,8	6	1,74	600
N 4	31	2,8	6	2,63	2050
N 5	21	2,4	12	2,1	800
N 6	31	2,4	12	4,33	3350

N 7	21	2,8	12	1,69	600
N 8	31	2,8	12	2,72	2200
N 9	21	2,6	9	1,65	790
N 10	31	2,6	9	3,29	3010
N 11	26	2,4	9	2,61	1800
N 12	26	2,8	9	1,66	1200
N 13	26	2,6	6	2,22	1780
N 14	26	2,6	12	2,17	1800
N 15	26	2,6	9	1,96	1700
N 16	26	2,6	9	1,88	1650
N 17	26	2,6	9	1,92	1690

V.8.3 Analyse des résultats de la vitesse de vent :

V.8.3.1 Modèles mathématiques

En utilisant la méthode des plans d'expérience, l'équation suivante illustre le modèle de la vitesse du vent :

$$V = 1,96028 + 0,783U - 0,564D - 0,0620001L + 0,479507U^2 + 0,144507D^2 + 0,204507L^2 - 0,29375UD + 0,04125UL + 0,08125DL. \quad (V.9)$$

Le modèle développé pour évaluer la vitesse du vent reflète bien les résultats expérimentaux, avec des critères ($R^2 = 0,997$ et $Q^2 = 0,978$) proches de l'unité.

$$I = 1690,99 + 1047U - 395D - 33,0001L + 200,775U^2 - 199,225D^2 + 90,7746L^2 - 268,75UD + 6,25UL + 81,25DL. \quad (V.10)$$

Le modèle développé pour évaluer le courant consommé reflète bien les résultats expérimentaux, avec des critères ($R^2 = 0,996$ et $Q^2 = 0,963$) proches de l'unité.

Ces paramètres permettent d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle proposé et sa validité.

Ce modèle peut être utilisé avec certitude pour prédire les résultats dans le domaine d'étude actuel, et donc l'interpréter et comprendre le phénomène de la variation de vitesse du vent dans le nettoyage électrostatique par vent ionique.

V.8.3.2 Influence et effets des facteurs choisis

Dans le modèle mathématique, les coefficients associés aux divers facteurs témoignent de l'impact de chaque facteur sur les sorties (réponses), qui correspond à la vitesse du vent et au courant consommé. Le tracé de ces coefficients est illustré dans la figure V.7 et la figure V.8. D'après la configuration lame a pointes proposées, il est clair que dans les limites de la variation des intervalles choisis, la haute tension continue et la distance inter-électrode ont le

plus d'influence sur la vitesse du vent et le courant consommé. Cette influence est représentée par les coefficients suivants :

- Pour la vitesse du vent : (+ 0,783) pour la haute tension et (-0,564) pour la distance inter-électrode. L'influence de la distance inter-tube sur la vitesse du vent est moins importante que celle des deux autres (-0,0620001).
- Pour le courant consommé : (+ 1047) pour la haute tension et (-395) pour la distance inter-électrode. L'influence de la distance inter-tube sur le courant consommé est moins importante que celle des deux autres (-33.0001).
- Il est important de tenir compte de l'impact de l'interaction intense entre la tension et la distance inter-électrode pour les deux réponses, ce qui se manifeste par un coefficient de (-0,29375) pour la vitesse du vent et (-268.75) pour le courant consommé. D'autre part, il est évident que les échanges entre les autres facteurs sont très restreints et ne peuvent avoir un effet remarquable sur les repenses.

Vitesse du vent (m/s)

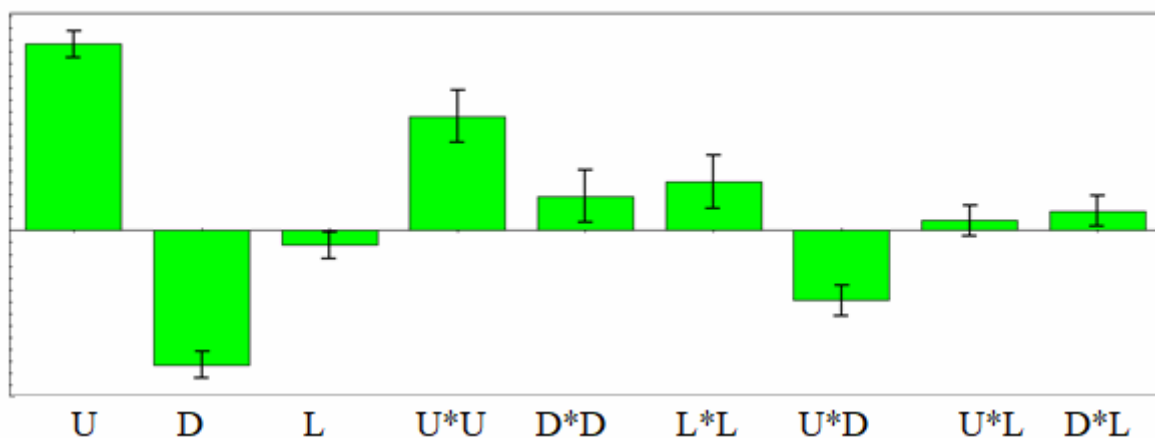


Figure V. 7 : Coefficients des facteurs et leurs interactions sur la vitesse du vent.

Courant(μ A)

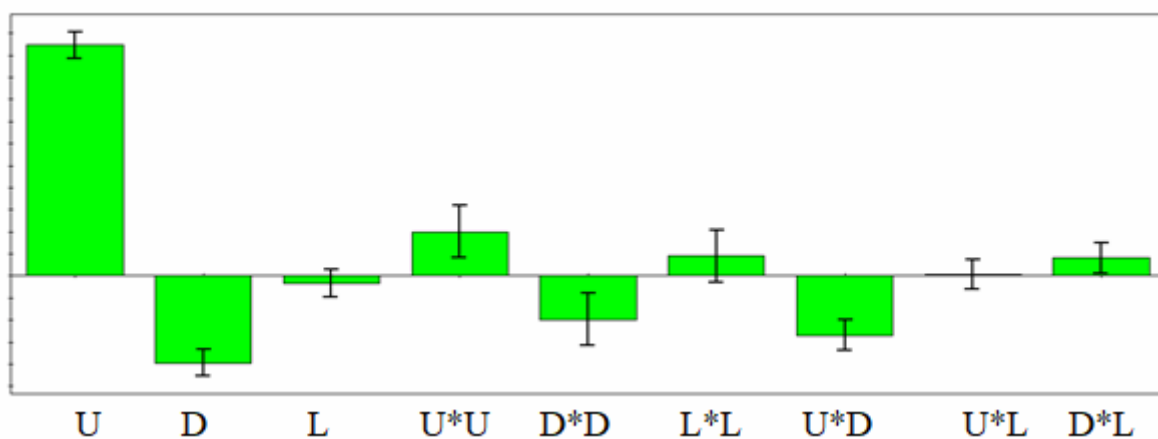


Figure V. 8 : Coefficients des facteurs et leurs interactions sur le courant consommé.

V.8.3.3 Courbes de prédiction centralisées

L'effet de chaque facteur sur la vitesse du vent peut également être prédéterminé dans le modèle mathématique obtenu en observant la variation de la vitesse du vent en fonction des facteurs choisis. La figure V.9 présente les Courbes de prédiction centralisées de la vitesse du vent.

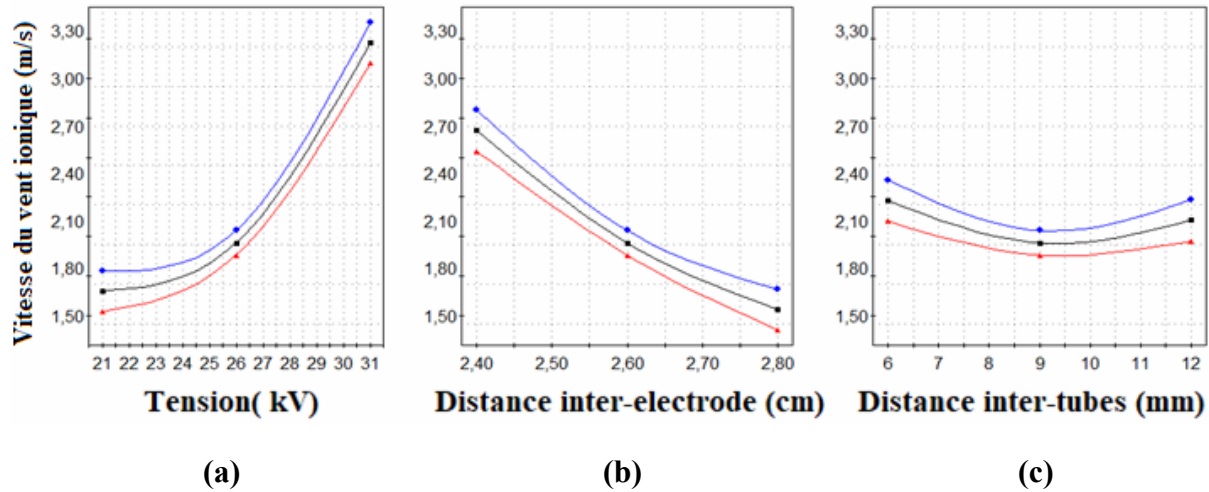


Figure V. 9 : Courbes de prédiction de la vitesse du vent en fonction de : a) tension électrique b) Distance inter-électrode, et c) Distance inter-tube.

L'effet des trois facteurs sur le courant consommé peut être prédéterminé dans le modèle mathématique en observant la variation du courant en fonction des facteurs choisis. La figure V.10 présente les courbes de prédiction centralisées du courant.

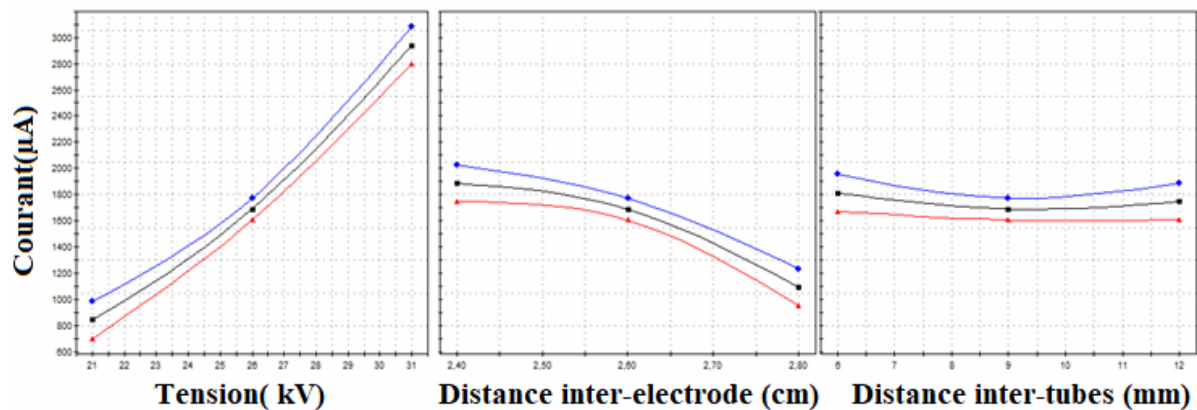


Figure V. 10 : Courbes de prédiction du courant en fonction de : a) tension électrique b) Distance inter-électrode, et c) Distance inter-tube.

V.8.3.4 Courbes d'iso-réponses

Les trois figures suivantes présentent les courbes d'iso-réponses illustrant la vitesse du vent, qui est considérée comme la réponse dans le plan d'expérience. L'objectif de la traçabilité de ces courbes est d'étudier l'influence des trois paramètres (tension, distance inter-électrodes, et distance inter-tubes) sur la vitesse du vent.

En observant les figures V.11 et V.12, qui montrent l'influence de la tension et de la distance inter-électrodes sur la vitesse du vent, on constate que ces deux facteurs ont un impact plus important que la distance inter-tube. Cela est clairement illustré par la comparaison entre la tension de réglage à 21 kV et à 31 kV, comme le montre la figure V.11. Dans le premier cas, on remarque que, quelle que soit la distance inter-électrode ou la distance inter-tube, la vitesse du vent ne dépasse pas 2,43 m/s. En revanche, avec une tension de 31 kV, cette vitesse peut atteindre 4,23 m/s. Cette différence s'explique par le fait que la vitesse du vent est étroitement liée à la tension élevée, qui induit l'effet du vent ionique.

Concernant la figure V.12, les surfaces iso-réponses de la vitesse du vent varient en fonction de la distance inter-électrodes. On observe que cette distance a un effet plus ou moins marqué sur la vitesse du vent. En effet, l'augmentation de la distance inter-électrodes entraîne une diminution de la vitesse du vent, ce qui reflète la baisse de la densité de charge dans l'espace. Numériquement, la vitesse du vent est de 2,66 m/s pour une distance entre les électrodes de 2,8 cm, et de 4,21 m/s pour une distance de 2,4 cm.

Enfin, les résultats de la figure V.13 montrent que l'étude de la vitesse du vent ionique de l'actionneur est moins sensible à la distance inter-tubes. Un effet similaire est observé dans les autres figures.

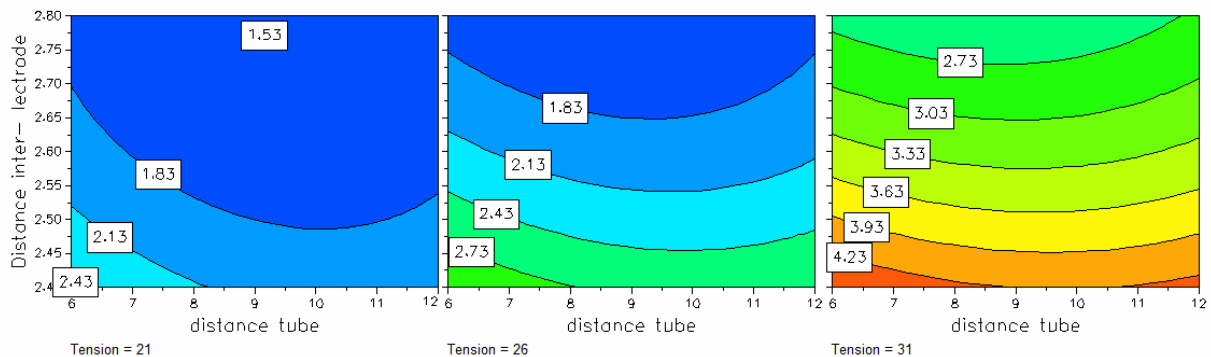


Figure V. 11 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent -paramètre : [Tension kV]

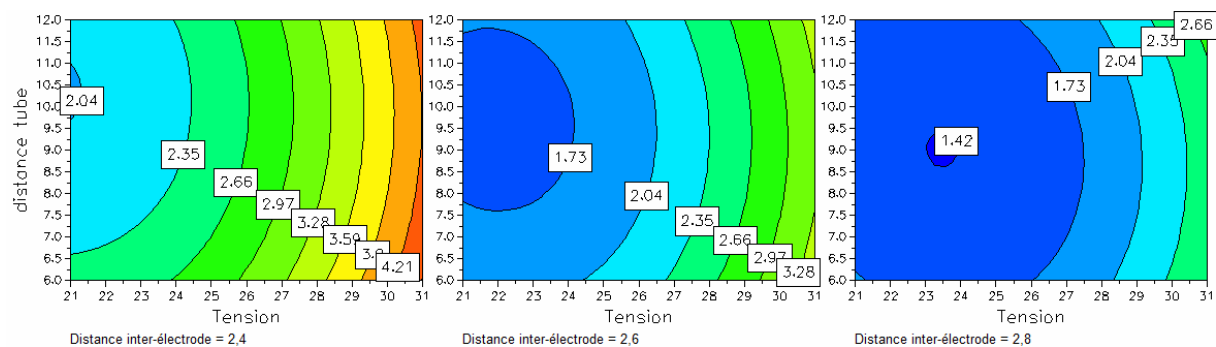


Figure V. 12 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent – paramètre : [Distance inter-électrodes cm]

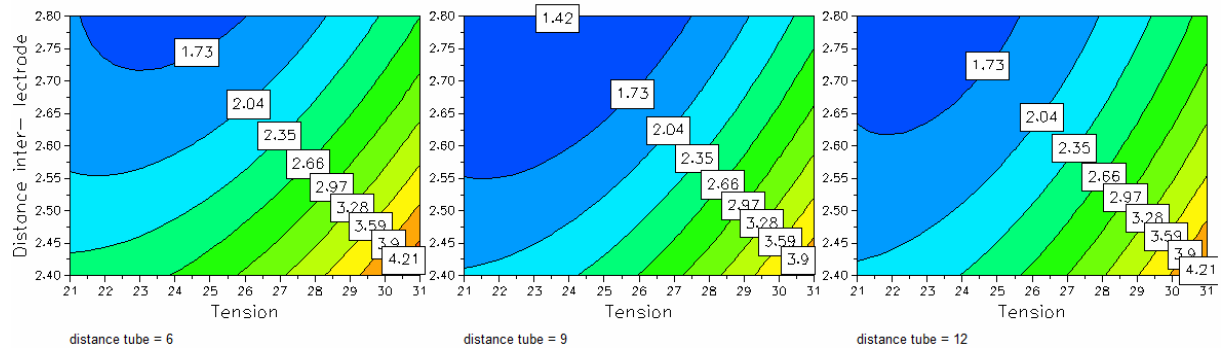


Figure V. 13 : Modélisation par surfaces de réponse de la vitesse du vent – paramètre : [Distance inter-Tubes mm]

Selon l'outil d'optimisation du logiciel, les conditions de processus optimales suivantes ont été obtenues :

- La vitesse du vent la plus élevée 4.54m/s doit être atteinte lorsque U= 30.99 kV, D=2.4 cm et L = 6.02mm (figure V.14).

	1	2	3	4	5
	Tension	Distance inter-électrode	distance tube	Vitesse vent	Courant
1	31	2,4	11,0186	4,249	3371,7
2	30,9789	2,4017	6,0003	4,5124	3591,8
3	30,9955	2,4013	6,0149	4,5194	3596,86
4	31	2,4001	11,9993	4,3269	3385,95
5	30,9941	2,401	6,0188	4,5201	3596,57
6	30,9789	2,4017	6,0003	4,5124	3591,8
7	30,9955	2,4013	6,0149	4,5194	3596,86
8	31	2,4	11,9969	4,327	3385,95

Figure V. 14 : La vitesse optimale en utilisant le logiciel MODDE 5.0

- L'équilibre optimal entre la vitesse du vent 4.32m/s et la consommation I=3385μA doit être atteint lorsque U=31 kV, D=2.4 cm et L= 11.99 mm (figure V.15).

	1	2	3	4	5
	Tension	Distance inter-électrode	distance tube	Vitesse vent	Courant
1	31	2,4	12	4,3275	3386,05
2	30,7112	2,4	6,0001	4,4178	3503,86
3	30,7129	2,4	6,0002	4,4186	3504,46
4	31	2,4001	11,9996	4,3269	3385,96
5	30,7324	2,4008	6	4,4212	3509,69
6	30,7112	2,4	6,0001	4,4178	3503,86
7	30,7129	2,4	6,0002	4,4186	3504,46
8	31	2,4001	11,9999	4,3272	3386

Figure V. 15 : l'équilibre optimale en utilisant le logiciel MODDE 5.0

Conclusion :

Le nouveau dispositif de nettoyage électrostatique a été spécialement conçu pour le nettoyage des particules de sable accumulée dans les panneaux solaires. Cette étude a permis de déterminer la variation de la vitesse du vent ionique généré par effet corona pour une configuration de type lame à Pointes/Tubes. L'efficacité du processus de nettoyage réalisé avec ce dispositif est due au fait qu'il comporte comme éléments spécifiques une lame à pointes reliée à la haute tension comme électrode active et des tubes de cuivre comme électrode reliée à la masse.

En utilisant la méthode des plans d'expériences, nous avons déterminé les intervalles de variation des facteurs variables tels que la haute tension continue, la distance inter-électrodes et la distance inter-tube. Ensuite, il a été possible de modéliser le rendement de l'actionneur de vent ionique en proposant un modèle mathématique qui est validé en vérifiant des critères bien déterminés, afin d'obtenir les résultats optimaux de la vitesse du vent utilisée par l'actionneur pour nettoyer les panneaux solaires. Par la suite, nous avons utilisé les modèles obtenus afin de déterminer les valeurs optimales des divers facteurs et de prédire la vitesse du vent ainsi que la puissance consommée par le dispositif de nettoyage qui serait obtenue pour toutes les valeurs de ces facteurs.

La modélisation de ce dispositif à l'aide de la méthode des plans d'expérience révèle trois aspects essentiels, à savoir :

- D'après la configuration proposée, dans les limites des d'intervalles de variation choisis, la haute tension continue a le plus d'influence sur la vitesse du vent.
- La distance inter-électrode exerce également une influence remarquable sur la vitesse du vent.
- Une corrélation intéressante existe entre la tension et la distance inter-électrodes : il est alors recommandé de bien choisir le réglage approprié.

CONCLUSION GENERALE

Le principal obstacle auquel font face les panneaux solaires est l'accumulation de poussière de sable sur la surface. L'accumulation peut entraîner une diminution significative de l'efficacité et des performances des panneaux, restreignant ainsi leur capacité à générer de l'électricité de manière optimale. C'est pourquoi il est essentiel de découvrir des méthodes pour réduire la poussière présente sur les systèmes solaires photovoltaïques, puis de trouver des solutions efficaces pour préserver la propreté des panneaux solaires et assurer leurs performances optimales.

Dans cette thèse, nous avons exposé une série de recherches axées sur l'étude et la réalisation d'un nouvel appareil de nettoyage électrostatique pour les panneaux solaires utilisant un actionneur à deux électrodes et alimenté à la haute tension continue. Les essais expérimentaux effectués dans le laboratoire avec ce dispositif permettent de nettoyer les panneaux solaires et de trouver les meilleures configurations pour donner un nettoyage optimal.

À travers un examen approfondi de l'état de l'art dans le premier chapitre, nous avons pu comprendre les fondements théoriques et les avancées technologiques liées au domaine de la décharge couronne et surtout au vent ionique et ses applications dans plusieurs domaines.

Le développement et la mise en œuvre du nettoyage électrostatique des panneaux solaires par vent ionique représentent une avancée significative dans ce projet de recherche. Malgré les défis rencontrés tout au long du processus, tant dans la conception que dans la réalisation, nous avons réussi à mettre au point un dispositif expérimental efficace pour le nettoyage des panneaux solaires. Ce dispositif, élaboré dans le laboratoire APELEC de l'université DJILALI LIABES de Sidi Bel Abbes, a été breveté à l'Institut National de la Protection Industrielle INAPI. Cette réalisation constitue une étape importante dans la recherche de solutions innovantes et durables pour l'entretien et l'optimisation des performances des installations solaires. En mettant en avant les avantages du nettoyage électrostatique par décharge couronne, cette contribution ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de l'énergie solaire, offrant des moyens plus efficaces et économiques pour maintenir la production d'énergie solaire à son maximum.

Les résultats expérimentaux ont démontré et confirmé que cette technologie est extrêmement bénéfique et peut être efficacement employée pour éliminer les particules de sable accumulées dans les panneaux solaires. D'après les résultats obtenus, il a été démontré que la vitesse du vent joue un rôle essentiel dans le nettoyage des panneaux solaires. De plus, ces résultats sont prometteurs car les particules de sable ont été efficacement nettoyées. En revanche, il semble que le processus de nettoyage ne soit pas très sensible aux variations du taux d'humidité et de température.

Les mesures réalisées avec cette technique ont permis d'obtenir diverses configurations telles que la configuration fil/rectangle, fil/plaque, et lame à pointe/tubes, ce qui ont permis d'obtenir une vitesse du vent ionique allant jusqu'à 4.5 m/s. Donc, cette amélioration a entraîné une augmentation de l'efficacité de nettoyage à près de 100 %, tout cela réalisé pour un seul passage de l'appareil de nettoyage sur le panneau solaire.

Notre travail a finalement porté sur la modélisation et l'amélioration d'une nouvelle configuration en utilisant la méthodologie des plans d'expériences, le logiciel MODDE 5.0. De plus, ce logiciel offre la possibilité de mesurer l'impact de chaque paramètre sélectionné, à savoir la tension, la distance inter-électrodes et la distance inter-tubes, sur les réponses du système individuellement (la vitesse du vent et l'efficacité énergétique), puis de déterminer le point optimal et pour prédire le rendement du processus de nettoyage qui serait obtenu pour n'importe quelle valeur de ces facteurs.

L'utilisation de cette technique de nettoyage électrostatique offre une solution ingénieuse aux problèmes particuliers rencontrés dans les zones désertiques, où l'eau est une ressource rare et précieuse. Ainsi, l'utilisation de la technologie électrostatique permet de supprimer la nécessité d'eau, ce qui représente un avantage environnemental majeur dans ces régions arides. En outre, cette technique n'emploie aucune pièce mécanique en contact avec le panneau comme les techniques de nettoyage classiques qui présente le risque de fissurer ou de causer des dommages aux panneaux solaires. Ainsi cette technologie est une solution parfaite pour l'avenir des centrales solaires en raison de sa durabilité environnementale et de son efficacité opérationnelle.

Perspectives de recherche :

L'amélioration de cet appareil nécessite l'exploration d'autres configurations qui permettent d'atteindre une vitesse du vent plus élevée et une efficacité de nettoyage de 100 % en un seul passage de dispositif de nettoyage. En outre, pour que les équipements de nettoyage proposés dans les grandes centrales solaires soient efficacement intégrés, il sera crucial d'intégrer un système capable de réaliser automatiquement un nettoyage complet de tous les panneaux solaires. Ce système robotique va jouer un rôle essentiel dans l'amélioration du processus de nettoyage et dans la couverture complète des champs de panneaux photovoltaïques.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M. L. Louazene, "Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla", Thèse de Doctorat en Sciences, Université de Batna, Octobre 2015.
- [2] S. Gochhait, R. Asodiya, T. Hasarmani, V. Patin, O. Maslova, "Application of IoT: A Study on Automated Solar Panel Cleaning System". In Proceedings of the 4th International Conference on Electrical, Control and Instrumentation Engineering (ICECIE), Kuala Lumpur, Malaysia, November 2022.
- [3] M. R. Bouazza, "Contribution à l'étude de la génération du vent ionique par une décharge électrique couronne", Thèse de Doctorat, Université de Tiaret, Juin 2016.
- [4] A. Abahazem, "études expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz", Thèse de Doctorat d'Etat, université de Toulouse, Décembre 2009.
- [5] R. Schade, "Über die aufbauzeit einer Glimmentladung." Zeitschrift für Physik, vol. 104(7-8), p. 487-510, 1937.
- [6] A. Nadjem, "Etude et exploitation des charges électriques dans les procédés électrostatiques", Thèse de Doctorat, Université de Tiaret, décembre 2018.
- [7] A. Moussaoui, "Etudes des phénomènes de charge et de neutralisation des milieux diélectriques granulaires en utilisant la décharge à barrière diélectrique", Thèse de Doctorat, Université de Guelma, Juillet 2019.
- [8] J. Koller, V. Kříha, J. Píchal, L. Aubrecht, "Corona discharge light emission et electric field intensity comparison," Czechoslovak Journal of Physics, Vol. 54, N°3, pp. C810-C815, 2004.
- [9] Q. Jingguo, et al. "A Review on Recent Advances and Challenges of Ionic Wind Produced by Corona Discharges with Practical Applications." Journal of Physics D, vol. 55, no. 15, 13 Dec. 2021, pp. 153002–153002, <https://doi.org/10.1088/1361-6463/ac3e2c>. Accessed, Octobre 2023.
- [10] A. Abahazem, "Etudes expérimentales des décharges couronne pour la dépollution des gaz", Thèse de Doctorat, Université de Toulouse III, Décembre 2009.
- [11] T.M. Layati, "Réalisation d'une installation prototype industrielle de génération d'ozone par décharge à barrière diélectrique. Application pour le traitement des eaux", Thèse de Doctorat, Université de Sidi Bel Abbes, Novembre 2022.
- [12] G. W. Trichel, "The mechanism of the negative point to plane corona near onset," Physical Review, Vol. 54, N°. 12, pp. 1078-1084, 1938. Doi: <https://doi.org/10.1103/PhysRev.54.1078>.

- [13] N. Zouzou, E. Moreau, G. Touchard, "Précipitation électrostatique dans une configuration pointe-plan," *Journal of Electrostatics*, Vol. 64, N°.7-9, pp. 537-542, 2006. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2005.10.036>.
- [14] M. Goldman, A. Goldman, R. S. Sigmond, "The corona discharge, its properties and specific uses," *Pure and Applied Chemistry*, Vol. 57, N°.9, pp. 1353-1362, 1985. Doi: <https://doi.org/10.1351/pac198557091353>.
- [15] M. Rezzouga, A. Tilmatine, R. Gouri, K. Medles, et L. Dascalescu, « Experimental modeling of high-voltage corona discharge using design of experiments », *Front. Electr. Electron. Eng. China*, vol. 2, no 2, p. 139143, avr. 2007.
- [16] F. Beloucif "Analyse et prédiction des seuils d'apparition des décharges couronnées dans les gaz isolants en haute tension", Doctorat en Sciences, Université de Guelma, Octobre 2017.
- [17] M. P. Panaget, "Etude en laboratoire des effets physico-chimiques induits par les pertes électriques des lignes de transport a haute tension. Paris 6, 1997.
- [18] K. Hamouimeche, "Etude de l'interaction entre une barrière de papier et une décharge couronne en géométrie pointe-plan », Université Mouloud Mammeri, 2009.
- [19] F. Koliatene, "Contribution à l'étude de l'existence des décharges dans les systèmes de l'avionique », Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2009.
- [20] C. Gary et G. Le Roy, *Les Propriétés diélectriques de l'air et les très hautes tensions*. Paris: Eyrolles, 1984.
- [21] B. Dramane, "Précipitation électrostatique de particules submicroniques par décharge a barrière diélectrique - étude électrique, granulométrique et aérodynamique", Thèse de doctorat, Université de Poitiers, Décembre 2009.
- [22] J. Ruan and Z. Xu, "Constructing environment-friendly return road of metals from e-waste: Combination of physical separation technologies", *Renew. and Sustain. Energ. Rev.*, Vol. 54, pp. 745-760, 2016.
- [23] N Cabeo 1629 *Philosophia Magnetica* (Cologne: Apud F. Succium).
- [24] V Heathcote N H de 1950 *Guericke's sulphur globe Ann. Sci.* 6 293–305.
- [25] F Hauksbee 1719 *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects* (London: J. Senex).
- [26] I Newton 1718 *Optics* (London: Royal Society).
- [27] M Faraday 2016 *Experimental Researches In Electricity-Volume 1* (Cambridge: Cambridge University Press).

- [28] J C Maxwell 1873 *A Treatise on Electricity and Magnetism* (Oxford: Clarendon).
- [29] Chattock A P 1899 On the velocity and mass of the ions in the electric wind in air London, Edinburgh Dublin Phil. Mag. J. Sci. 48 401–20.
- [30] Lob E 1954 *Archiv Der Elektrischen Uebertragung* (Baden-Württemberg, Germany).
- [31] Robinson M 1961 Movement of air in the electric wind of the corona discharge Trans. Am. Inst. Electr. Eng. I 80 143–50
- [32] Zhang Tongkai, Zhang Yu, Ji Qizheng, Li Ben, Ouyang Jiting. Characteristics and underlying physics of ionic wind in dc corona discharge under different polarities. *Chinese Physics B*, 2019, 28(7): 075202.
- [33] Ferreira G F L, Oliveira O N and Giacometti J A 1986 Point-to-plane corona: current–voltage characteristics for positive and negative polarity with evidence of an electronic component. *J. Appl. Phys.* 59: 3045.
- [34] Kawamoto H and Umezu 2008 Electrostatic micro-ozone fan that utilizes ionic wind induced in pin-to-plate corona discharge system. *J. Electrostat.* 66(7): 445–454.
- [35] Shin D H, Yoon J S and Ko H S 2015 Experimental optimization of ion wind generator with needle to parallel plates for cooling device. *Int. J. Heat Mass Transf.* 84: 35–45.
- [36] Li L, Lee S J, Kim W and Kim D 2015 An empirical model for ionic wind generation by a needle-to-cylinder DC corona discharge. *J. Electrostat.* 73: 125–130.
- [37] Tsui Y-Y, Huang Y-X, Lan C-C and Wang C-C 2017 A study of heat transfer enhancement via corona discharge by using a plate corona electrode *J. Electrostat.* 87 1–10.
- [38] Shin D H, Baek S H and Ko H S 2017 Analysis of counter flow of corona wind for heat transfer enhancement *Heat Mass Transfer* 54 841–54.
- [39] Hsu C-P, Jewell-Larsen N E, Krichtafovitch I A, Montgomery S W, Dibene J T and Mamishev A V 2007 Miniaturization of electrostatic fluid accelerators *J. Microelectromech. Syst.* 16 809–15
- [40] Bilici M A, Haase J R, Boyle C R, Go D B and Sankaran R M 2016 The smooth transition from field emission to a self-sustained plasma in microscale electrode gaps at atmospheric pressure *J. Appl. Phys.* 119 223301.
- [41] Klemm O et al 2012 Fog as a fresh-water resource: overview and perspectives *Ambio* 41 221–34.
- [42] Damak M and Varanasi K K 2018 Electrostatically driven fog collection using space charge injection *Sci. Adv.* 4 eaao5323.

- [43] A. Ellis, R. Nelson, E. Von Engeln, R. Walling, J. McDowell, L. Casey, E. Seymour, W. Peter, C. Barker, B. Kirby, Reactive Power Interconnection Requirements for PV and Wind Plants – Recommendations to NERC, SAND 2012–1098.
- [44] IREN21. 2020 Renewables 2020 Global Status Report; REN21 Secretariat: Paris, France, 2020. Available online: <http://www.ren21.net/> (accessed on 20 May 2020).
- [45] H SERGHINE, "Etude et Modélisation des Différentes Composantes des Systèmes Photovoltaïques Raccordées au Réseau Electrique", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, juillet 2022.
- [46] E SAINTAIMÉ, "Étude et modélisation des substrats ultra-minces de silicium et de leur application au photovoltaïque", Doctorat en Sciences, Université d'Orléans, décembre 2020.
- [47] Stambouli, A.B.; Koinuma, H. A primary study on a long-term vision and strategy for the realisation and the development of the Sahara Solar Breeder project in Algeria. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2012, 16, 591–598.
- [48] creg.dz. Commission for Regulation of Electricity and Gas. Program Indicative of the Requirements for Means of Production of Electricity (2008–2017). Available online : <https://creg.dz/> (accessed on 12 June 2020).
- [49] Ministère de l'énergie et des Mines. Guide des Energies Renouvelables 2007. Available online : <https://www.energy.gov.dz/?article=contact> (consulté le 01 Juin 2020).
- [50] Y. Himri,; A.S. Malik, A.B. Stambouli,; S. Himri,; B. Draoui, Review and use of the Algerian renewable energy for sustainable development. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2009, 13, 1584–1591.
- [51] S. Petibon, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques", Thèse de doctorat, Université de Toulouse III T-Paul Sabatier, 2010.
- [52] L. Bun, "Détection et localisation de défauts pour un système PV", Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [53] R. ABDELKRIM, "Étude d'un système de conversion de l'énergie photovoltaïque à base d'un émulateur photovoltaïque", Thèse de doctorat. Université Constantine, Mai 2022.
- [54] B. LAMRI, "Analyse énergétique et intégration de la sûreté de fonctionnement dans un système photovoltaïque connecté au réseau électrique", Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2018.
- [55] K. Michael, "Overview of Scientific Issues Involved in Selection of Polymers for PV Applications", National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, USA, 2011.

- [56] N. AOUCHICHE, "Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque", Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Janvier 2020.
- [57] Mambrini T. Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies. Thèse de Doctorat. Université ParisSud École doctorale : STITS, 2014.
- [58] A. Benabda, "Contribution à l'étude d'une alimentation à base de panneaux photovoltaïques avec stockage", Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2018
- [59] V. Barth, "Dipyrrométhènes métallés (Co,Ni,Cu) et dipyrannilidènes: de nouveaux matériaux organiques pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire", Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie de Paris , 2014.
- [60] T. Mambrini, "Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies", Thèse Doctorat, Université de PARIS-SUD, 2014.
- [61] S. Varlamov et al., "Polycrystalline silicon on glass thin-film solar cells: A transition from solidphase to liquid-phase crystallised silicon", Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 119, p. 246255, déc. 2013, doi: 10.1016/j.solmat.2013.08.001. 127.
- [62] T. H. CUONG, "Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement ", Thèse de Doctorat, Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE, janvier 2019.
- [63] T. Huld, E. Dunlop, H. G. Beyer, and R. Gottschalg, "Data sets for energy rating of photovoltaic modules", Sol. Energy, vol. 93, pp. 267–279, 2013.
- [64] S. Necaibia, "Stockage de l'énergie par batterie d'une installation photovoltaïque appliquée à un pompage solaire", Thèse de doctorat, Université de Annaba, 2018
- [65] H. BOUNECHBA, "Contribution à l'étude d'un système de pompage photovoltaïque", Thèse de Doctorat, Université de costantine, Mai 2017.
- [66] C. Balakishan, "Development of a Microcontroller Based PV Emulator with Current Controlled DC/DC Buck Convertir ", Intern jour of Ren Ener Res vol. 4. 2014, p. 1055.
- [67] J.F. Reynaud, "Recherches d'optimums d'énergie pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques ", Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2011.
- [68] I. ZERIMECHE, "Étude et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque en mode alternatif", Thèse de doctorat, Université de Constantine, juillet 2022.

- [69] M. Angel Cid Pastor, "Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques", Thèse Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, septembre 2006.
- [70] S. VIGHETTI, "Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau ", Thèse Doctorat, Université de Grenoble France 2010.
- [71] R. KHENFER, "Détection et isolation de défauts combinant des méthodes à base de données appliquées aux systèmes électro-énergétique", Thèse Doctorat, Université de Sétif, Mars 2015.
- [72] E. KECHAR, "Influence des rayonnements parasites sur le rendement des panneaux solaires", Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2020.
- [73] Kimber, A., Mitchell, L., Nogradi, S., Wenger, H., 2007. The effect of soiling on large grid-connected photovoltaic systems in California and the Southwest Region of the United States. Conf. Rec. 2006 IEEE 4th World Conf. Photovolt. Energy Conversion, WCPEC-4 2, 2391–2395. <https://doi.org/10.1109/WCPEC.2006.279690>.
- [74] jiang, Y., Lu, L., Ferro, A.R., Ahmadi, G., 2018. Analyzing wind cleaning process on the accumulated dust on solar photovoltaic (PV) modules on flat surfaces. Sol. Energy 159, 1031–1036. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.083>.
- [75] A. Kazem, T. Chaichan, H.A. Al-Waeli, K. Sopian, A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems, Journal of Cleaner Production, vol. 276, 2020, p. 123187.
- [76] Zorrilla-Casanova, J., Piliougine, M., Carretero, J., Bernaola, P., Carpena, P., Mora-Lopez, L., Sidrach-de-Cardona, M., 2011. Analysis of Dust Losses in Photovoltaic Modules 2985–2992. <https://doi.org/10.3384/ecp110572985>.
- [77] Alshehri, A.; Parrott, B.; Outa, A.; Amer, A.; Abdellatif, F.; Trigui, H.; Carrasco, P. Dust mitigation in the desert: Cleaning mechanisms for solar panels in arid regions. In Proceedings of the Saudi Arabia Smart Grid Conference (SASG), Jeddah, Saudi Arabia, 14–17 December 2014.
- [78] Patil, P.A.; Bagi, J.S.; Wagh, M.M. A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panel. In Proceedings of the International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS), Chennai, India, 1–2 August 2017.
- [79] ESI Africa. Available online: <https://www.esi-africa.com/energy-efficiency/how-to-clean-your-pv-solar-panels/> (accessed on 12 August 2023).
- [80] Najmi, Nouhaila & Rachid, Ahmed. (2023). A Review on Solar Panel Cleaning Systems and Techniques. Energies. 16. 7960. 10.3390/en16247960.

- [81] Mani, M., Pillai, R., 2010. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 3124–3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>.
- [82] Moreno, L., Cabás, R., Fernández, D., 2006. Technologie d'essuie-poussière à faible masse pour le rover MSL 1–7. Munoz, MA, Alonso-García, MC, Vela, N., Chenlo, F., 2011. Dégradation précoce des modules photovoltaïques en silicium et conditions de garantie. *Sol. Énergie* 85, 2264–2274. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.011>.
- [83] Mazumder, M.K., Biris, A.S., Yurteri, C.U., Sims, R.A., Sharma, R., Johnson, C.E., Pruessner, K., Calle, C.I., Trigwell, S., Buhler, C.R., Clements, J.S., 2006. Solar panel obscuration by dust in the Martian atmosphere. Part. Surfaces 9 Detect. Adhes. Remov.
- [84] Bernard, A.R.; Eriksen, R.; Horenstein, M.N.; Mazumder, M.K. *Dust Settles, We Don't: The Electrodynamic Screen—A Self-Cleaning Technology for Concentrated Solar Power Mirrors and Photovoltaic Panels*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 2018; Volume 5.
- [85] Mazumder, M.K., Sharma, R., Biris, A.S., Horenstein, M.N., Zhang, J., Ishihara, H., Stark, J.W., Blumenthal, S., Sadler, O., 2011. Electrostatic Removal of Particles and its Applications to Self-Cleaning Solar Panels and Solar Concentrators. *Dev. Surf. Contam. Clean. - Methods Remov. Part. Contam.* 149–199. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7885-4.10005-3>.
- [86] Kawamoto, Hiroyuki. (2020). Improved detachable electrodynamic cleaning system for dust removal from soiled photovoltaic panels. *Journal of Electrostatics.* 107. 103481. [10.1016/j.elstat.2020.103481](https://doi.org/10.1016/j.elstat.2020.103481).
- [87] Park, Y.B., Im, H., Im, M., Choi, Y.K., 2011. Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications. *J. Mater. Chem.* 21, 633–636. <https://doi.org/10.1039/c0jm02463e>.
- [88] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, and A. Struckas, “Ultrasonic system for solar panel cleaning,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 200, pp. 74–78, Oct. 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2013.01.009>.
- [89] A. Tilmatine, N. Kadous, K. Yanallah, Y. Bellebna, Z. Bendaoudi, and A. Zouaghi, “Experimental investigation of a new solar panels cleaning system using ionic wind produced by corona discharge,” *Journal of Electrostatics*, vol. 124, pp. 103827–103827, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103827>.
- [90] “Thermo-anémomètre testo 405i avec commande Smartphone,” Testo. <https://www.testo.com/fr-FR/testo-405-i/p/0560-1405> (accessed Mar. 31, 2024).

- [91] “Hot Wire Anemometer GM8903 - Shenzhen Jumaoyuan Science And Technology Co.,Ltd.,” [www.benetechco.net. http://www.benetechco.net/en/products/gm8903.html](http://www.benetechco.net/en/products/gm8903.html) (accessed Mar. 30, 2024).
- [92] “C.A 1246 Thermo-hygromètre,” [catalog.chauvin-arnoux.com. https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_fr/c-a-1246-thermo-hygrometre-3543.html](https://catalog.chauvin-arnoux.com/fr_fr/c-a-1246-thermo-hygrometre-3543.html) (accessed Mar. 30, 2024).
- [93] “CAS MWP OWNER’S MANUAL Pdf Download,” ManualsLib. <https://www.manualslib.com/manual/1024989/Cas-Mwp.html> (accessed Mar. 30, 2024).
- [94] “Laser Particle Sizer ANALYSETTE 22 / Description,” [www.fritsch-international.com. https://www.fritsch-international.com/particle-sizing/static-light-scattering/details/product/laser-particle-sizer-analysette-22-next-micro.html](https://www.fritsch-international.com/particle-sizing/static-light-scattering/details/product/laser-particle-sizer-analysette-22-next-micro.html) (accessed Mar. 30, 2024).
- [95] “M4 TORNADE PLUS - ECKOLAB World Wide.” <https://eckolab-worldwide.com/boutique/analyse-elementaire/spectrometrie-a-fluorescence-x/m4-tornado-plus/> (accessed Mar. 30, 2024).
- [96] Z. Bendaoudi, A. Namoune, N. Kadous, Y. Bellebna, K. Yanallah, and A. Tilmatine, “An Improved Electrostatic Cleaning System for Dust Removal from Photovoltaic Panels,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 17, no. 1, pp. 109–115, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.25103/jestr.171.14>.
- [97] A. Tilmatine, N. Kadous, K. Yanallah, Y. Bellebna, Z. Bendaoudi, and A. Zouaghi, “Experimental investigation of a new solar panels cleaning system using ionic wind produced by corona discharge,” *Journal of Electrostatics*, vol. 124, pp. 103827–103827, Jul. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2023.103827>.
- [98] N. Kadous, K. Yanallah, Y. Bellebna, Z. Bendaoudi, and A. Tilmatine, “Exploring the effectiveness of a novel cleaning method for solar panels using corona ionic wind,” *Particulate Science and Technology*, pp. 1–7, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1080/02726351.2023.2243857>.
- [99] Y. Brahami, “Réalisation et étude expérimentale d’un nouveau séparateur triboélectrique à électrodes plaques immergées dans le mélange de particules fines“, Thèse de Doctorat, Université de Sidi bel-Abbes, 2016.
- [100] K. NASSOUR, « Optimisation du procédé de génération d’ozone par décharge à barrière diélectrique mixte « surfacique-volumique » pour le traitement d’eau », thèse de doctorat, université De Sidi Bel Abbes, 2016.
- [102] S.E. Bendimerad, A. Tilmatine, K. Medles, M. Miloudi, Y. Brahami and L. Dascalescu, (2014). Robustness testing of a free-fall triboelectric separation process for plastic waste recovery. *International Journal of Sustainable Engineering*, 7(4), pp 284- 292.

- [103] Umetrics AB; MODDE 5.0, User guide and tutorial, Umetrics, Umea, Sweden, 1999.
- [104] Frigon, N.L., and D. Mathews. 1996. Practical Guide to Experimental Design. New York: Wiley.

Résumé

Ce travail traite du nettoyage des panneaux solaires par un procédé électrostatique utilisant le vent ionique pour enlever la poussière de sable accumulée sur leur surface. Trois configurations de l'actionneur de vent ionique ont été étudiées pour optimiser la vitesse du vent et l'efficacité du nettoyage : Fil/Rectangle (fil à haute tension et rectangle à la masse), Fil/Plaque (fil à haute tension et plaque à la masse), et Lame a pointes/Tubes (lame à pointes à haute tension et tubes à la masse). Ces configurations ont été conçues pour identifier celles offrant les meilleures performances de nettoyage, avec pour objectif d'améliorer le rendement et la durabilité des panneaux solaires dans des environnements poussiéreux.

Abstract:

This work focuses on developing an innovative method for cleaning solar panels using an electrostatic process that employs ionic wind to remove accumulated sand dust from their surface. Five main configurations of the ionic wind actuator were proposed to optimize the generated wind speed and improve cleaning efficiency. The studied configurations are as follows: WIRE/RECTANGLE, with a wire connected to high voltage and a rectangle connected to ground; NEEDLES/RECTANGLE, where a set of needles is connected to high voltage and a rectangle to ground; WIRE/PLATE, involving a wire connected to high voltage and a plate connected to ground; SAW/TUBES, with a saw connected to high voltage and two tubes connected to ground; and POINTED BLADE/TUBES, where a pointed blade is connected to high voltage and two tubes to ground. Each configuration was tested to determine the best combination in terms of wind speed and cleaning efficiency, aiming to maximize the performance and durability of solar panels in dusty environments. The results of this research offer potentially scalable solutions that contribute to improving the energy efficiency of solar installations by maintaining their cleanliness and optimal performance.

الملخص

هذا العمل يتناول تطوير طريقة مبتكرة لتنظيف الألواح الشمسية باستخدام عملية كهروستاتيكية تعتمد على الرياح الأيونية لإزالة الغبار الرملي المتراكم على سطحها. لقد تم اقتراح ثلاث تكوينات رئيسية لمشغل الرياح الأيونية لتحسين سرعة الرياح الناتجة وتعزيز كفاءة التنظيف. التكوينات المدروسة هي كما يلي: سلك/مستطيل، مع سلك متصل بجهد عالي ومستطيل متصل بالأرض؛ سلك/لوحة، يتضمن سلك متصل بجهد عالي ولوحة متصلة بالأرض؛ وشفرة ذات رؤوس/أنابيب، حيث تكون شفرة ذات رؤوس متصلة بجهد عالي وأنبوبين متصلين بالأرض. لقد تم اختبار كل تكوين لتحديد أفضل تركيبة من حيث سرعة الرياح وكفاءة التنظيف، بهدف تحسين أداء الألواح الشمسية وزيادة وكفاءتها في البيئات الرملية. تقدم نتائج هذا البحث حلولاً قابلة للتطبيق على نطاق واسع، مما يساهم في تحسين كفاءة الطاقة في الأنظمة الشمسية من خلال الحفاظ على نظافتها وأدائها الأمثل.