

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Ammar Telidji Laghouat

Faculté des Sciences Technologie

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN DE CYCLE

MASTER

Domaine : Technologie

Filière : Electromécanique

Parcours : Master

Spécialité : Maintenance Industrielle

Thème

***L'effet de l'accumulation des poussières sur les
panneaux solaires avec l'application la loi de
dépôt des poussières***

Préparé par :

Halloub Makhlouf et Amani Mustapha

Soutenu le :21/ 06 / 2023

Devant le jury composé de :

Dr.Belhadj

(Univ. laghouat)

Président

Dr.Gheraout

(Univ. laghouat)

Examineur

Dr. Bensmain Belkacem

(Univ. laghouat)

Encadrant

Remerciements

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail.

*Nous remercions tout particulièrement notre promoteur, **Mr. BENSMAN** d'avoir proposé et dirigé ce travail, pour son judicieux conseil et toute la patience dont il a fait preuve durant la réalisation de cette étude et surtout pour sa disponibilité. Qu'il trouve ici l'expression de notre profonde gratitude.*

Dédicaces

*Chaleureusement, nous dédions ce
modeste travail :*

À ma mère et mon père

À mes frères et sœurs.

À tous les membres de ma famille.

*À tous ceux qui sont proches de moi avec
lesquelles j'ai partagé les meilleurs
moments de ma vie.*

À tous mes collègues.

AMANI MUSTAPHA.

Dédicaces

*A ma chère mère qui représente pour moi
l'exemple des sacrifices du dévouement,
l'honnêteté et qui a fait de moi ce que je suis
devenue.*

A mon père.

A mes chers frères.

A mes chères sœurs.

A tous mes collègues.

HALLOUB MAKHLOUF.

Sommaire

Liste des tableaux.

Liste des figures.

Liste des abbreviations

Introduction générale

Chapitre I : Généralité sur les panneaux photovoltaïques

Introduction.....	1
La conversion photovoltaïque.....	1
Matériau semi-conducteur	1
La jonction PN	1
Principe de la conversion photo-électrique	2
Technique de dopage	3
Dopage de type N	3
Dopage de type P	3
Les 3 méthodes de dopages	4
Types de cellules et panneaux photovoltaïques.....	6
Photovoltaïque au silicium cristallin.....	6
Monocristallin	6
Poly- cristallin.....	7
Photovoltaïque à couche mince.....	8
Fonctionnement électrique d'une cellule photovoltaïque.....	9
Tension de circuit ouvert	10
Courant de court-circuit.....	10
Point de puissance maximale	10
Puissance-crête et rendement	11
Schéma équivalent d'un photogénérateur	11

Vue d'ensemble des forces de dépôt et d'adhérence des particules	12
--	----

Conclusion	15
------------------	----

Chapitre II : Dégradation des modules photovoltaïques.

Introduction	16
--------------------	----

Dégradation d'un module photovoltaïque	16
--	----

Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques	16
---	----

La corrosion	16
--------------------	----

La délamination	17
-----------------------	----

La décoloration	18
-----------------------	----

Les fissures et bris de verre	18
-------------------------------------	----

Les points chauds ou Hot-spots	19
--------------------------------------	----

Les bulles	19
------------------	----

Les moyens de détection de la dégradation du module photovoltaïque	20
--	----

Inspection visuelle	20
---------------------------	----

Mesure de la puissance	20
------------------------------	----

Influence de Facteurs météorologiques sur PV	21
--	----

Température	21
-------------------	----

L'ensoleillement	22
------------------------	----

Ombre	23
-------------	----

Humidité	24
----------------	----

Pluie et rosée	24
----------------------	----

Encrassement	25
--------------------	----

Le vent	26
---------------	----

L'influence de l'inclinaison des modules	26
--	----

L'angle d'incidence	26
---------------------------	----

L'angle d'inclinaison	27
Effet de vent sable	28
Effet du vent de sable sur l'éclairement solaire.....	28
Effet du vent de sable sur état de la surface	29
L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux	31
Conclusion	32

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Introduction.....	33
Présentation générale de la zone d'étude	33
Le vent.....	34
Le vent et son origine	34
Caractéristiques du vent	34
Vitesses du vent	35
Carte vent en Algérie	36
Grain de sable	37
Forme du grain de sable	37
Dimension du grain de sable.....	38
Essais influence de vent sable et la poussière.....	37
Essais (1): Effet de l'accumulation de poussières.....	37
Essais (2): Effets des dépôts de poussière sur les modules polycristallin	39
Essais (3) : étude l'influence de l'inclinaison et dépôt de poussières	41
Partie calcul.....	45
Conditions	45
Les résultats pour chaque diamètre	46
Variation vitesse de stocks en fonction de diamètre.....	48

Variation de viscosité dynamique de l'air	49
Variation de flux en fonction de température	49
Maintenance de panneau photovoltaïque	50
Introduction	50
L'inspection visuelle (annuelle)	50
Nettoyage de Panneaux Photovoltaïque	50
Les processus de nettoyage	51
Nettoyage manuel des panneaux solaires	51
Nettoyage par aspiration	51
Nettoyage naturel et pluie.....	52
Nettoyage avec Robot	52
Quelques conseils supplémentaires	53
Conclusion	53

Conclusion générale

Bibliographie.

Résumé

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Relations pour calcul l'angle d'inclinaison pour latitude entre 25/50	28
Tableau II.2 : Angle d'inclinaison pour la région de laghaout	28

Chapitre III

Tableau III.1 : <i>Informations pertinentes sur les modules solaires photovoltaïques</i>	37
Tableau III.2 : <i>Viscosité dynamique d'air</i>	45

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Conversion photo-électrique	2
Figure I.2 : Silicium pur (intrinsèque)	3
Figure I.3 : Silicium dopé N	3
Figure I.4 : Silicium dopé P	4
Figure I.5 : Chaîne fabrication du photovoltaïque	5
Figure I.6 : Voie de fabrication du photovoltaïque	5
Figure I.7 : Cellules poly et mono cristalline	7
Figure I.8 : Comparatif entre panneaux poly et mono cristalline	8
Figure I.9 : Module à couche mince	9
Figure I.10 : Comparatif entre panneaux cristalline et amorphe	9
Figure I.11 : Courbe courant-tension d'une cellule	9
Figure I.12 : Schéma équivalent d'un photo générateur couplé à un récepteur	12
Figure I.13 : a) Illustration schématique et simulation de l'adhérence et de l'enlèvement des particules pour une sphère SiO ₂ sur le verre solaire. b) Les forces d'adhérence et les forces d'enlèvement (lignes pointillées) sont en fonction du diamètre des particules	14

Chapitre II

Figure II.1 : Les différents composants du module photovoltaïque soumis à la dégradation	16
Figure II.2 : Module PV atteint par la corrosion	17
Figure II.3 : Module PV présente une délamination	17
Figure II.4 : Module PV avec cellules colorées	18
Figure II.5 : Module PV présent des bris de verre	18
Figure II.6 : Module PV présent des points chauds sur les bords des coins supérieur	19
Figure II.7 : bulles présente sur la face arrière d'un module PV	20
Figure II.8 : Caractéristiques PV pour différentes températures à ensoleillement constant	22
Figure II.9 : Caractéristiques PV pour différents ensoleillements à température constante	23
Figure II.10 : Ombres des arbres sur les panneaux photovoltaïques	24
Figure II.11 : Photo d'une cellule solaire PV recouverte de gouttelettes d'eau	25
Figure II.12 : Module encrassé	25
Figure II.13 : Angle d'incidence sur un module photovoltaïque	26
Figure II.14 : Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence	27
Figure II.15 : Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques	27

Figure II.16 : Photographie de modules PV propres et poussiéreux.....	28
Figure II.17 : Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable	29
Figure II.18 : Photographie optique d'une surface endommagée.....	30
Figure II.19 : Variation de l'efficacité relative en fonction de la durée du sablage	30

Chapitre III

Figure III.1 : Localisation de la wilaya de Laghouat (google.fr)	33
Figure III.2 : La moyenne annuelle de vitesse de vent (1996- 2005).....	34
Figure III.3 : Moyenne annuelle de la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol en Algérie	35
Figure III.4 : Un diagramme schématique montrant les types des grains de sable	36
Figure III.5 : Un diagramme schématique montrant les types des grains de sable.....	37
Figure III.6 : Puissance maximale moyenne mensuelle.....	38
Figure III.7: Réduction du rendement en tension selon le type poussière.....	40
Figure III.8 : Effet de la poussière sur la production d'énergie d'un module PV	40
Figure III.9 : Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière.....	42
Figure III.10 : Evolution de la puissance Moyenne ($U_{co} \times I_{cc}$) en fonction du jour	42
Figure III.11 : Schéma d'expérimentation de l'inclinaison optimale	43
Figure III.12 : Etude de l'inclinaison optimale entre 15° et 0° , 5° , 10° , 12° , 15° , 20°	44
Figure III.13: Variation vitesse des stocks en fonction de température et diamètre	48
Figure III.14: Variation de viscosité dynamique de l'air	49
Figure III.15: variation de flux en fonction de température.....	49
Figure III.16: Image montrant le nettoyage manuel	51
Figure III.17: Image montrant le nettoyage par aspiration	51
Figure III.18: Image montrant le nettoyage automatique	52

Liste des abbreviations

PV : photovoltaïque.

FF : facteur de forme.

U_{co} : tension de circuit ouvert.

I_{CC} : Courant de court-circuit.

P_m : puissance maximale.

W_c : watt crête.

AM 1,5 :

η : Le rendement.

STC : Standard Test Conditions.

G : source de courant idéale.

D : diode.

R_{sh} : la résistance shunt.

R_s : la résistance série.

R_u : l'impédance du récepteur

v_{st} : vitesse de stokes.

ρ : densité des particules.

d: diamètre des particules.

g: accélération de gravité.

μ : viscosité dynamique de l'air

PPM: point de puissance maximale.

EVA: Ethylène Vinyl Acetate .

α : L'angle d'inclinaison.

β : L'angle d'incidence.

PID : Potential Induced Degradation.

Introduction générale :

L'énergie est l'une des principales composantes des sociétés civilisées et est nécessaire à tous les secteurs (économique, agricole, transport, etc.), car elle est utilisée dans le fonctionnement des usines, le déplacement de divers moyens de transport et à d'autres fins, et elle peut prendre également des formes diverses (thermique, électrique, chimique, radiologique et électromagnétique). De la fin du 20^{ème} siècle jusqu'au début du 21^{ème} siècle, le monde a été témoin d'une exacerbation des défis de l'environnement global, en particulier du phénomène de réchauffement, le changement climatique et le trou dans la couche d'ozone.

Au vu de ces données, la pollution de l'environnement est devenue un problème régional et mondial qui menace l'homme dans les pays en développement comme dans les pays développés, et cela est dû à l'exploitation des énergies fossiles et à leur demande croissante, en particulier dans les grands pays industriels, qui sont considérés comme les plus responsables des problèmes environnementaux et la première cause de pollution en raison de leur consommation de grandes quantités de charbon et de pétrole et de gaz, sans parler des prix élevés de ces sources, et ont ainsi concentré les efforts de la gestion mondiale des marchés internationaux et organisations régionales afin de trouver des alternatives aux énergies traditionnelles suffisantes pour sécuriser l'approvisionnement énergétique d'une part et protéger l'environnement d'autre part.

L'Algérie accorde une grande attention aux énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, afin d'encourager les investissements en dehors du secteur des hydrocarbures, et à travers elle, elle vise à créer une cohésion sociale et économique ainsi qu'à réaliser un développement durable. Domaine de l'énergie solaire dans le monde.

Les technologies les plus prometteuses sont celles qui exploitent l'énergie du soleil, où la conversion directe du rayonnement solaire aura de l'énergie électrique à travers des cellules solaires, une technologie nouvelle et développée, et c'est une industrie stratégique en tant que future source d'énergie pour le plus grand impact dans la préservation des sources d'énergie traditionnelles et à des fins plus importantes et une exploitation plus efficace, en plus du fait que sa source d'énergie est gratuite et propre et sans résidus ni erreurs.

D'autres, le rendement des cellules solaires diminue lorsque l'ensoleillement n'est pas suffisant, en plus de leur faible rendement industriel principalement, car les cellules solaires ne fournissent pas leur puissance maximale si elles ne reçoivent pas un rayonnement suffisant, qui n'est atteint qu'à midi et certains jours de l'année.

Ainsi que l'effet des facteurs climatiques sur celle-ci, tels que la température, l'humidité et les vents, qui entraînent la volatilisation des poussières et leur accumulation au fil des jours sur les panneaux solaires photovoltaïques, ce qui conduit à bloquer une grande partie des rayons du soleil en fonction de la densité et de la qualité des poussières issues des cellules photovoltaïques, ce qui se traduit par une diminution de la puissance de sortie des panneaux photovoltaïques, ce qui a été prouvé par des études scientifiques antérieures.

Étant donné que les facteurs climatiques de notre région permettent l'application de la loi de dépôt des particules, cette théorie décrit l'accumulation de grains de poussière sur les panneaux solaires.

Comment l'accumulation de particules de poussière affecte-t-elle les performances des panneaux solaires et comment contribue-t-elle à réduire leur durée de vie ?

Et comment la loi de dépôt est-elle appliquée ?

Afin de réduire le coût de production d'énergie et le coût d'entretien des panneaux solaires et de maintenir leurs performances, quels sont les moyens les plus importants pour nettoyer les panneaux solaires ?

Chapitre I :
Généralités sur les
photovoltaïques

Introduction :

L'énergie photovoltaïque provient de la conversion directe d'une partie du rayonnement solaire en électricité. Cette source d'énergie est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes et a reçu une attention croissante ces dernières années. Aujourd'hui, la technologie photovoltaïque (PV) est suffisamment mature et mesurée pour vraiment décoller dans les applications électriques. Nous décrirons le fonctionnement des cellules photovoltaïques et technique de dopage, leurs principales caractéristiques, les différents types de panneaux solaires photovoltaïques qui limitent les performances des cellules photovoltaïques. Nous expliquons aussi pour l'érosion de verre (matériaux fragile). Nous verrons également l'interprétation de l'accumulation de poussière.

La conversion photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont les composants électroniques de base des modules photovoltaïques et même du domaine du photovoltaïque. Son principe de fonctionnement repose sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui convertit l'énergie lumineuse (énergie solaire) en électricité. Le courant résultant est proportionnel à la puissance lumineuse incidente. La tension résultante peut varier entre **0,3 V** et **0,7 V**, en fonction des matériaux utilisés et de leur disposition, ainsi que de la température et de l'âge de la batterie. L'effet photovoltaïque est l'une des propriétés électriques des semi-conducteurs. [1]

A. Matériau semi-conducteur :

Les semi-conducteurs sont des matériaux avec de très faibles concentrations de charges libres par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) se libère dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant électrique, il faut lui donner un minimum d'énergie pour qu'il puisse atteindre un niveau d'énergie supérieur (bande de conduction).

Cette énergie, appelée énergie de "bond gap" (eg électronvolts (eV)), est propre à chaque matériau semi-conducteur et varie en valeur entre 1,0 et 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Par exemple, 1,1 eV pour le silicium cristallin (c - Si) et 1,7 eV pour le silicium amorphe (a - Si). Le rayonnement qui atteint la surface de la cellule solaire sera divisé en trois parties : la partie réfléchi, la partie absorbée et enfin la partie qui traverse l'épaisseur de la cellule [2]. Les photons absorbés avec une énergie supérieure à l'énergie de la bande interdite libéreront un électron négatif, laissant un "trou" positif. Pour séparer ce couple de charges de signe opposé (positif et négatif) et collecter le courant, il faut introduire un champ électrique nul de part et d'autre de la cellule [3]

B. La jonction PN :

Une jonction PN est formée en mettant en contact un semi-conducteur dopé N (donneur d'électrons) avec un semi-conducteur dopé P (donneur de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction. Pour la production de cellules photovoltaïques, trois configurations de jonction existent [4] :

- Jonction PN (jonction homotype ; les deux régions sont constituées du même matériau semi-conducteur, le silicium dans la plupart des cas).
- Hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents).
- Jonctions métal-semi-conducteur.

Les phénomènes physiques impliqués dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires dans ces trois types de jonctions.

C. Principe de la conversion photo-électrique :

Une cellule est constituée de deux couches minces de semi-conducteurs, comme le montre la Figure I.1, qui sont dopées différemment. Pour la couche N, c'est l'apport d'électrons périphériques, et pour la couche P, c'est le déficit d'électrons, il y a donc une différence de potentiel entre les deux couches.

L'énergie photonique captée par les électrons périphériques (N-couche) leur permet de franchir la barrière et de générer un courant continu. Pour collecter ce courant, des électrodes sont déposées sur les deux couches du semi-conducteur par sérigraphie. L'électrode supérieure est une grille qui laisse passer la lumière. Une couche antireflet est en suite déposée sur cette électrode pour augmenter la quantité de lumière absorbée [5]. Lorsque des porteurs de charge sont générés à proximité de la jonction par photo-excitation, la création d'une différence de potentiel permet à la cellule d'agir comme un générateur lorsque les deux faces de la cellule sont électriquement connectées à une charge.

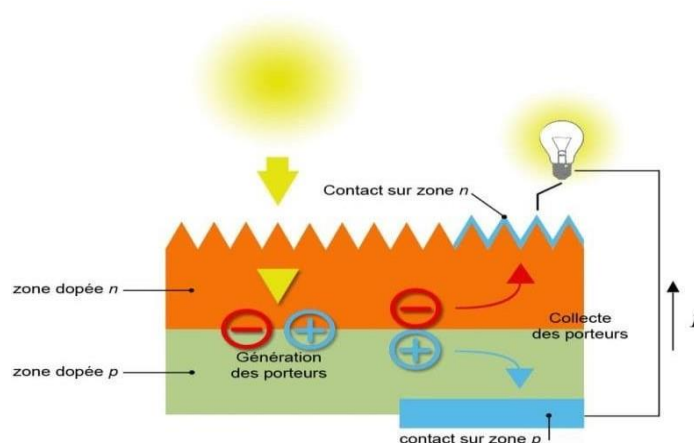


Figure I.1 : conversion photo-électrique.[6]

D. Technique de dopage :

Le dopage est une technique d'obtenir une jonction PN. Cela implique d'introduire des impuretés dans le cristal intrinsèque pour modifier ses propriétés électriques. Les semi-conducteurs dopés sont appelés « semi-conducteurs extrinsèques ».[7]

Il existe deux types de dopage : le type N (négatif) et le type P (positif).

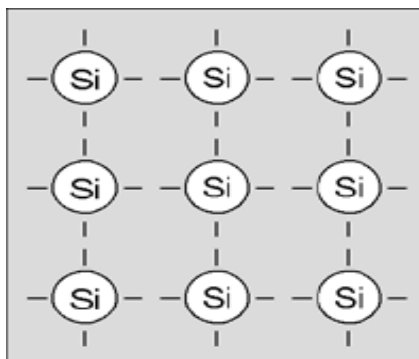


Figure I.2 :Silicium pur (intrinsèque)[8]

Dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à ajouter un atome de phosphore à la structure cristalline du silicium. Le phosphore, qui possède 5 électrons sur sa couche externe d'électrons, va se lier à 4 atomes de silicium, laissant un électron libre : cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globalement négative.[7]

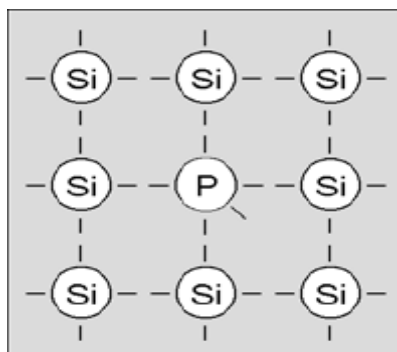


Figure I.3 :Silicium dopé N [8]

Dopage de type P :

Le dopage de type P consiste à ajouter des atomes de bore à la structure cristalline du silicium. Le bore, qui possède 3 électrons sur sa couche électronique externe, va se lier avec 4 atomes de silicium en laissant un trou : cet ajout a pour effet de donner à la structure cristalline une charge globale positive.[7]

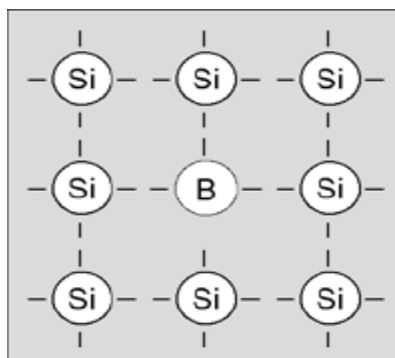


Figure I.4 :Silicium dopé P [8]

Les 3 méthodes de dopages :

- **LA DIFFUSION :**

Utilisation d'un four, dans le quelle gaz de la solution de dopage est injecté pour le silicium. Avec la chaleur, le dopant a suffisamment d'énergie pour pénétrer dans la tranche de silicium. Cette méthode est ancienne et nécessite une température uniforme à l'intérieur du four.[7]

- **LE CROISSECE EPITAXIALE :**

Cette méthode utilise toujours un four, mais cette fois les atomes du dopant sont déposés sur le silicium sous forme de **wafer**. Il ya donc dépôt en surface plutôt qu'insertion pour la méthode de dopage par diffusion. La température du four doit être d'environ 1200°C. [7]

- **LE BOMBARDEMENT IONIQUE :**

Une source (appelée faisceau d'ions énergétiques) produit des ions, ces ions sont ensuite accélérés, et avec un contrôle très précis, ces ions se positionnent sur le wafer. L'avantage de ce principe est qu'elle fonctionnement s'effectue à température ambiante. L'inconvénient de cette technique est qu'elle peut endommager le silicium, entraînant des réarrangements indésirables de structure cristalline, nécessitant ainsi une recristallisation ultérieure.[7]



Figure I.5 : chaîne fabrication du photovoltaïque [9]

Le silicium est la ressource la plus présente après l'oxygène. Il compose jusqu'à 27% de notre croûte terrestre.

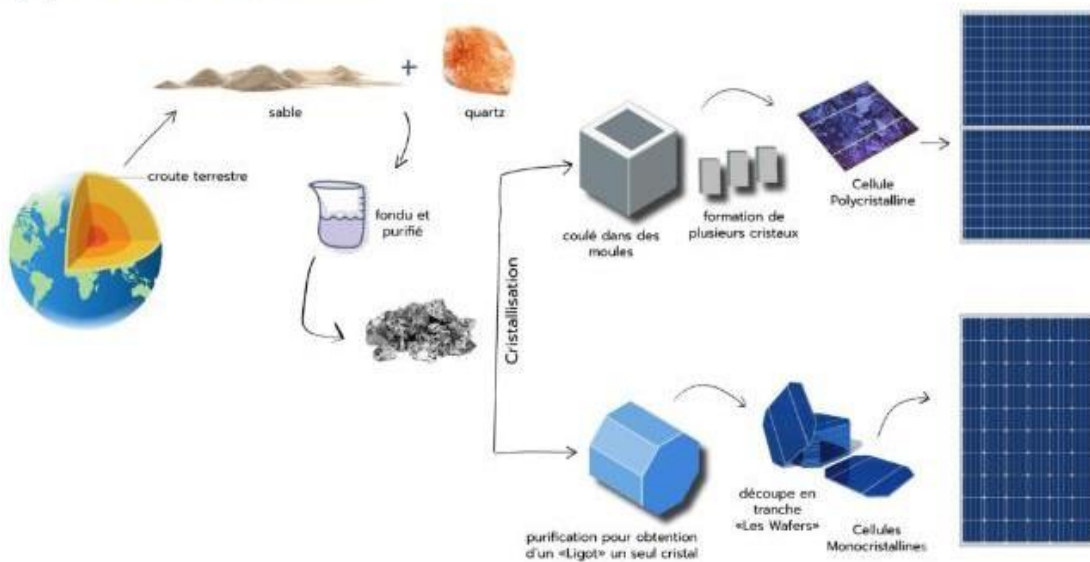


Figure I.6 : Voie de fabrication du photovoltaïque [10]

Types de cellules et panneaux photovoltaïques :

Dans les prochains paragraphes, nous aborderons certains types communs de panneaux photovoltaïques basés sur plusieurs sites Web et documents qui seront mentionnés dans la liste de référence.

Ces types varient en termes de fabrication et d'efficacité et nous discuterons de certaines différences entre eux.

Photovoltaïque au silicium cristallin :

Ces types de plaques sont les plus communs et les plus couramment utilisés, tandis que d'autres sont en cours d'étude dans les laboratoires.

a. Monocristallin :

Le silicium monocristallin est le matériau de base des puces de silicium utilisées dans presque tous les appareils électroniques aujourd'hui. Dans le domaine de l'énergie solaire, le silicium monocristallin est également utilisé dans la fabrication de cellules photovoltaïques en raison de sa capacité à absorber le rayonnement. Le silicium monocristallin est fabriqué à partir de silicium dont le réseau cristallin est continu dans tout le solide. Cette structure cristalline ne se brise pas sur ses bords et ne présente pas de joints de grains.

Le silicium monocristallin est généralement produit par l'un des nombreux processus qui impliquent la fusion de silicium de qualité semi-conducteur de haute pureté et l'utilisation d'un germe cristallin pour initier la formation d'un monocristal continu.

Le processus se déroule généralement dans une atmosphère inerte (comme l'argon) et dans un creuset inerte (comme le quartz). De cette manière, les impuretés affectant l'homogénéité du cristal sont évitées. Le silicium monocristallin est généralement produit par l'un des nombreux processus qui impliquent la fusion de silicium de qualité semi-conducteur de haute pureté et l'utilisation d'un germe cristallin pour initier la formation d'un monocristal continu.

Le processus se déroule généralement dans une atmosphère inerte (comme l'argon) et dans un creuset inerte (comme le quartz). De cette manière, les impuretés affectant l'homogénéité du cristal sont évitées.[11]

Typiquement, un panneau de 0,5 m² avec 36 cellules de batterie 100 cm², produit 60 W à 15 V lorsqu'il est exposé à 1000 W/m². Notez que les cellules solaires en silicium cristallin sont assez Fragile et nécessite systématiquement une encapsulation, au moins pour le renforcement mécanique. Cela va de pair avec son utilisation exclusive en extérieur, qui s'explique par ses bonnes performances en plein soleil. Le silicium amorphe, quant à lui, offre différents degrés de protection à l'extérieur et à l'intérieur (et donc pour l'éclairage naturel et artificiel).[1]. Une

efficacité de laboratoire à cellule unique de 26,7 % a été enregistrée pour ce silicium. Cela signifie qu'il a le rendement de conversion confirmé le plus élevé de toutes les technologies photo voltaïques commerciales.

Les cellules monocristallines sont plus chères que les cellules polycristallines. Par conséquent, les cellules en silicium monocristallin conviennent aux applications où les contraintes de poids ou de surface sont principalement une préoccupation.

Des panneaux de ce type sont utilisés, par exemple, dans des engins spatiaux ou des satellites alimentés par l'énergie solaire. De plus, dans ces cas, l'efficacité peut être encore améliorée en combinant d'autres technologies telles que les cellules solaires multicouches.[11]

b. Poly- cristallin :

Le poly silicium est un matériau constitué de silicium cristallin (poly cristallin) désaligné. Il se situe au milieu entre le silicium amorphe, qui n'a pas d'ordre à longue portée, et le silicium monocristallin. Le poly silicium a des niveaux d'impuretés de parties parmi liardeur moins. La majeure partie du poly silicium mondial est produite sous la forme de tiges cylindriques grises avec des surfaces rugueuses et dendritiques. Généralement, les tiges sont cassées en morceaux et emballées dans des sacs propres en polyéthylène épais (5-10 kg). Les tiges fendues sont en forme de coquille, ressemblant à des plis de matériau amorphe. Le découpe des tiges de poly silicium est généralement étudiée en contrôlant la qualité du silicium produit et en analysant l'avancement du processus.[11]

Les cellules poly cristallines ont des rendements allant de 12% à 21%. Ces cellules solaires sont fabriquées en recyclant des composants électroniques mis au rebut, ou "copeaux de silicium", et en les refondant pour obtenir une composition dense et cristalline. Ces résidus de silicium sont fondus dans un Creus et pour former un composé homogène, qui est ensuite refroidi, entraînant une cristallisation se développant verticalement. Environ 150-200 kg de pain sont alors obtenus, qui sont ensuite découpés verticalement en lingots parallélépipédiques. Faites une autre coupe, cette fois horizontalement, pour obtenir une coupe similaire à l'épaisseur de la plaquette de silicium monocristallin. Dans ce cas également, la plaquette est nettoyée avec des connexions soudées puis dopée au phosphore pour créer une jonction PN.[11]

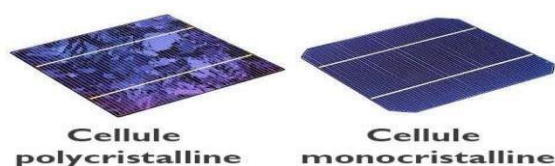


Figure I.7 :cellules poly et mono cristalline [12]



Figure I.8 :comparatif entre panneaux poly et mono cristalline [12]

Photovoltaïque à couche mince :

Les cellules solaires à couches minces sont la deuxième génération de cellules solaires. Ces cellules sont construites en déposant une ou plusieurs couches **de** matériaux photovoltaïques à couches minces (TF) sur des substrats tels que le verre, le plastique ou le métal. L'épaisseur du film varie de quelques nanomètres (nm) à des dizaines de micromètres (μm). Le film est beaucoup plus fin que les cellules solaires conventionnelles en silicium cristallin (c-Si) de première génération, qui utilisaient des tranches aussi épaisses que 200 μm . Cela rend les batteries à couche mince plus flexibles et plus légères.

Il est utilisé pour construire des systèmes photovoltaïques intégrés se test utilisé comme matériau **de** verre photovoltaïque translucide qui peut être laminé dans des fenêtres. En raison de leur légèreté, ces cellules solaires sont également un bon choix pour une utilisation dans les engins spatiaux.

Les cellules solaires à couches minces sont **généralement** classées en fonction des matériaux photovoltaïques utilisés. Selon ces critères, les types suivants de cellules photovoltaïques à couches minces ont été trouvés. [11]

- Silicium amorphe (a-Se) et autres silicones à couche mince (TF- Se)

Autre types :

- Tellure de cadmium (CdTe)
- Séléniure de cuivre et d'indium de gallium (CIS ou CIGS)

- Cellules solaires sensibles aux couleurs (DSC) et autres cellules solaires organiques.
- Arséniure de gallium (GaAs)



Figure I.9 :module à couche mince.[7]

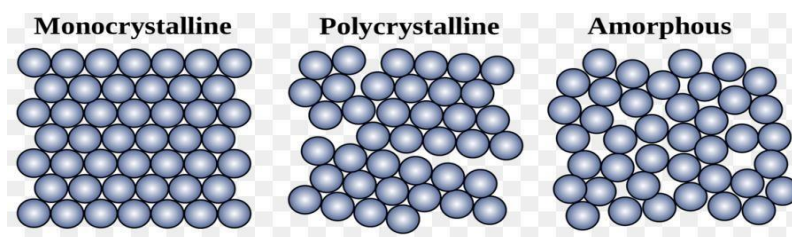


Figure I.10 :comparatif entre panneaux cristalline et amorphe [13]

Fonctionnement électrique d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule fournit un certain courant aux bornes d'une différence de potentiel (ou "tension" dans le langage courant). Nous décrivons ici cette relation courant-tension (Figure I.11) Ceci détermine le fonctionnement électrique du générateur de et son couplage au récepteur.

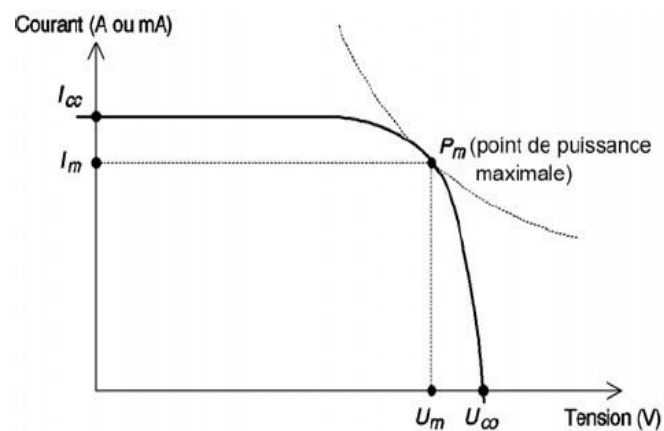


Figure I.11 :Courbe courant-tension d'une cellule.

Tension de circuit ouvert :

Si photopile est placée sous une source de lumière constante, Sans récepteur, il peut générer une tension à ses bornes La tension continue maximale est appelée tension en circuit ouvert U_{co} ou tension à vide. Elle est mesurée à l'aide d'un voltmètre. Pour une cellule élémentaire, cette tension est d'environ **0,7 V** (elle varie selon la technologie et l'éclairage). Un photo générateur étant une association de cellules élémentaires, La tension à vide U_{co} est généralement égale à :

$$U_{co} = n \times 0,7 \text{ V}$$

n : est le nombre de cellules.

La tension maximale que photo pile peut fournir L'éclairage considéré est de **4,2 V**. Cependant, dans cet état, photo pile Ne fournit aucun courant, ne peut alimenter aucun récepteur. Photo pile utilisée à une tension inférieure afin qu'elle fournisse la tension et le courant pour alimenter le récepteur.[1]

Courant de court-circuit :

Contrairement au point de circuit ouvert, lors du placement de photo générateur en court-circuit, il produit le courant maximum, mais ne produit pas de tension. C'est le courant qui peut être mesuré en se connectant directement à un ampèremètre. Le courant maxima là tension nulle est appelé courant de court-circuit. I_{CC}

Point de puissance maximale :

La meilleure utilisation des cellules solaires est pour Chargez à la tension maximale et au courant maximal. En effet, selon la formule $P = UI$, la puissance est maximale : doit être dans la condition où le produit UI est maximal : c'est le point de charge idéal pour les cellules solaires, soit le point de puissance maximale P_m

Il est d'usage d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondants A ce moment $P_m = U_m \cdot I_m$.

Puissance-crête et rendement :

La puissance maximale dépend de l'éclairement. Lorsque l'on parle de puissance maximale dans des conditions d'ensoleillement **STC** normalisées (**1000 W/m²**, **25°C**, spectre solaire **AM 1,5**), on parle de watt-crête (**W_c**) ou de puissance de crête.

Le rendement d'une photo générateur est le rapport entre la puissance électrique générée et la puissance lumineuse reçue par la photo génératrice :

$$\eta = \frac{P_m}{E S} \quad (\text{I.1})$$

S : est la surface de la cellule.

Cette efficacité peut être calculée pour différents éclairages, Mais la plupart du temps, il est donné dans des conditions **STC**. Calculez donc avec la **puissance crête** :

$$\eta = \frac{P_c}{1000 S} \quad (\text{I.2})$$

S : est la surface de la cellule.

Schéma équivalent d'un photogénérateur :

Nous venons de remarquer que c'est l'association avec le récepteur qui "force" le générateur de lumière à fonctionner à un certain courant et à une certaine tension. Contrairement à une idée reçue, photo générateur n'est donc pas tant un générateur de tension qu'un générateur de courant, du moins pour la partie exploitable de la caractéristique entre I_{cc} et P_m : en fait, c'est le courant qui est constant et non pas la tension. En dehors de P_m les courbes ne sont pas disponibles car la puissance chute très vite, par exemple si l'éclairement baisse il y a un risque d'absence de puissance du tout.[1]

En termes électroniques, on peut représenter une photopile (générateur) alimentant directement un récepteur de la façon suivante (Figure I.12)

G : est une source de courant idéale.

D : est une diode qui incarne le fait que le courant ne circule que dans un sens.

R_{sh} : est une résistance shunt qui tient compte des pertes inévitables Le courant électrique qui se produit entre les bornes positive et négative opposées d'une cellule solaire (en particulier un micro-court-circuit dans le silicium).

R_s : est la résistance série due aux différentes résistances (résistance intrinsèque des couches, résistance des contacts) rencontrées par le courant le long de son parcours.

R_u : est l'impédance du récepteur qui impose le point de fonctionnement sur la photopile en fonction de sa caractéristique courant tension à l'éclairement considéré (dans le cas où le récepteur est assimilable à un résistor).[1]

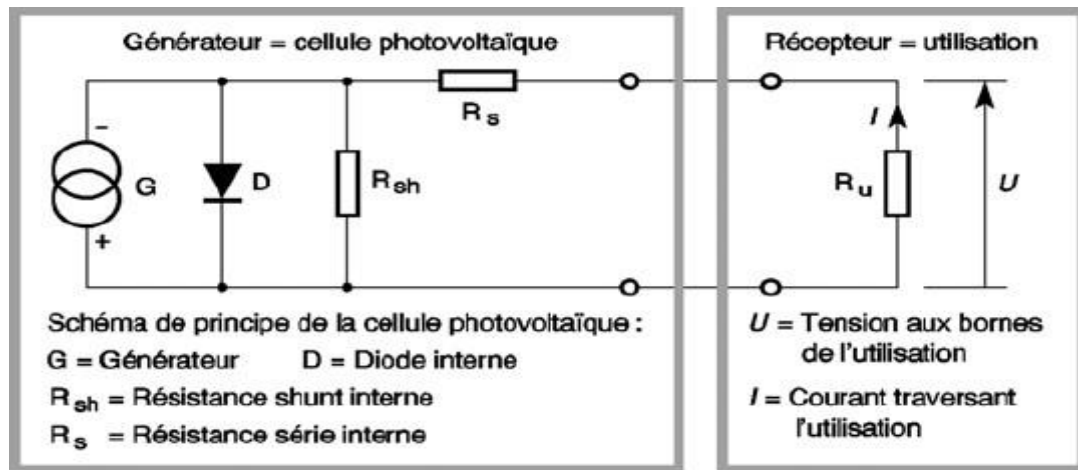


Figure I.12: Schéma équivalent d'un photo-générateur couplé à un récepteur.[1]

Vue d'ensemble des forces de dépôt et d'adhérence des particules :

La vitesse à laquelle les particules de poussière s'accumulent sur la surface photovoltaïque peut être considérée comme le résultat net des trois processus suivants :

1. Dépôt : particules de l'atmosphère qui touchent la surface
2. Rebond : rebondir immédiatement de la surface sans adhérer
3. Remise en suspension : remise en suspension par le vent

Taux d'accumulation = Taux de dépôt - Taux de rebond - Taux de resuspension

Le dépôt de particules est principalement contrôlé par la gravité (sédimentation) et la turbulence du flux d'air (dépôt inertiel). Si la vitesse du vent est supérieure à environ **3 m/s**, le taux de dépôt des particules peut s'expliquer adéquatement par la sédimentation seule. Ce processus de sédimentation peut être modélisé approximativement par la vitesse de décantation de Stokes dans l'équation suivant :

$$v_{st} = \frac{\rho d^2 g}{18\mu} \quad (I.3)$$

On :

ρ : densité des particules

d : diamètre des particules

g : accélération de gravité

μ : viscosité dynamique de l'air

Le flux de dépôt pour chaque catégorie de taille de particule est obtenu en multipliant cette vitesse par la concentration en suspension dans l'air de particules de cette taille. Il n'existe pas de modèle prédictif largement utilisé pour le rebond des particules. Théoriquement, les particules devraient rebondir de la surface si leur énergie cinétique à l'impact dépasse le travail d'adhésion entre la particule et la surface. Par conséquent, la fraction de rebond devrait être plus élevée pour les grosses particules, la vitesse élevée du vent et le faible taux d'humidité. Pour la resuspension (élimination des particules par le vent), trois mécanismes différents sont pris en compte : le roulement, le glissement et le décollement direct.

Les forces d'adhérence typiques des particules comprennent celles énumérées ci-dessous par ordre décroissant d'importance :

Forces capillaires pour les propriétés hydrophiles (angle de contact = 0°) et hydrophobes (angle de contact $>150^\circ$) de la surface du verre;

- Van der Waals assure une surface en verre lisse et rugueuse;
- gravité (poids de la sphère);
- Forces électrostatiques en supposant une charge moyenne de particules au niveau de Boltzmann équilibre.

De plus, les modes de décollement possibles en cas de vent fort (>10 m/s ou 36 km/h) comprennent :

- Roulement (Rolling)
- Glissant (Sliding)
- Décollement (Lift off)

Étonnamment, en comparaison avec les forces d'adhérence capillaires et van der Waals, la gravité et les forces électrostatiques peuvent être omises. Nous pouvons également conclure que les forces de glissement et de roulement augmentent considérablement selon la taille des particules. La force de levage est négligeable lorsque les particules ont un diamètre inférieur à $50\text{ }\mu\text{m}$. [38]

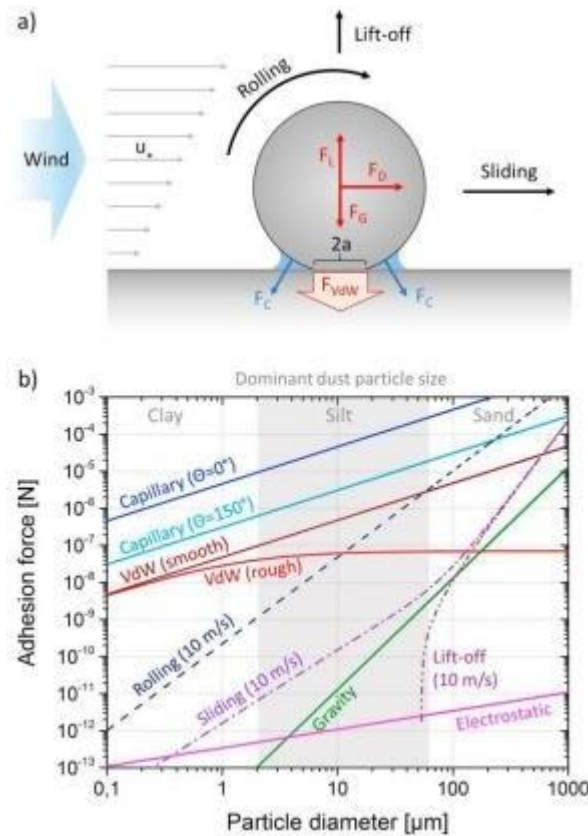


Figure I.13 : a) Illustration schématique et simulation de l'adhérence et de l'enlèvement des particules pour une sphère SiO₂ sur le verre solaire. b) Les forces d'adhérence et les forces d'enlèvement (lignes pointillées) sont en fonction du diamètre des particules. .[38]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous présentons les enjeux et les évolutions actuelles de la technologie photovoltaïque, puis introduisons le fonctionnement des photovoltaïques avec une brève explication du phénomène photovoltaïque (effet photovoltaïque). Nous avons vu que les cellules photovoltaïques ont une caractéristique $I(V)$ présentant un point de puissance maximale (PPM) caractérisé par le courant (I_{max}) et la tension (V_{max}). Nous avons introduit Parmi les différentes technologies de photo voltaïque actuellement sur le marché et/ou en développement, alors que le silicium est déclaré depuis des années, c'est cette dernière qui domine les autres. Garantir la pérennité des installations photovoltaïques destinées à produire de l'énergie électrique. Nous avons vu fabrication des panneaux de point vu du dopage avec une brève explication. Avec petit explication sur l'érosion de verre et leurs types. Nous avons vue loi de dépôt du particules expliquer l'accumulation de poussière par la vitesse des grains de poussière.

Chapitre II :
Dégradation des
modules
photovoltaïque

Introduction :

Dans ce chapitre, nous verrons sur la base de plusieurs références la dégradation des panneaux solaires. Les modules solaires photovoltaïques installés pour produire de l'électricité sont fortement influencés par les conditions météorologiques telles que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent, l'humidité et la saleté. L'accumulation de sable à la surface des modules photovoltaïques est un problème majeur, en particulier dans les régions arides avec des conditions climatiques difficiles et de vent de sable fréquentes.

II-1. Dégradation d'un module photovoltaïque :

Les performances des modules photovoltaïques peuvent être dégradées par plusieurs facteurs, à savoir la température, l'humidité, le rayonnement, le grain de sable et les chocs mécaniques. L'état de dégradation d'un module photovoltaïque peut s'avérer problématique lorsque la dégradation dépasse un seuil critique. Les fabricants de modules PV pensent que les modules PV se dégradent lorsque leur puissance atteint des niveaux inférieurs à 80 % de leur valeur initiale..[7]

II-1.1 Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques :

Comme le montre la Figure II-1, la dégradation d'un module PV affecte ses différentes parties. Ces différentes pièces sont : le verre, les interconnexions entre les cellules, le matériau d'encapsulation généralement l'éthylène acétate de vinyle (EVA), le film polymère protecteur généralement le Tedlar, et les adhésifs qui assurent la liaison entre les différents composants du module.[14,15]

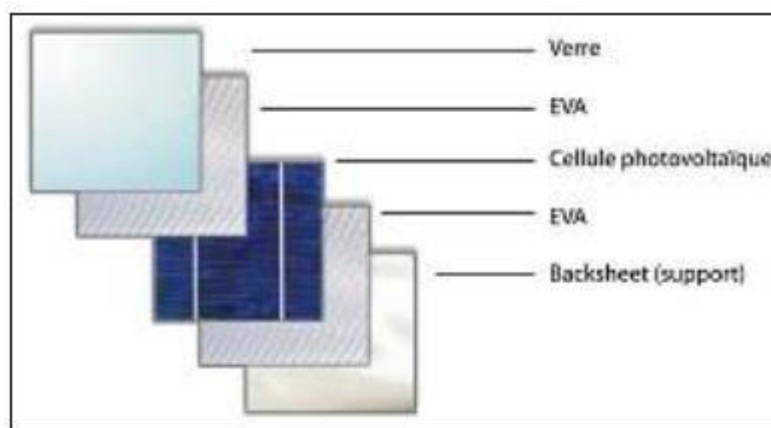


Figure II-1 : Les différents composants du module photovoltaïque soumis à la dégradation[15]

a. La corrosion :

L'humidité pénétrant dans le module PV par les bords stratifiés peut entraîner de la corrosion. La rétention d'humidité dans le boîtier du module augmente la conductivité du matériau. La corrosion peut attaquer les connexions métalliques des

cellules du module PV, provoquant une augmentation des courants de fuite et une perte de performance conséquente. Il réduit également l'adhérence entre les cellules et l'ossature métallique. La figure II-2 montre un module PV affecté par la corrosion des limites et de la boîte de jonction.[14]

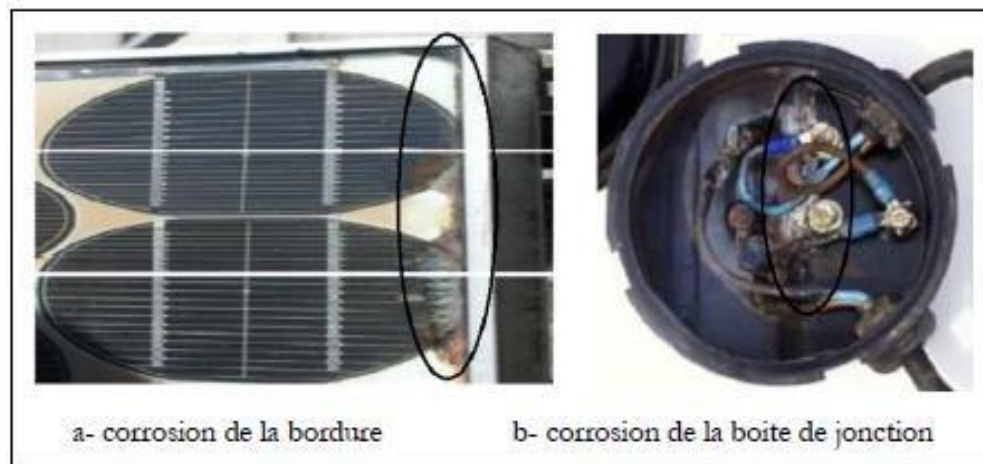


Figure II-2 : Module PV atteint par la corrosion. [14]

b. La délamination :

Le délaminage traduit une perte d'adhérence entre le polymère d'encapsulation et la cellule ou entre la cellule et la vitre frontale (verre). Elle représente un problème majeur, car elle entraîne deux effets : une augmentation de la réflexion lumineuse et une pénétration d'eau à l'intérieur de la structure du module. La stratification est plus fréquente dans les climats chauds et humides. Il facilite la pénétration de l'humidité dans le module et provoque diverses réactions chimiques à l'intérieur du module.[14]

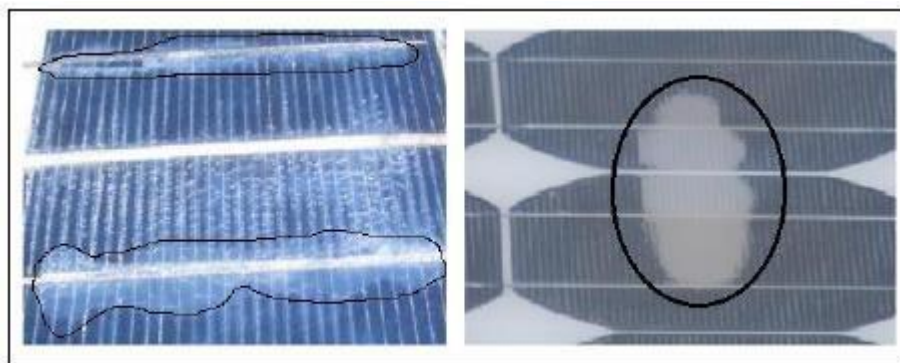


Figure II-3 : Module PV présente une délamination. [14]

c. La décoloration :

La décoloration du module photovoltaïque se traduit par un changement de couleur du matériau utilisé pour son encapsulation. Ce changement de couleur peut se traduire soit par un jaunissement soit par un brunissement du matériau encapsulant. Elle provoque une modification de la transmissibilité de l'encapsulant des cellules et par conséquent la puissance générée par le module est diminuée. Elle est due principalement aux rayons ultraviolets combinés à l'eau sous des températures supérieures à 50°C qui va engendrer un changement de la structure chimique du polymère.[14]



Figure II-4 : Module PV avec cellules colorées . [14]

d. Les fissures et bris de verre :

Les bris de verre et fissures constituent un facteur important de dégradation des modules PV. Ils surviennent dans la plupart des cas lors des opérations d'installation, de maintenance et surtout de transport des modules sur les sites d'installation. Le module présentant des fissures ou des cassures peut toutefois continuer à produire de l'énergie. La Figure II-5 montre un module photovoltaïque en silicium polycristallin fissuré lors de sa première mise en service.[14]

Il est généralement impossible de détecter à l'oeil nu les fissures de cellules sur le module déjà opérationnel.

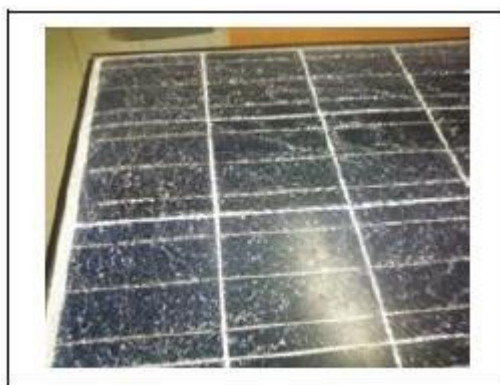


Figure II-5 : Module PV présentant des bris de verre. [14]

e. Les points chauds ou Hot-spots :

Un module photovoltaïque est une association de cellules en série/parallèle. Sa caractéristique globale peut varier en fonction de l'éclairement, la température, du vieillissement des cellules et les effets d'ombre ou d'inhomogénéité de l'éclairement. Lorsque le courant débité est supérieur au courant produit par la cellule défectueuse ou faiblement éclairée, la tension de celle-ci devient négative et elle se comporte en récepteur.[14]

Lorsque tout ou partie de la cellule solaire est ombragée, la cellule développe une résistance interne. La batterie devient alors consommatrice d'électricité. La surchauffe des batteries peut endommager le matériau d'encapsulation (EVA) et la feuille de fond (TPT), et même provoquer des incendies électriques, appelés points chauds ou "points chauds".[7]



Figure II-6 : Module PV présentant des points chauds sur les bords des coins supérieurs. [14]

f. Les bulles :

Les bulles sont généralement dues aux réactions chimiques qui dégagent des gaz dans le module et qui se retrouvent piégés à l'intérieur de celui-ci. Ce type de dégradation est similaire à la délamination, mais dans ce cas, la perte d'adhérence de l'Éthylène Vinyl Acétate (EVA) affecte uniquement une petite surface du module et est combinée à un gonflement de la surface dont l'adhérence a été dégradée. Le détachement de la cellule du verre soit à l'origine des bulles.[14 ,7] Ils apparaissent généralement au centre de la cellule et peuvent être dus à une mauvaise adhérence des cellules due aux températures élevées. Lorsque cela se produit à l'arrière de l'assemblage, le polymère d'encapsulation se colmate et des bulles se forment. Ils rendent plus difficile pour les cellules de dissiper la chaleur, augmentant leur surchauffe et accélérant leur vieillissement.[7]

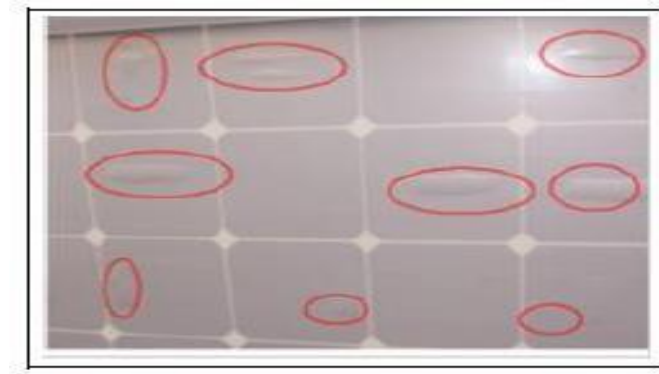


Figure II-7 : bulles présente sur la face arrière d'un module PV

II-1.2 Les moyens de détection de la dégradation du module photovoltaïque :

Bien que certains moyens de détection existent, cela reste très difficile lorsque le module est déjà en cours d'exécution.

a. Inspection visuelle :

L'inspection visuelle est la première technique de détection des dégradations d'un module photovoltaïque. Elle peut permettre de détecter à l'oeil nu certaines dégradations tels que la décoloration, la délamination, les bulles, les fissures dans les cellules et les points chauds. Un éclairage d'au moins 1000. [7,14]

b. Mesure de la puissance :

Le principal indicateur de la dégradation d'un module photovoltaïque est la diminution de la puissance produite. Cependant, la baisse de puissance n'est pas toujours détectée au sein d'un système PV constitué d'un ensemble de modules. Pour ce faire, un test de puissance doit être plutôt appliqué individuellement aux modules

PV suspects. Afin de détecter une chute de la puissance d'un module, une mesure de puissance dans les conditions standards de test (STC) doit être effectuée.

Les conditions standards de test sont caractérisées par :

- Irradiance : 1000 W.m⁻²,
- Température du module : 25 °C,
- Répartition spectrale du rayonnement : AM1.5.

Les conditions standards de test (STC) sont différentes des conditions de fonctionnement réel des modules photovoltaïques. En effet, habituellement la température des modules sera supérieure à 25°C, et le rayonnement n'aura pas le même spectre ni la même intensité durant les mesures. Une méthode plus réaliste basée sur des mesures effectuées dans des conditions plus proches du fonctionnement réel et différentes des conditions standard de test a été proposée. [7,14]

Il existe plusieurs autres moyens non destructifs, notamment :

- Imagerie infrarouge.
- Thermographie.
- Imagerie par électroluminescence et photoluminescence.
- Résonance de vibrations ultrasoniques.

Influence de Facteurs météorologiques sur PV :

Dans cette partie, nous allons parler de certains facteurs météorologiques affectant les panneaux photovoltaïques brièvement basé sur plusieurs études et divers mémoires de recherche.

a. Température :

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques car les caractéristiques électriques des semi-conducteurs sont très sensibles à la température. La figure II-8 montre les caractéristiques I-V et P-V d'un module PV en fonction de la température sous un éclairage constant. Il montre que plus la température augmente, plus le rendement ne diminue.

Une augmentation de la température entraîne une diminution significative de la tension en circuit ouvert tandis que le courant de court-circuit évolue peu avec l'augmentation de la température. En général, une augmentation de la température entraîne une diminution importante de la puissance.[17]. Les cellules photovoltaïques convertissent une petite fraction (environ moins de 20 %) du rayonnement en électricité et le reste en chaleur. La Surchauffe des composants est principalement causée par un rayonnement solaire excessif et une température ambiante élevée. La température du module est un paramètre qui a une grande influence sur le comportement des systèmes photovoltaïques, car elle affecte considérablement l'efficacité du système et la production d'énergie.

Le principal effet de l'augmentation de la température de la batterie est que la tension en circuit ouvert diminue de manière linéaire avec l'augmentation de la température de la batterie. Pour chaque augmentation de 1 °C de la température de fonctionnement, la tension de la cellule diminue d'environ 2,2 mV, de sorte que l'efficacité d'une cellule PV cristalline diminue d'environ 0,5 %.[16]

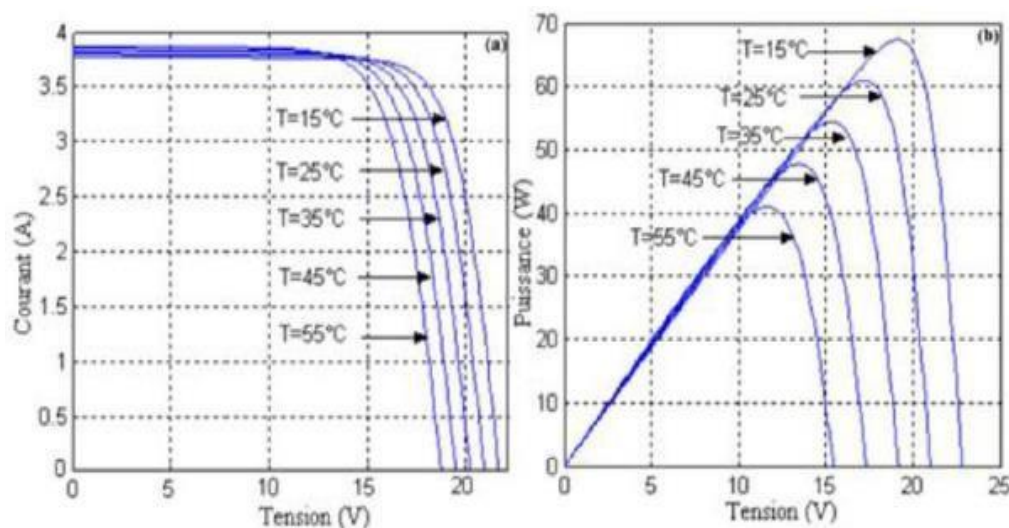


Figure II-8 : Caractéristiques d'un module PV pour différentes températures à ensoleillement constant. (a) I-V, (b) P-V.

b. L'ensoleillement :

L'intensité du rayonnement solaire reçu sur n'importe quel plan à un moment donné, ou la puissance reçue par une surface, s'appelle l'éclairement et s'exprime en watts par mètre carré (W/m^2). Le rayonnement solaire se présente sous la forme d'un rayonnement électromagnétique dont la longueur varie de $0,2 \mu\text{m}$ (ultraviolet) à $10 \mu\text{m}$ (infrarouge). Lorsqu'un module PV est posé, la valeur d'éclairement énergétique reçue par sa surface varie en fonction de la position de celle-ci. Les rayons du soleil atteignent leur intensité maximale lorsque le plan du module PV est perpendiculaire aux rayons du soleil... L'énergie photovoltaïque est basée sur la conversion directe du rayonnement solaire en courant électrique à l'aide de semi-conducteurs comme le silicium cristallin.[16]

L'ensoleillement est **un** paramètre affectant les caractéristiques (tension-courant) et (tension-puissance) des panneaux photovoltaïques, comme le montre la Figure I-9. En effet, une augmentation du flux lumineux entraîne une augmentation du courant de court-circuit (I_{cc}), de la tension à vide (I_{co}) et de la puissance maximale (P_{max}). Mais le courant de court-circuit augmente plus que la tension en circuit ouvert.[7]

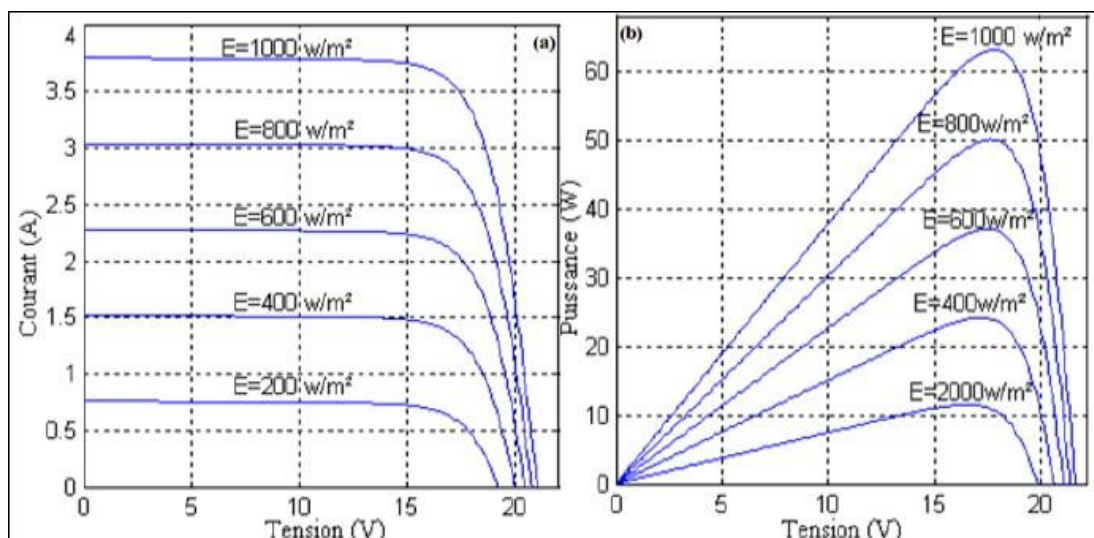


Figure II-9 : Caractéristiques d'un module PV pour différents ensoleillements à température constante. (a) I-V, (b) P-V.[17]

c. Ombre :

Généralement, il existe deux types d'ombrage au sol sur les modules photovoltaïques, appelés ombrage dur et ombrage doux. Les ombres molles se produisent lorsque quelque chose comme le smog est dans l'air, et les ombres dures se produisent lorsque des objets solides comme la poussière accumulée bloquent la lumière du soleil. Les résultats ont montré que l'ombrage doux affectait le courant du module PV, mais la tension est restée la même.

En cas d'ombrage grave, la performance du module photovoltaïque dépend de l'ombrage de certaines cellules ou de l'ombrage de toutes les cellules du module photovoltaïque.

Si certaines cellules sont ombrées, la tension produite par le module PV diminuera tant que les cellules non ombrées recevront un rayonnement solaire. Il est recommandé d'améliorer l'efficacité, de nettoyer une fois par semaine pendant la saison sèche et une fois par jour si l'accumulation de poussière est grave. La puissance de sortie des panneaux PV est réduite en raison de l'effet d'ombrage.

Parfois, les taches au sol telles que les feuilles, les excréments d'oiseaux et les taches peuvent bloquer certaines cellules d'un module photovoltaïque au lieu du module entier, ce qui peut sérieusement affecter le module photovoltaïque. [18]



Figure II-10 : ombres des arbres sur les panneaux photovoltaïques [19]

d. Humidité :

Peu d'information sur l'effet de l'humidité, mais une étude [20] Montre les changements de comportement des systèmes à couches minces fonctionnant dans des conditions humides. La tension de circuit ouvert et le courant de court-circuit augmentent avec l'augmentation de l'humidité, et la puissance de sortie maximale augmente également avec l'augmentation de l'humidité.

e. Pluie et rosée :

Pour un angle d'inclinaison $\alpha \leq 30^\circ$, la goutte n'affecte pas les performances de la cellule PV.

Cependant, pour des angles d'inclinaison $\alpha > 30^\circ$, la présence de gouttelettes peut entraîner une diminution significative de la puissance de crête et de l'efficacité de conversion d'énergie des cellules PV, en particulier pour les grands angles de contact des gouttelettes et/ou la couverture de surface.

Cette baisse de performance est attribuée au fait que la lumière incidente est rétrodiffusée par la gouttelette plutôt que d'être capturée par réflexion interne totale à l'interface air couvant avant d'être finalement absorbée par la cellule solaire. [21 ,22]

Il a été constaté que la présence de rosée augmente l'adhérence des poussières et des particules à la surface des cellules photovoltaïques, réduisant ainsi leurs performances et augmentant les coûts de maintenance.



Figure II-11 : Photo d'une cellule solaire PV recouverte de gouttelettes d'eau [21]

f. Encrassement :

L'accumulation de grain sable peut obstruer les panneaux solaires. Dans la plupart des cas, la surface du panneau sera emportée par les précipitations ; cependant, la saleté restera parfois même après de fortes pluies.

La partie la plus critique du module est le bord inférieur, en particulier sur les faibles pentes où une contamination peut se produire sur le bord du cadre.

Cette accumulation de saleté peut entraîner l'ombrage des cellules, ce qui réduit généralement la puissance disponible pour le module d'environ 1 % ; cependant, si le module est nettoyé, le courant sera rétabli.



Figure II-12 : module encrassé. [16]

g. Le vent :

Les petites vibrations dans le système causées par les rafales sont importantes à long terme. À des distances plus courtes, il n'est pas rare que les modules se déchirent de leur position lorsque le vent est fort. Mais le vent a aussi un côté positif, car il facilite les échanges de chaleur entre l'appareil et le monde extérieur, ce qui contribue à réduire sa température de fonctionnement [24] ainsi qu'à augmenter la puissance et l'efficacité en fonction de sa vitesse.

Ainsi, nous pouvons transformer l'action du vent en un agent de ventilation pour les cellules des modules PV, et une solution de refroidissement pour augmenter la puissance de sortie des panneaux solaires.

L'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie :

Pour maximiser la puissance d'une installation photovoltaïque, les modules doivent être orientés de manière optimale afin de capter le maximum de rayonnement solaire. En effet, la direction du soleil compte.

a. L'angle d'incidence :

Cela correspond au plan formé entre le panneau photovoltaïque et le lumineaire (Figure II-13). Cet angle est très important. L'angle d'incidence optimal correspond à un angle de 90°.

Chaque fois que cet angle est réduit ou augmenté, la surface (en mètres carrés) du panneau solaire exposée à la lumière diminue, et donc l'efficacité, à partir de la puissance du panneau solaire, diminue.

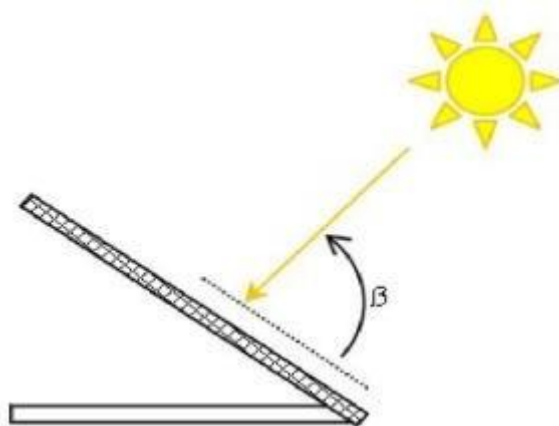


Figure II-13 : Angle d'incidence sur un module photovoltaïque

L'angle d'incidence joue un rôle important dans le rendement du panneau. Il est défini selon l'équation suivante :

$$R = 100 \times \sin \beta \quad (\text{II .1})$$

Le graphique ci-dessous montre comment l'efficacité varie avec l'angle d'incidence :

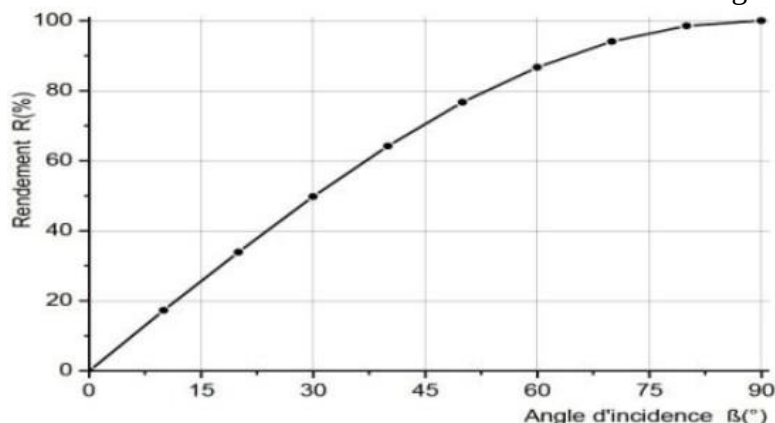


Figure II-14: Rendement des modules PV en fonction de l'angle d'incidence

Par conséquent, le rendement est le plus élevé lorsque la lumière atteint le module PV verticalement (90°).

Pour un angle de 45° , le rendement n'est que de 70 %.

b. L'angle d'inclinaison :

L'angle d'inclinaison correspond à l'angle formé par le plan du module solaire par rapport au plan horizontal.

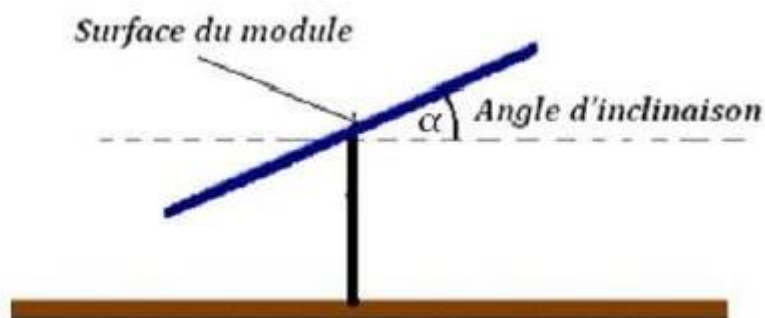


Figure II-15: Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques

Évolution saisonnière de la trajectoire du soleil, l'inclinaison (pour les modules PV non équipés d'un système de rotation) est plus petite en été et plus grande en hiver.

L'angle d'inclinaison du module photovoltaïque par rapport au plan horizontal est donné par la relation suivante [1, 2].

$$\alpha = L - \sin^{-1} \left(0.4 \left(\frac{N \times 360}{365} \right) \right) \quad (\text{II.2})$$

Où L est la latitude du lieu et N est le nombre de jours entre l'équinoxe vernal (le 21 mars de chaque année) et la date considérée.

Remarque :

Cette relation qui permet un meilleur **rendement** n'est valable que si le module solaire **en question est équipé d'un système permettant son inclinaison**. Cependant, de tels systèmes sont **rare**s.[23]

Chapitre II : Dégradation des modules photovoltaïque

Laghouat est situé dans l'hémi-terre nord, donc les panneaux solaires sont dirigés vers le sud. Après application des relations de la référence [44] et compte tenu de la latitude de Laghouat comme $L = 33,7972551$ [45, 46] on arrive aux résultats suivants :

Tableau II.1 : Relations pour calcul l'angle d'inclinaison pour latitude entre 25/50

Saisons	Angle d'inclinaison
Hiver	$(L \times 0.88) + 19$
Eté	$(L \times 0.93) - 21$
Printemps et Automne	$(L \times 0.76) + 3$

Tableau II.2 : Angle d'inclinaison pour la région de laghaout

Saisons	Hiver	Printemps	Eté	Automne
Angle inclinaison	48.74	31.68	10.43	31.68

Effet de vent sable sur les panneaux photovoltaïques :

Si elle est exploitée efficacement, l'énergie solaire photovoltaïque pourrait être une solution pour l'électrification, le pompage de l'eau et les communications dans des régions inaccessibles comme le sud de l'Algérie. Cependant, les panneaux solaires protégés par du verre utilisés à ces fins sont souvent soumis aux effets nocifs causés par le vent sable..[24]

Ce le vent sable a affecté de nombreux facteurs pour maximiser l'efficacité des panneaux photovoltaïques. Les plus importants de ces facteurs sont l'exposition au soleil, l'état de surface des panneaux (verre), la durée de vie de ces panneaux, l'ossature. La photo ci-dessous montre l'impact des tempêtes de sable sur les panneaux photovoltaïques :



Figure II-16: Photographie de modules PV propres et poussiéreux [25].

c. Effet du vent de sable sur l'éclairement solaire :

Les propriétés physicochimiques de l'accumulation de poussière, de la vitesse du vent, du temps d'exposition et de l'orientation des modules PV jouent un rôle important dans le taux de contamination [26,27], où le dépôt de poussière à la surface du module PV réduit la transmission du verre. Couverture, entraînant une mauvaise réception des cellules solaires. La quantité de rayonnement solaire reçue est considérablement réduite, ce qui entraîne une diminution des performances de production d'énergie des modules solaires photovoltaïques. [28-29].

La plupart des études montrent que les particules plus petites avec une surface spécifique sont réparties plus uniformément, réduisant les espaces entre les particules qui laissent passer la lumière. Il en résulte une dégradation importante des performances du module PV par rapport à celle provoquée par les particules grossières du nuage de poussière. [30,31]

Il y a aussi de la poussière dans l'atmosphère qui disperse le rayonnement solaire, réduisant ainsi la quantité de rayonnement solaire direct atteignant les éléments de transmission de lumière des modules solaires.[28]

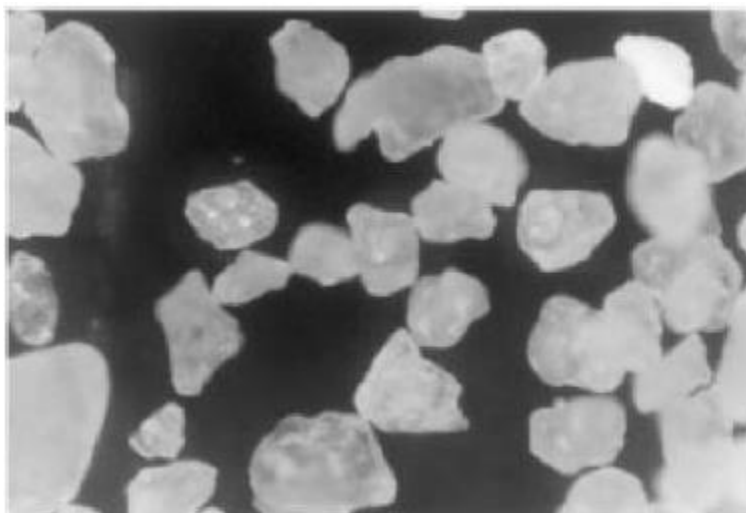


Figure II-17: Micrographie optique montrant les formes irrégulières des particules de sable.[24]

Cette répartition irrégulière de ces molécules affecte la surface du module photovoltaïque, donc la puissance délivrée. Pour une période d'exposition de dix mois (février à décembre), la densité de poussière calculée (poids des particules divisé par la surface du module) était de $6,184 \text{ g/m}^2$. Plus la densité de particules est élevée, moins le rayonnement solaire est transmis à la cellule solaire à travers le couvercle en verre du module. [28]

d. Effet du vent de sable sur état de la surface :

Dans le journal [24] Ils ont étudié l'effet du sablage sur l'efficacité des panneaux solaires, concentrant leurs travaux sur l'effet de la durée du sablage (jusqu'à 300 minutes) sur les propriétés mécaniques et optiques des panneaux de verre de protection. Efficacité des locaux et des panneaux solaires.

Chapitre II : Dégradation des modules photovoltaïque

Les observations de la surface exposée ont révélé le développement de petits cratères distribués au hasard et la formation de petites fractures transversales. Sous l'action de grains de sable continus, ces fines fissures se transforment en écailles, et ces microfissures transversales sur des matériaux fragiles sont le plus souvent causées par des particules tranchantes ou contondantes avec une force d'impact importante. Il semble également clair que les zones touchées varient en taille. L'intensité et l'étendue de ces défauts de surface augmentent avec la durée d'exposition au meulage.[24]

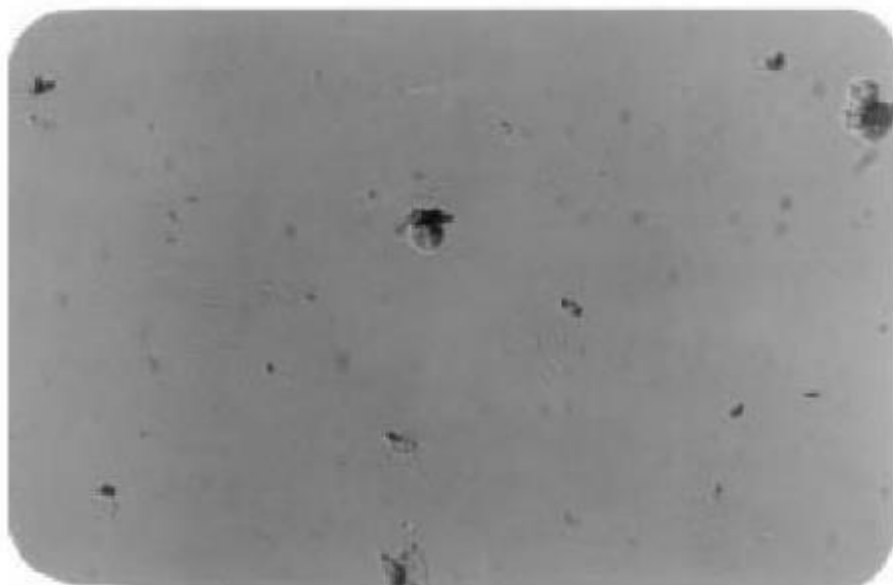


Figure II-18: Photographie optique d'une surface endommagée typique après une durée de 1 h.[24]

L'efficacité relative des panneaux en fonction du temps de sablage est représentée sur la figure ci-dessous, avec de légères baisses à 0,91 principalement liées à la présence de défauts de surface qui affectent la transmission lumineuse.

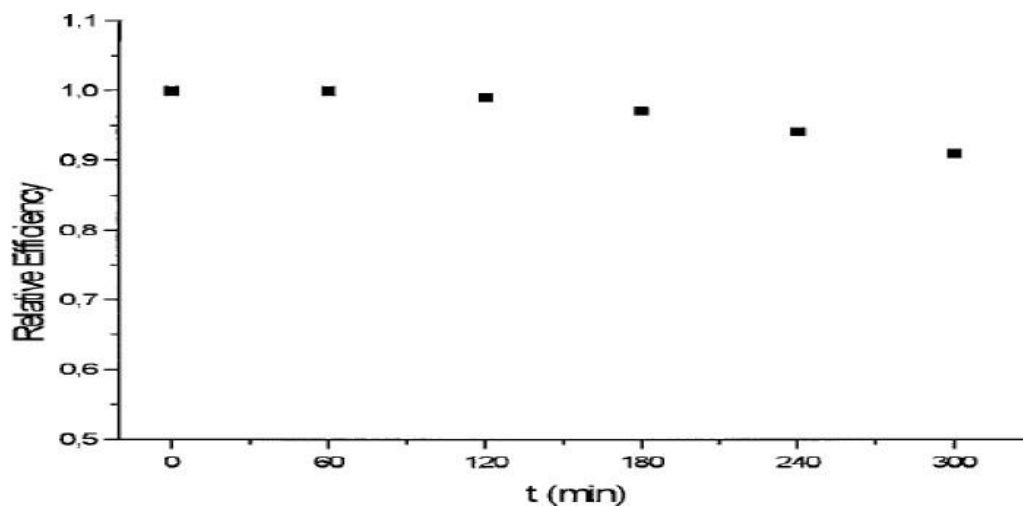


Figure II-19 : Variation de l'efficacité relative en fonction de la durée du sablage [24]

e. L'effet du vent de sable sur la durée de vie des panneaux :

La durée de vie technique des panneaux photovoltaïques est de 25 à 30 ans. Avec l'amélioration de la technologie de fabrication, la durée de vie des panneaux solaires peut atteindre 40 ans.[16]

De nombreuses raisons affectent la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Le premier concerne les dommages physiques causés par le vent, la grêle et le sable [33] ou, par exemple, la chute de branches d'arbres en raison des conditions météorologiques. La deuxième raison est une diminution continue des performances d'environ 0,5 % à 3 % par an en raison des cycles thermiques, de l'humidité et de l'exposition aux Ultra Violet [34]. Typiquement, ce déclin est le principal facteur limitant la durée de vie du panneau à 20-30 ans.

La surface du panneau photovoltaïque a un verre de protection qui protège les cellules solaires qui convertissent le rayonnement solaire en électricité, ce verre n'est pas suffisant pour assurer une protection car il s'abîme facilement. Les dommages permanents dus à l'effet de sable constituent un autre obstacle majeur à l'efficacité des panneaux solaires photovoltaïques. Les dommages mécaniques sont principalement causés par l'interaction des grains de sable avec la surface (effet de sable). Il a été démontré que l'action du sable affecte non seulement la résistance mécanique de la surface et sa durabilité, mais entraîne également une perte de transmission lumineuse par la formation de déformations locales et de fissures qui réduisent la transmission lumineuse. [34.24]

Conclusion :

Les performances des modules photovoltaïques peuvent être dégradées par plusieurs facteurs, à savoir la température, l'humidité, le rayonnement, le grain sable et les chocs mécaniques.

Les principaux modes de dégradation :

- La corrosion
- La délamination
- La décoloration
- Les fissures et bris de verre
- Les points chauds ou Hot-spots

Bien que certains moyens de détection existent, cela reste très difficile lorsque le module est déjà en cours d'exécution :

- Inspection visuelle
- Mesure de la puissance

Autres facteurs météorologie affectant les panneaux photovoltaïques :

- Ombre.
- Pluie et rosée
- Encrassement
- Le vent

Les modules PV doivent être orientés de manière optimale pour capter le maximum de rayonnement solaire à partir :

- L'angle d'incidence
- L'angle d'inclinaison

Le vent sable affecte de nombreux facteurs pour maximiser l'efficacité des panneaux photovoltaïques. Les plus importants de ces facteurs sont l'exposition au soleil, l'état de surface des panneaux (verre), la durée de vie de ces panneaux, et l'ossature.

*Chapitre III: Etude
de l'influence de
poussière et
application de la
loi du dépôt des
particules*

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Introduction :

Nous savons que le taux d'empoussièrement affecte l'efficacité des panneaux solaires, selon chaque région géographique et selon le type de poussière. Dans ce chapitre, nous verrons différentes études dans différentes régions sur l'effet de l'empoussièrement sur les panneaux solaires, et mesuré la vitesse des particules en fonction de leurs diamètres et en fonction des conditions de la région.

Présentation générale de la zone d'étude :

Au sud du pays, au sud des hauts plateau centraux, se trouve la région de Laghouat, située au pied de la saharien au nord et s'étendant jusqu'au plateau saharien au sud. Laghouat mêle naturellement hauts et bas, formant ainsi une zone tampon reliant le nord et le sud du pays (Anonyme 1, 1995). La région de Laghouat est à 400 kilomètres de la capitale, Alger. D'une superficie de 400 kilomètres carrés, elle s'étend de la région de Djelfa au nord, des régions de Touggourt et d'El Oued à l'est, de la région d'El Bayadh à l'ouest et de Ghardaia au sud. Coordonnées 33° 48' 24" nord, 2° 52' 56" est.

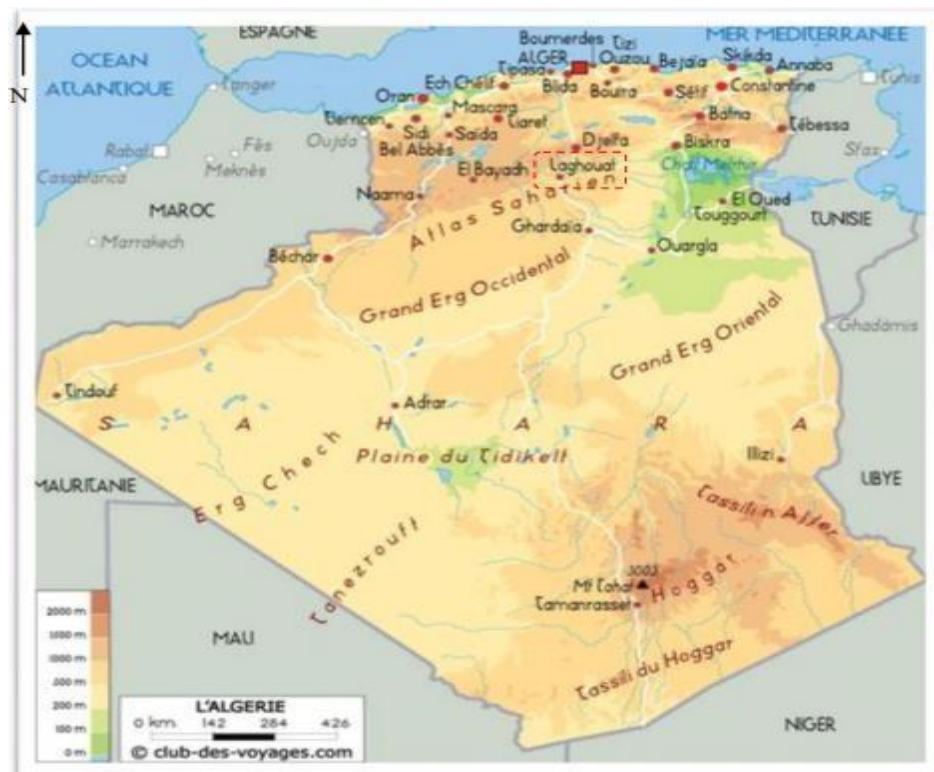


Figure III-1: Localisation de la wilaya de Laghouat (google.fr).[35]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Le vent :

Nous discutons dans cette partie des caractéristiques du vent de la direction et l'intensité et les statistiques de la zone étudiée.

Le vent et son origine :

L'air qui compose l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides. Sa composition est relativement constante à des altitudes inférieures à 100 km. Il est principalement composé d'azote et d'oxygène. La quasi-totalité de sa masse réside dans la basse atmosphère à des altitudes inférieures à 16 km.[16]

Caractéristiques du vent :

Pour l'ensemble de la Terre, à un endroit donné et au cours d'un cycle solaire, la puissance du vent est essentiellement constante à tout moment. La vitesse du vent, d'autre part, varie considérablement avec le temps et l'emplacement. En règle générale, la vitesse du vent est mesurée à une hauteur de 10 m au-dessus de la surface de la Terre.[16]

Vitesses du vent:

La rose des vents de Laghouat indique combien d'heures par an le vent souffle dans une direction donnée. Exemple SW : Le vent souffle du sud-ouest (SW) vers le nord-est (NE). Le cap Horn est le point de terre le plus méridional d'Amérique du Sud et a des vents d'ouest typiquement forts, ce qui rend la navigation est-ouest difficile, en particulier pour les voiliers.[16]

En raison des données que nous avons obtenues de la météorologie après la durée de la souffrance et procédures complexes.

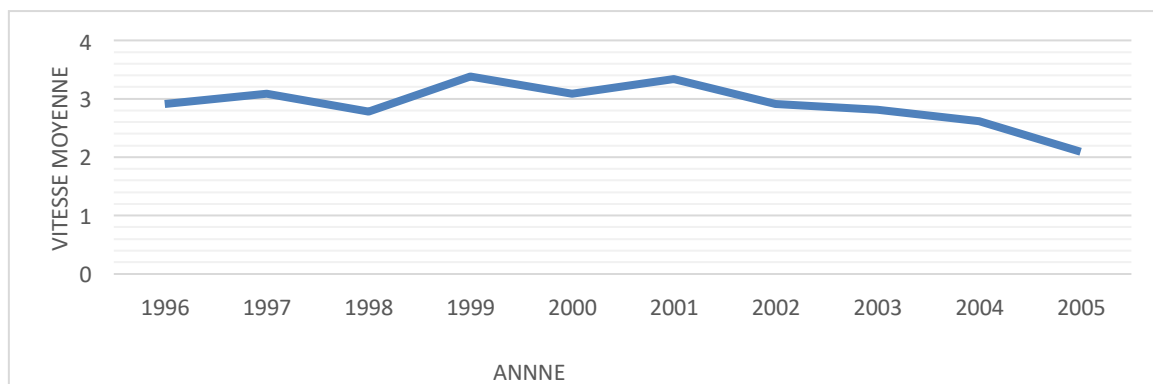


Figure III-2 : la moyenne annuelle de vitesse de vent (1996- 2005) [36]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Discussion :

On observe que la vitesse moyenne annuelle de vent est variés entre 2.1 m/s et 3.4 m/s.

La structure des panneaux solaires peut vibrer à cause du vent.

Carte vent en Algérie:

La vitesse moyenne annuelle du vent pour chaque region est indiquée, et à **partir** de l'analyse de la vitesse du vent, on peut voir que la vitesse moyenne du vent en Algérie varie entre 1,6 m/s et 6,3 m/s. Les vitesses de vent les plus élevées enregistrées étaient : District d'Adrar 6,3 m/s Hassi El Rmel 6,1 m/s.

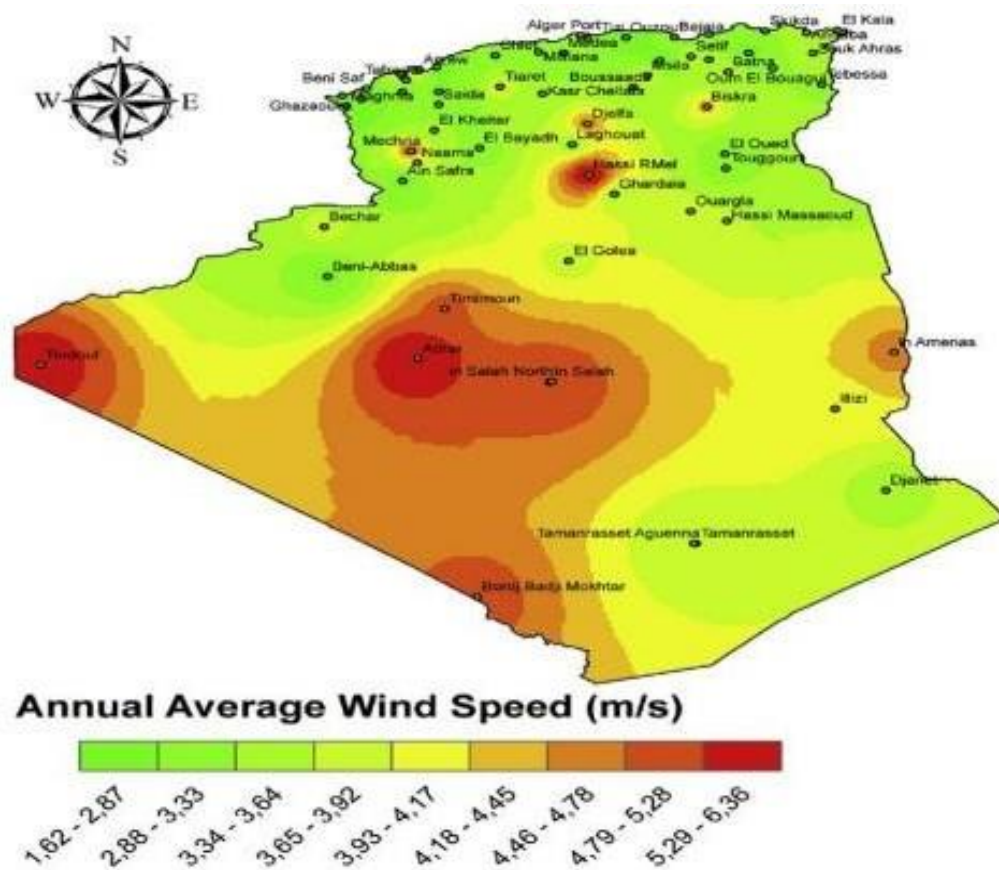


Figure III-3: Moyenne annuelle de la vitesse du vent à 10 m au-dessus du sol en Algérie.[16]

Grain de sable:

Forme du grain de sable:

En termes de forme, les grains de sable prennent des formes **différentes** selon leur apparence, bien que la forme générale soit réduite à un rayon sphérique général R, selon une étude (1977 Walker et Gillette) démontrant les grandes différences entre les différentes formes entre les grains de sable Malgré ceci, le comportement aérodynamique des particules de sable est étudié sur une base sphérique.[16]

Les propriétés des vrais grains de sable sont à peu près les mêmes et sont généralement de forme sphérique.

Dimension du grain de sable:

La dimension du grain de sable [18] varie de moins de 2 mm à plus de 0.1 mm et est divisée en quatre classes et est classée comme suit :

- Gravier ($2\text{mm} < d \leq 76.2\text{ mm}$)
- La sable ($0.05\text{mm} < d \leq 2\text{ mm}$)
- limon ($0.002\text{mm} < d \leq 0.05\text{mm}$)
- Argile ($d < 0.002\text{mm}$)

Comme le montre la figure suivante :

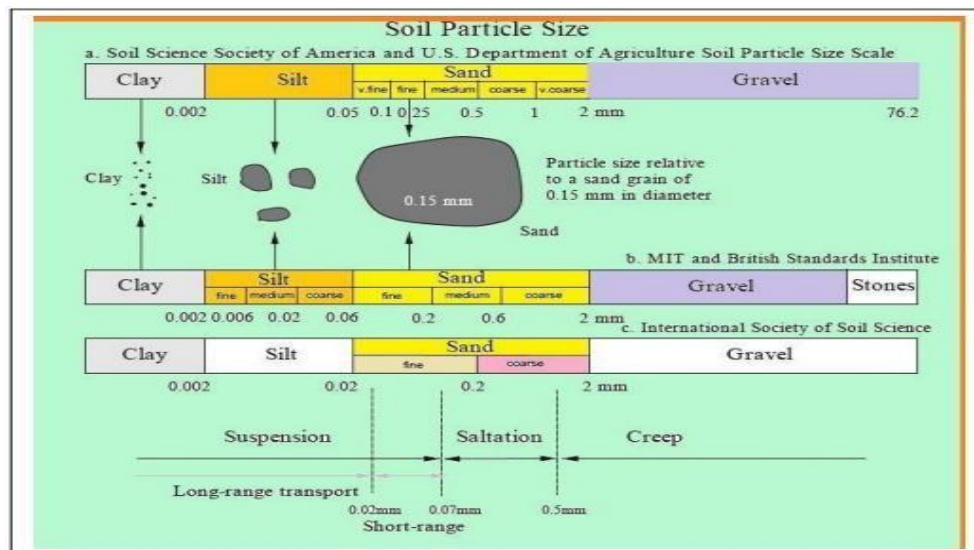


Figure III-4: un diagramme schématisant les types des grains de sable.[16]

Essais influence de vent sable et de la poussière:

Dans la partie suivante, nous examinons plusieurs expériences dans plusieurs régions avec différents types de plaques utilisées, ainsi que les différents objectifs des expériences et des études, mais ils étudient l'effet de la poussière ou de l'accumulation de saleté ou de poussière sur l'efficacité des plaques de plusieurs aspects de la surface et la puissance maximale des plaques.

Essais (1): Effet de l'accumulation de poussières sur les sorties de puissance des modules photovoltaïques solaires.

Dans l'est de l'Arabie saoudite, il existe un grand potentiel pour exploiter l'énergie solaire grâce à l'utilisation de panneaux photovoltaïques (PV). L'accumulation de poussière sur les surfaces des modules solaires photovoltaïques, des miroirs, des réflecteurs et d'autres panneaux solaires est une préoccupation majeure en raison des tempêtes de poussière fréquentes occasionnelles qui se produisent dans la région de la baie. Les performances de ces équipements peuvent être considérablement affectées par l'accumulation de poussières. Résultats d'une étude sur l'effet de l'accumulation de poussières sur la production d'énergie des modules photovoltaïques solaires dans la province orientale de l'Arabie saoudite. Des études ont montré que si les modules photovoltaïques ne sont pas nettoyés pendant plus de six mois, leur performance peut diminuer de 50%. Les capteurs solaires améliorent la distribution d'électricité et aident à réduire de 50 % les effets d'accumulation de poussière en période creuse. [28]

La performance de six modules exposés aux conditions extérieures à Dhahran, en Arabie saoudite, a été testée. Les modules sont orientés vers le sud et s'inclinent à 26 degrés en parallèle à Dahran. Le tableau présente les informations pertinentes des modules photovoltaïques testés.[28]

Tableau III.1 : Informations pertinentes sur les modules solaires photovoltaïques.[28]

Modules	1	2	3	4
Designation	85M ^a	100M ^a	HDS130P	A75P
Type	Mono-cristallin	Mono-cristallin	Poly-cristallin	Poly-cristallin
Puissance (w)	85	85	130	75

^a: deux Panneaux identiques .

La moyenne mensuelle de la puissance max journalière, Pmax, pour la durée de l'essai est indiquée à la figure 6.

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

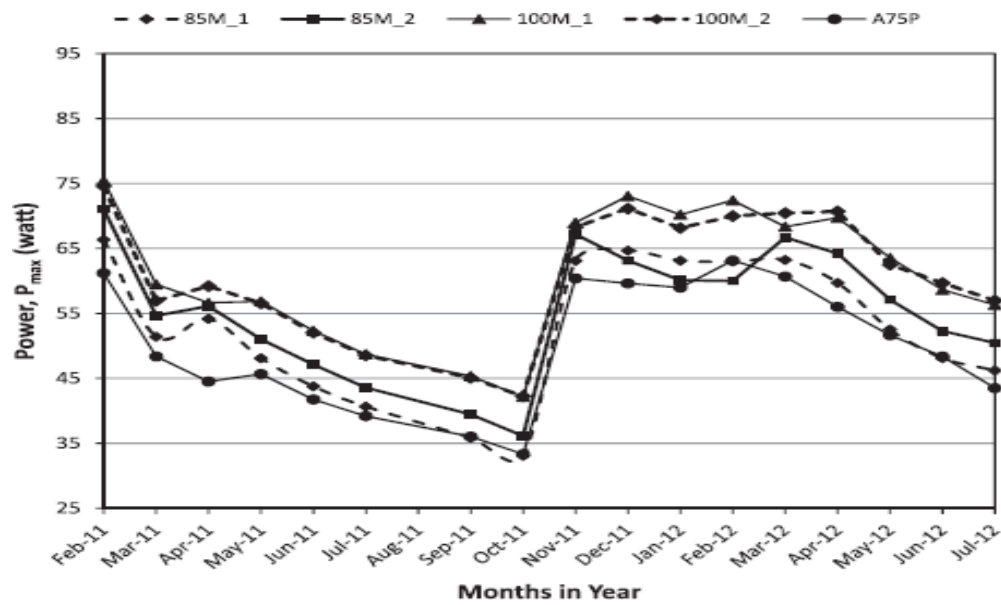


Figure III-5: Puissance maximale moyenne mensuelle[28]

Bien que les précipitations améliorent la performance des panneaux solaires poussiéreux, le nettoyage ne peut être utilisé car il ne s'agit que d'un événement occasionnel à petite échelle dans la région de Dhahran.

En raison de l'humidité, la poussière se collera à la plaque vitrée du module, de sorte qu'un nettoyage minutieux est nécessaire pour rétablir la performance initiale du module.

Aucune dégradation des performances due à l'accumulation de poussière dépend seulement de la durée d'exposition du module, mais aussi de la fréquence et de l'intensité de la poussière. Donc recommandé les modules photovoltaïques installés doivent être nettoyés au moins une fois toutes les deux semaines. Cependant, en cas de tempête de poussière, les modules solaires doivent être nettoyés immédiatement. L'exposition des modules PV aux conditions extérieures réelles de Dhahran pendant de longues périodes a montré que les performances se dégradent progressivement à mesure que la poussière s'accumule, à moins que les modules ne soient nettoyés par la pluie ou l'intervention humaine. Si le module n'est pas nettoyé dans les six mois, les performances peuvent diminuer de plus de 50 %.

Discussion:

Ce que nous concluons de cette expérience est que l'accumulation de poussière à une densité différente affecte puissance maximale des panneaux solaires.

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Il peut ne pas être suffisant pour la Pluie de nettoyer les panneaux solaires en raison de l'adhérence de la poussière à eux, donc le nettoyage périodique devrait empêcher l'accumulation de poussière.

Essais (2): Effets des dépôts de poussière sur les performances des modules photovoltaïques poly-cristallins à partir de mesures expérimentales. (10 Wp, 21.3 V, 0.66 A, 1.5 kg and 440×282×28 m³ PV module).

Examiner l'effet de la poussière sur les performances des modules photovoltaïques (polycristallins). La dégradation des performances photovoltaïques due au dépôt et à l'accumulation de différents types de polluants a été étudiée. Des expériences et des analyses ont été effectuées sur l'effet des polluants atmosphériques, y compris les latérites, les cendres volcaniques, le sable, le carbonate de calcium et la silice, sur l'énergie produite. Les résultats montrent que la réduction de la tension et de la puissance photovoltaïques dépend fortement du type et du niveau de dépôt des polluants. Les résultats montrent que les polluants de cendres sont les particules de poussière les plus efficaces pour la tension du module PV par rapport aux autres polluants de poussière utilisés. La plus grande réduction de la tension PV (25 %) a été enregistrée lorsque des polluants gris ont été utilisés. la performance des systèmes photovoltaïques dans le climat désertique d'Oman.

Dans le cadre de cette recherche, des expériences à l'intérieur seront menées pour étudier l'effet de la poussière sur la performance PV. Les modules photovoltaïques sont testés pour différents éléments de poussière. Puisque l'effet de poussière est considéré comme étant géographiquement lié, il est directement lié à la pollution atmosphérique locale à l'endroit où le système PV est installé. Chaque élément a été étudié séparément. Cinq éléments polluants atmosphériques ont été sélectionnés pour étudier leurs effets sur la performance des modules photovoltaïques au moyen de mesures expérimentales.[37]



Figure III-6: Différents types de polluants utilisés dans l'expérience [37]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Le type de polluant (poussière) influe sur le rendement des modules, a travers l'expérience il a été démontré que chaque type de poussière correspondrait à un rendement bien spécifique en tension comme le montre la Figure.9.

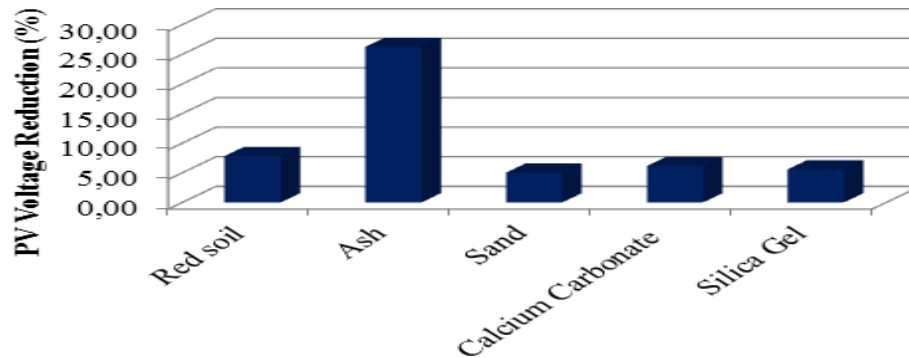


Figure III-7: Réduction du rendement en tension selon le type poussière [37]

Pour étudier l'effet de la poussière sur la production d'électricité, trois expériences à l'extérieur ont été menées pendant 30 jours pour mesurer le courant, la tension, la puissance, l'humidité, la température ambiante et la température des modules :

- (1) panneaux secs et sales,
- (2) panneaux secs et panneaux propres,
- (3) panneaux de refroidissement et de nettoyage. (ventilateurs de refroidissement).

La figure 9 montre les résultats de cette expérience. Les modules photovoltaïques produisent leur rendement le plus élevé lorsqu'ils sont propres et frais. Lorsque le panneau est sec et propre, la puissance de sortie est réduite, et lorsque le panneau est sec et sale, la puissance de sortie est encore plus réduite.

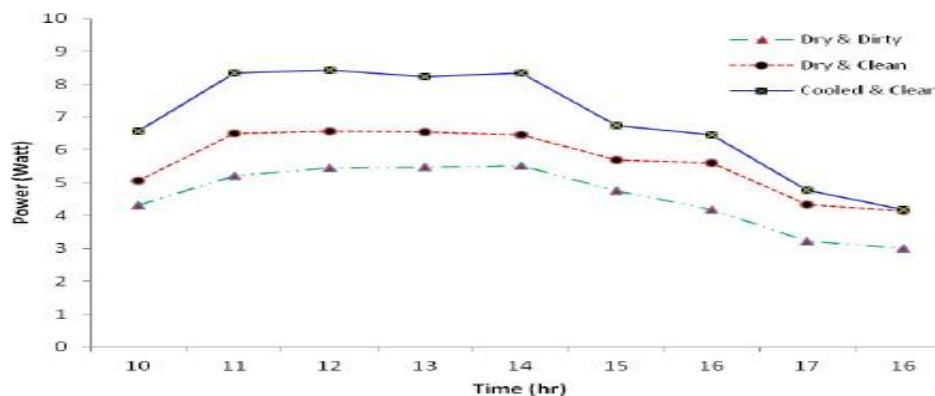


Figure III-8: Effet de la poussière sur la production d'énergie d'un module PV [37]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Discussion :

Le nettoyage et le refroidissement sont des facteurs clés dans l'efficacité des panneaux même si la zone varie. Une diminution de la tension photovoltaïque et de la puissance de sortie est observée lorsque des particules de poussière sont déposées sur l'unité photovoltaïque en fonction de la masse accumulée et du type de pollueur. De plus, une diminution plus importante se produit lorsque la température de l'unité photovoltaïque augmente.

Essais (3): étude l'influence de l'inclinaison et dépôt de poussières sur les performance des modules PV à Kamboinsé (BOURKINA FASO – site de 2iE).

Dans l'étude [41], Etudier les paramètres d'exploitation (l'inclinaison et dépôt de poussière des modules PV en vue de leur amélioration .Après le choix du nettoyage par chiffon et l'inclinaison de module à étudier , les expériences ont été faites pendant le moi de mai . Les études sur le dépôt de poussière ont montré que les modules PV perdant de 2 à 12 pour cent de leur efficacité du fait de l'accumulation de saletés sur leur surface de captation. Cependant le nettoyage apportera donc une économie de 118 FCFA/m² /mois par rapport aux modules non nettoyés . En comparant les productions des modules PV pour différentes inclinaison il ressort qu'au Burkina Faso, situé à latitude 12°,l'angle d'inclinaison optimal des modules est 15°. [41]

Pour ce travail, quatre paires identiques de modules photovoltaïques. Pour le dépôt de poussière, utilisé 2 modules de marque SHARP, contenant chacun 36 cellules rectangulaires en silicium **mono-cristallin** (150 x 65 cm), avec une puissance crête de 123,0 W par module. Pour l'inclinaison, également utilisé 2 modules de marque SUNTECH contenant chacun 36 cellules rectangulaires en **poly-cristallin** (155 x 77 mm) avec une puissance de crête de 50 W par module. [41]

Dépôts de poussière :

Deux modules photovoltaïques identiques sont montés sur un support incliné à 15° et orienté plein sud. Le module A sera nettoyé chaque matin avec un volume d'eau 1,5 litres chaque jour. Le module B ne sera jamais nettoyé durant toute la durée de l'expérience qui durera 1 Mois. Relèves à intervalle de 2 h l'éclairement, la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit. [41]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.



Figure III-9: Schéma d'Expérimentation de dépôt de poussière. [41]

Résultats :

D'une manière générale, on constate que la puissance moyenne du module nettoyé est supérieure à celle du module non nettoyé. C'est parce que le module en cours de nettoyage a reçu tous l'ensoleillement à sa surface et les modules qui ne sont pas nettoyés perdent un peu l'ensoleillement. A noter également que la puissance moyenne des deux modules n'est pas fixe, elle est variable puisque l'ensoleillement n'est pas continu et variera selon le mois et l'heure de la journée. Les expériences, réalisées en mai, étaient caractérisées par le passage de nuages qui rendaient parfois faible le rayonnement entrant.

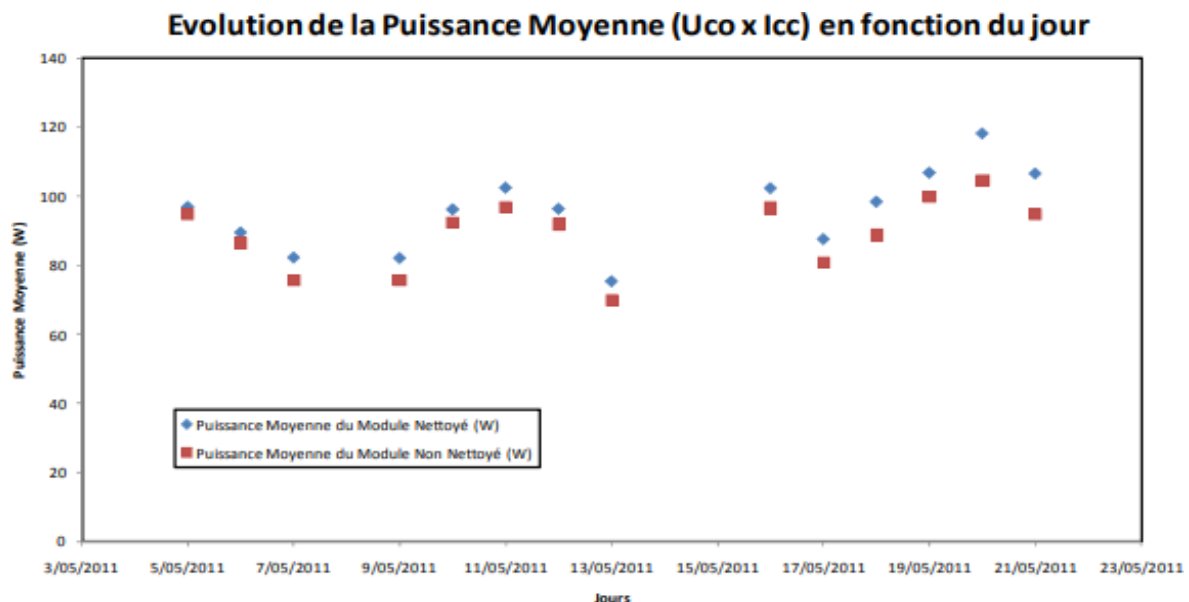


Figure III-10: Evolution de la puissance Moyenne ($U_{co} \times I_{cc}$) en fonction du jour[41].

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

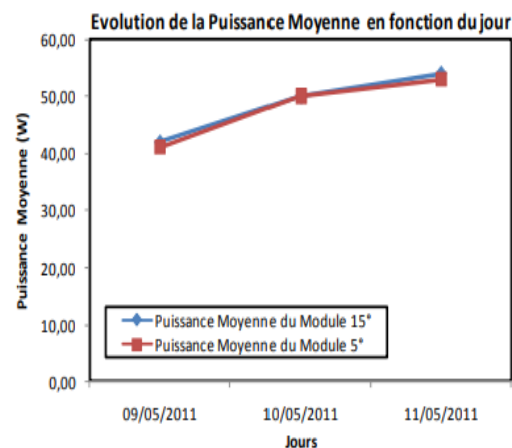
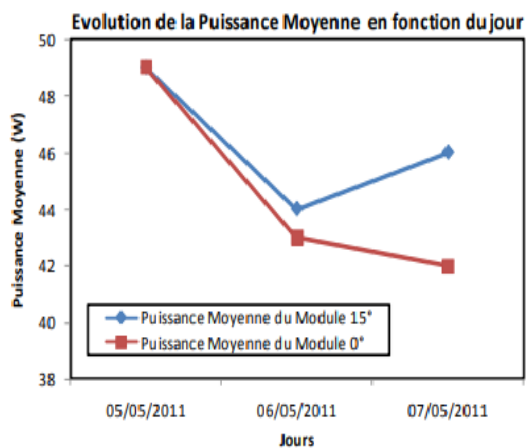
L'inclinaison optimale des modules :

Deux modules PV identiques sont montés sur des racks différents orientés vers le sud. Le module A est incliné de 15° par jour. L'inclinaison du bloc B variable. Le module B sera incliné à 0° , 5° , 10° , 15° , 20° et la meilleure inclinaison théorique déterminée à l'aide de la carte solaire, les 6 inclinaisons à étudier. L'inclinaison des modules sera changée tous les 2 ou 3 jours. De 8h15 à 16h15 tous les jours, enregistrer la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit de chaque module et l'éclairement solaire (W/m^2) sur la vue en plan de chaque module toutes les 2 heures.[41]



Figure III-11: Schéma d'expérimentation de l'inclinaison optimale. [41]

Résultats :



Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

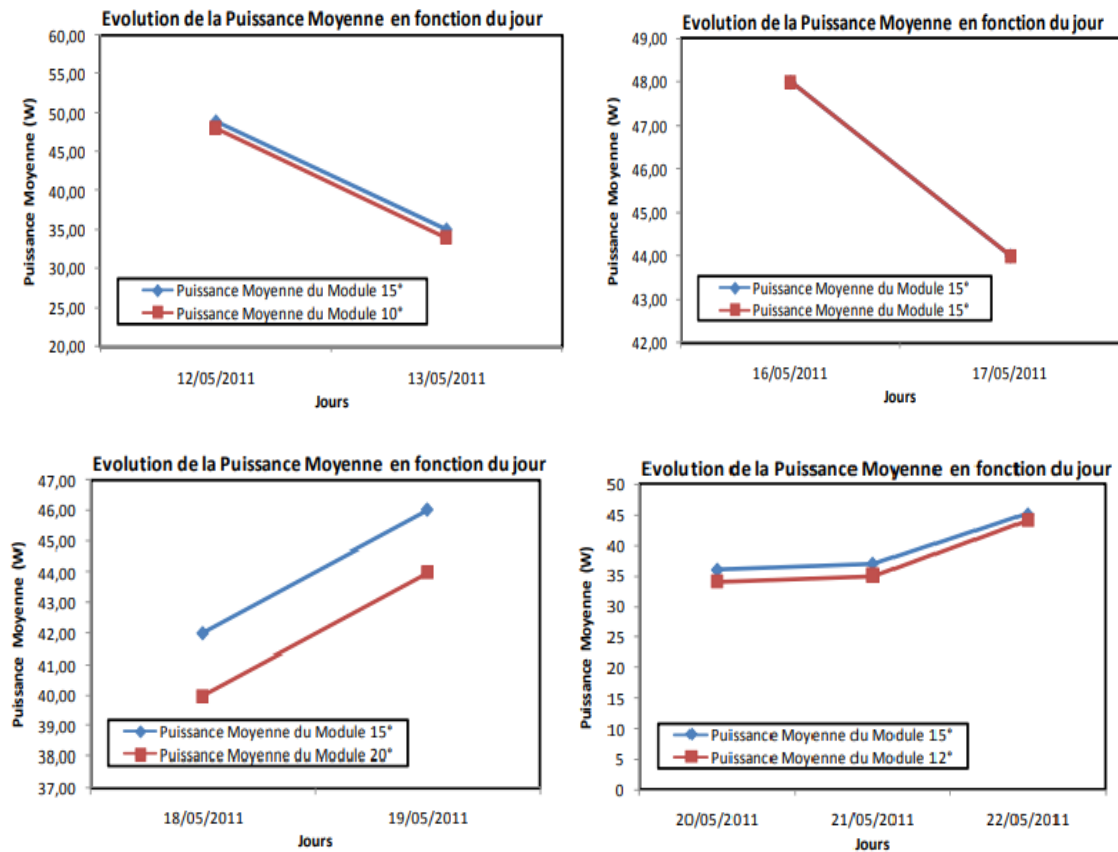


Figure III-12 : étude de l'inclinaison optimale entre 15° et 0°, 5°, 10°, 12°, 15°, 20°[41]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Partie calcul :

-1 Conditions :

Nous considérons ces calculs après des vents chargés de poussière .Utilisation de la loi de dépôt équation (I.3)qui expliquons dans le chapitre 1 et calcul du flux avec les conditions suivantes. Vitesse de vent sable à région laghouat variée entre 8 et 18 m/s² à hauteur 0 à 2m.[40]

- La masse volumique absolue des grain sable on négligons volume entre les particule et considérée que les particules en forme sphérique et le diametre de sable entre 50 et 300 µm.[40]

$$\rho_{ab} = 2600kg/m^3$$

- Accélération de gravité :

$$g = 9.81 m/s^2$$

- La température de région Laghouat entre: 0°C et 50°C.
- La viscosité dynamique d'air à la pression atmosphérique:
-

Tableau III.2: viscosité dynamique d'air.[39]

Temperature °C	μ (kg/m-s) $\times 10^{-5}$
0	1.729
5	1.754
10	1.778
15	1.802
20	1.825
25	1.849
30	1.872
35	1.895
40	1.918
45	1.941
50	1.963

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

On observe que la viscosité dynamique d'air augment tant que la temperature augment.

III-6-2 Les résultats pour chaque diamètre :

Les résultats pour diamètre de $d = 50\mu m$:

Viscosité kg/m-s	Vitesse de stokes m/s	Flux de depot kg/m ² s
0,00031122	0,20488722	2,04887E-06
0,00031572	0,20196693	2,01967E-06
0,00032004	0,19924072	1,99241E-06
0,00032436	0,19658713	1,96587E-06
0,0003285	0,19410959	1,9411E-06
0,00033282	0,19159005	1,9159E-06
0,00033696	0,18923611	1,89236E-06
0,0003411	0,18693931	1,86939E-06
0,00034524	0,1846976	1,84698E-06
0,00034938	0,18250902	1,82509E-06
0,00035334	0,18046358	1,80464E-06

Les résultats pour diamètre de $d = 100\mu m$:

Viscosité kg/m-s	Vitesse de stokes m/s	Flux kg/m ² s
0,00031122	0,81954887	8,19549E-06
0,00031572	0,80786773	8,07868E-06
0,00032004	0,79696288	7,96963E-06
0,00032436	0,7863485	7,86349E-06
0,0003285	0,77643836	7,76438E-06
0,00033282	0,76636019	7,6636E-06
0,00033696	0,75694444	7,56944E-06
0,0003411	0,74775726	7,47757E-06
0,00034524	0,73879041	7,3879E-06
0,00034938	0,73003606	7,30036E-06
0,00035334	0,7218543	7,21854E-06

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Les résultats pour diamètre de $d = 150\mu m$:

Viscosité kg/m-s	Vitesse de stokes m/s	Flux kg/m ² s
0,00031122	1,84398496	1,84398E-05
0,00031572	1,81770239	1,8177E-05
0,00032004	1,79316648	1,79317E-05
0,00032436	1,76928413	1,76928E-05
0,0003285	1,7469863	1,74699E-05
0,00033282	1,72431044	1,72431E-05
0,00033696	1,703125	1,70313E-05
0,0003411	1,68245383	1,68245E-05
0,00034524	1,66227842	1,66228E-05
0,00034938	1,64258114	1,64258E-05
0,00035334	1,62417219	1,62417E-05

Les résultats pour diamètre de $d=200\mu m$:

Viscosité kg/m-s	Vitesse de stokes m/s	Flux kg/m ² s
0,00031122	3,27819549	3,2782E-05
0,00031572	3,23147092	3,23147E-05
0,00032004	3,18785152	3,18785E-05
0,00032436	3,14539401	3,14539E-05
0,0003285	3,10575342	3,10575E-05
0,00033282	3,06544078	3,06544E-05
0,00033696	3,02777778	3,02778E-05
0,0003411	2,99102902	2,99103E-05
0,00034524	2,95516163	2,95516E-05
0,00034938	2,92014426	2,92014E-05
0,00035334	2,88741722	2,88742E-05

Les résultats pour diamètre de $d = 250\mu m$

Viscosité kg/m-s	Vitesse de stokes m/s	Flux kg/m ² s
0,00031122	5,12218045	5,12218E-05
0,00031572	5,04917332	5,04917E-05
0,00032004	4,981018	4,98102E-05
0,00032436	4,91467814	4,91468E-05
0,0003285	4,85273973	4,85274E-05
0,00033282	4,78975122	4,78975E-05
0,00033696	4,73090278	4,7309E-05
0,0003411	4,67348285	4,67348E-05
0,00034524	4,61744004	4,61744E-05
0,00034938	4,5627254	4,56273E-05
0,00035334	4,5115894	4,51159E-05

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Les résultats pour diamètre de $d = 300\mu m$

Viscosité kg/m-s	Vitesse m/s	Flux kg/m ² s
0,00031122	7,37593985	7,37594E-05
0,00031572	7,27080958	7,27081E-05
0,00032004	7,17266592	7,17267E-05
0,00032436	7,07713651	7,07714E-05
0,0003285	6,98794521	6,98795E-05
0,00033282	6,89724175	6,89724E-05
0,00033696	6,8125	0,000068125
0,0003411	6,7298153	6,72982E-05
0,00034524	6,64911366	6,64911E-05
0,00034938	6,57032457	6,57032E-05
0,00035334	6,49668874	6,49669E-05

Variation vitesse de stocks en fonction de diamètre :

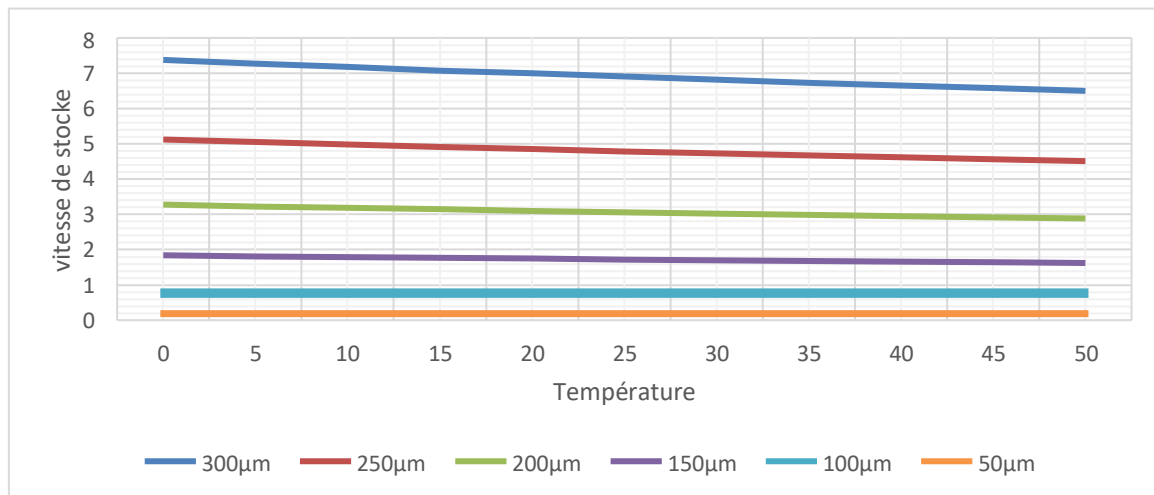


Figure III-13 : variation vitesse des stocks en fonction de température et diamètre

Notez que plus le diamètre est élevé plus la vitesse est élevée, ce qui explique sa descente vers le bas du panneau solaire en raison de sa masse.

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Variation de viscosité dynamique de l'air :

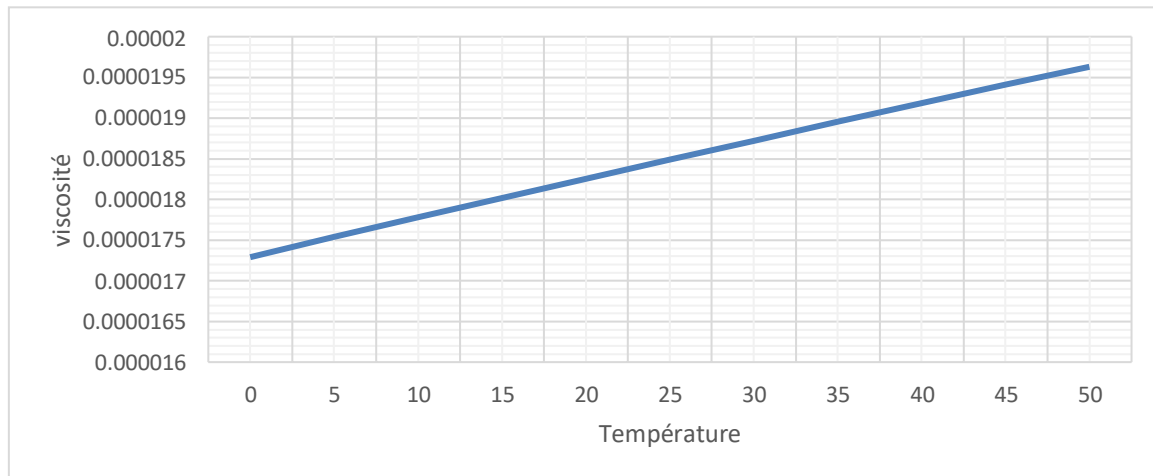


Figure III-14 : variation de viscosité en fonction de température.

L'augmentation de la température est compensée par une augmentation de la viscosité dynamique de l'air et plus la viscosité est grande, plus la vitesse est réduite. Ceci soutient l'interprétation de la viscosité comme l'ensemble des phénomènes de résistance au mouvement d'un fluide pour un écoulement et que le transport de la poussière est lourd lorsque la température est élevée.

Variation de flux en fonction de température :

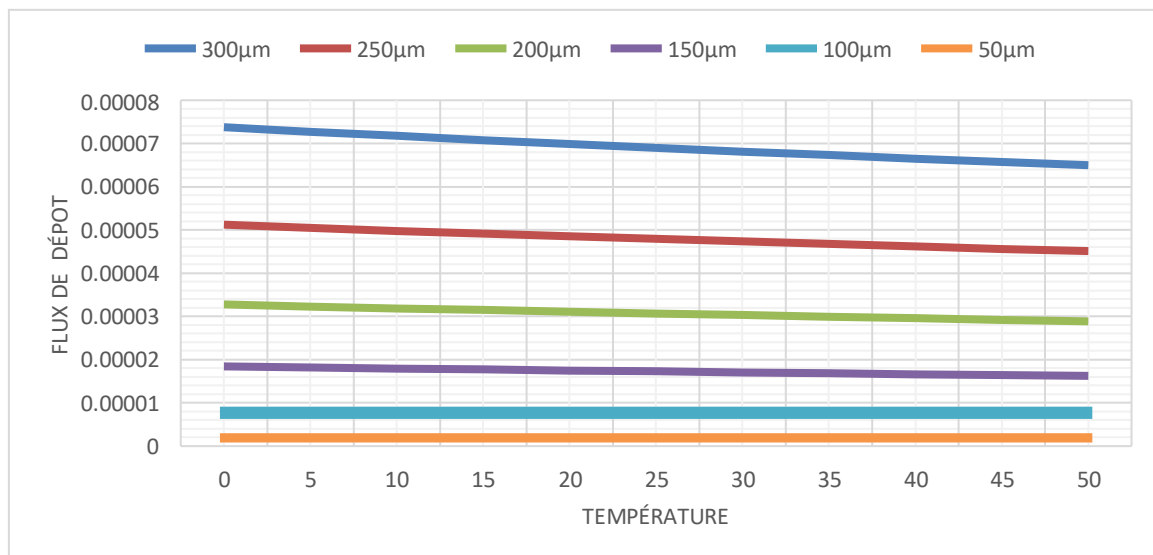


Figure III-15 : variation de flux en fonction de température.

Maintenance de panneau photovoltaïque :

Introduction :

Une couche de poussière de 4 mm (épaisseur) par mètre carré réduit le taux de conversion de l'énergie solaire. Différentes études ont montré que les panneaux solaires perdent entre 5% et 16% de leur efficacité en raison de l'accumulation de saleté et de poussière.[7]

Selon d'autres chercheurs, en raison de la poussière et de la saleté, les panneaux solaires peuvent perdre 40 % de leur efficacité dans les six mois suivant leur installation. La technologie mondiale est axée sur le nettoyage direct et régulier des panneaux solaires, mais cette méthode peut être endommagée si les procédures et les produits utilisés ne sont pas respectés, par contre, la méthode proposée protège le panneau et augmente le rendement.[7]

L'inspection visuelle (annuelle) :

Dans la plupart des cas, une visite annuelle avec les actions suivantes suffit comme contrôle de routine. Il est important de détecter :

- Modules endommagés ou souillés.
- la présence de feuilles mortes ou autres déchets.
- L'état de connexion du module à la structure.

Nettoyage de Panneaux Photovoltaïque :

Le nettoyage des modules dépend largement de l'environnement et de l'inclinaison du système :

- On peut dire que les terrains dont la pente est supérieure à 15° peuvent être nettoyés par la pluie s'ils sont situés dans un environnement peu poussiéreux. Dans ce cas, le nettoyage n'a pas besoin d'être programmé, il ne peut être effectué que lorsque des surfaces sales sont observées.
- Pour les surfaces moins en pente, des intervalles de nettoyage de 2 à 4 ans peuvent être programmés pour les milieux moins pollués.
- Situations plus spécifiques nécessitant un nettoyage régulier, comme la présence d'un grand nombre d'oiseaux, la proximité d'un réseau ferroviaire dense, les industries émettant des substances volatiles (peinture, boulangeries industrielles, etc.) ou les exploitations agricoles.[7] Dans les zones **dites laghouat** un nettoyage périodique doit être organisé au moins tous les mois

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Les processus de nettoyage :

En bref, différentes méthodes de nettoyage d'une forme à l'autre, en fonction des places disponibles pour les utilisateurs de panneaux solaires :

a. Nettoyage manuel des panneaux solaires:

Cette opération est commandée pour nettoyer les panneaux solaires à l'aide d'une vadrouille avec une structure de support appropriée, en ajoutant de l'eau et des outils de nettoyage spéciaux qui assureront la sécurité du panneau. mais la difficulté de ce processus réside dans l'approvisionnement en eau, en particulier pour les zones désertiques, et il est coûteux et demande grand effort.



Figure III-16 : Image montrant le nettoyage manuel [42]

b. Nettoyage par aspiration :

Ce processus utilise un aspirateur spécial dispositif, de sorte que le moteur de l'appareil est équipé d'un courant électrique et cette machine tire la poussière accumulée sur les panneaux et beaucoup de plancton de sorte qu'il dépend du type de saleté, de sorte que la poussière peut facilement être enlevée coincé parce qu'il ne peut pas enlever les espèces plus lourdes attachées à la planche (litière d'oiseaux), et il doit être manipulé manuellement comme le montre la figure :



Figure III-17 : Image montrant le nettoyage par aspiration [42]

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

c. Nettoyage naturel et pluie:

La pluie forte nettoie les panneaux solaires des impuretés et du sol accumulés sur les surfaces des cellules tandis que la pluie légère peut aider la poussière à coller davantage, réduisant la productivité des cellules solaires, les forts mouvements du vent permettent l'élimination de nombreux planctons accumulés sur les surfaces des cellules, comme la poussière, qui aide à les nettoyer. Les vents faibles peuvent accroître les dépôts de poussière, ce qui entraîne une réduction de l'énergie produite.[42]

d. Nettoyage avec Robot:

Son concept réside dans le nettoyage automatique sans le besoin de l'homme et il varie selon sa taille et la technique. Par exemple, plusieurs diplômés universitaires ont créé un robot, y compris l'étudiant palestinien musulman Abdul Latif "de l'Université de" Birzeit "à "Ramallah", qui a étudié mécatronique.



Figure III-18 : Image montrant le nettoyage automatique[43]

Discussion :

La région de Laghouat est connue dans les mois de mars à juin, septembre et octobre avec des tempêtes de sable, et la vitesse du vent peut atteindre 18 mètres/seconde à une hauteur de 2 mètres.

C'est la hauteur du panneau solaire, et nous avons calculé la vitesse des petites particules, et nous avons constaté que leur vitesse est presque inexistante, et nous avons conclu que les grosses particules ont une grande vitesse, qui peut tomber à cause de la gravité ou voler avec le vent, et tout cela est selon l'interprétation de Vander Walz et de sa loi.

Par conséquent, le nettoyage périodique des panneaux solaires doit être programmé au moins une fois par mois, et dans les mois connus pour l'abondance de poussière, au moins une fois toutes les deux semaines.

Chapitre III : Etude de l'influence de poussière et application de la loi du dépôt des particules.

Quelques conseils supplémentaires :

- Le nettoyage se fait de préférence quand le soleil ne brille pas directement sur vos panneaux.
- Ne marchez jamais sur des modules PV en les nettoyant.
- N'aspergez jamais vos modules PV d'eau froide quand leur température est très élevée, le choc thermique pourrait les casser.
- Arrosez toujours à pression basse et utilisez une éponge ou une brosse douce pour nettoyer la surface de vos panneaux des dépôts de pollution urbaine et autres salissures. N'utilisez pas d'objets métalliques tranchants ni des méthodes abrasives pour nettoyer vos panneaux solaires, afin d'éviter de griffer ou d'abîmer les surfaces vitrées.
- Mettez à profit toutes les séances de nettoyage pour vérifier l'état du châssis ou de la laque de vos panneaux solaires sur d'éventuels défauts. Bien qu'on préconise une durée de vie de 20 ans ou plus pour toutes les modules PV, les châssis ont généralement tendance à se dégrader plus vite. Vérifiez la fixation de tous les raccords.
- Un nettoyage immédiat doit être fait après chaque vent chargé de poussière.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous en sommes venus à la loi de dépôt des particules qui dit que l'accumulation de poussière peut s'expliquer par la vitesse des grains de sable. Plus la taille des grains est petite, plus la vitesse est presque nulle, et vice versa.

Nous avons passé en revue des études antérieures dans plusieurs régions différentes, et ce que nous concluons de ces études est que l'effet de l'accumulation de poussière affecte la puissance, la tension, le courant du panneau solaire, et cet effet varie d'une région à l'autre et selon le type de poussière.

Certains types de poussières peuvent entraîner une diminution de la puissance des panneaux solaires jusqu'à 25 % ou 50 % dans un délai n'excédant pas un an.

Chaque zone a une orientation angulaire idéale, s'en éloigner entraîne une diminution de la puissance des panneaux.

Conclusion générale :

À la fin de ce travail, et après avoir examiné de nombreuses études, nous avons conclu que les panneaux solaires pouvaient se dégrader en raison du facteur climatique tel que la température, l'humidité et le vent et pluie.

Et en comparant les études sur l'effet de l'accumulation de grains de poussière sur les panneaux solaires dans différentes régions, nous avons conclu que l'accumulation de grains de poussière affecte les performances des panneaux solaires à un taux décroissant allant de 4 à 50 %, et ce après un période de temps spécifique s'est écoulée, et cette période varie selon les études.

Après avoir appliqué la loi de dépôt des particules avec les données de notre région, nous avons obtenu plusieurs courbes, après les avoir discutées et analysées, il a été conclu :

- L'accumulation de petites particules de poussière d'un diamètre de 50 micromètres est supérieure à l'accumulation de particules de grand diamètre.
- Une augmentation de la température entraîne une augmentation de la viscosité dynamique de l'air, et donc une diminution de l'accumulation de particules de poussière sur les panneaux solaires.

Il n'y a aucun moyen de protéger les panneaux solaires de l'accumulation de poussière avant qu'elle ne s'accumule, mais la meilleure façon de protéger les panneaux solaires est de les nettoyer périodiquement. Les méthodes de nettoyage varient, mais certaines sont très coûteuses, comme le nettoyage manuel ou par robot, L'un des moyens les meilleurs et les moins coûteux de nettoyer les panneaux photovoltaïques consiste à utiliser un essuie-glace autonettoyant et auto-aspiration, et c'est une proposition à l'étude.

Références bibliographiques :

- [1] ANNE LABOURET , JEAN-PAUL BRAUN , PASCAL CUMUNEL, BENJAMIN FARAGGI ; « Cellules Solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque », 5eme édition ,ETSF. Pages 31-36
- [2] B. ROBYNS, P. BASTARD, « Production décentralisée d'électricité : contexte et enjeux techniques», La revue 3EI n°39, Décembre 2004.
- [3] BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010.
- [4] ZIDANE AMMAR, «Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au niveau d'un puits de gaz», mémoire de Master en Electrotechnique., Université d'Abderrahmane Mira, Bejaia, 2012.
- [5] B. FLESHE, D. DELANGES, «énergie solaire photovoltaïque», STI ELT juin 2007.
- [6] <https://www.monkitsolaire.fr/blog/comment-l-energie-solaire-se-transforme-t-elle-en-electricite--n4> (vue le 15/03/2023 à 14:55)
- [7] OUNIS Tarek Diab , « protection des panneaux solaire» mémoire de Master en Physique , UNIVERSITE DE OUM EL BOUAGHI,04/06/2014.
- [8] Anne Labouret, Michel Villos,«installations photovoltaïques», 5eme édition ,DUNOD.
- [9] <https://www.encyclopédie-energie.org/les-fours-de-cristallisation-du-silicium-photovoltaïque> (vue le 15/03/2023 à 16:16)
- [10] <https://batiment-photovoltaïque-agricole.com/2020/06/25/fabrication-des-panneaux-solaires-le-silicium-rayonne-toujours> (vue le 15/03/2023 à 16:19)
- [11] <https://lenergie-solaire.net> (vue le 15/03/2023 à 17 :14)
- [12] <https://solaire-france.com/quelle-differences-entre-des-panneaux-solaires-monocristallins-et-polycristallins> (vue le 15/03/2023 à 18:01)
- [13] <https://www.freepng.fr/png-abahd9> (vue le 16/03/2023 à 16:18)
- [14] Ababacar NDIAYE, «Etude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques Impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performances», Thèse de Doctorat en Energies Renouvelables et Systèmes Electriques, Université Cheikh Diop de Dakar 2013.
- [15] <https://itex.pagesperso-orange.fr/photovoltaïque.html> (vue le 18/03/2023 à 14:47)
- [16] TOUIL Hamza, BENOUMHANI Alaeddine , ,« Contribution à la protection des panneaux solaires contre le vent de sable», mémoire de Master en Energétique ,2022.
- [17] KECHAR EL-KHANSSA, « Influence des rayonnements parasites sur le rendement des panneaux solaires», THÈSE Doctorat en Réseaux électrique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2020.
- [18] Maghami MR, Hizam H, Gomes C, Radzi MA, Rezadad MI, Hajighorbani S. « Power loss due to soiling on solar panel: a review ». Renew Sustain Energy Rev 2016;59:1307–16.
- [19] <https://www.notre-planete.info/actualites/2703-panneaux-solaires-ombre-arbres> (vue le 25/03/2023 à 02:11)
- [20] Hanai T Al, Hashim RB, Chaar L El, Lamont LA . « Environmental effects on a grid connected 900 W photovoltaic thin- fi lm amorphous silicon system » .Renew Energy 2011;36:2615–22.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2010.06.010>.

- [21] Eylul Simsek, Megan J. Williams, Laurent Pilon. « Effect of dew and rain on photovoltaic solar cell performances ». Solar Energy Materials and Solar Cells 222 (2021) 110908. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2020.110908>.
- [22] K.K. Ilse, B.W. Figgis, V. Naumann, C. Hagendorf, J. Bagdahn, « Fundamentals of soiling processes on photovoltaic modules », Renew. Sustain. Energy Rev. 98 (2018) 239–254.
- [23] M. Adouane M. Haddadi †, N. Benamrane , K. Touafek , A. Khelifa et I. Tabet , « Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride », Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaia (2014) 87 – 92.
- [24] Bouaouadja N, Bouzid S, Hamidouche M, Bousbaa C, Madjoubi M. « Effects of sandblasting on the efficiencies of solar panels ». J Appl Energy 2000;65:99e105.
- [25] Mustapha Dida, Slimane Boughali, Djamel Bechki, Hamza Bouguettaia. « Output power loss of crystalline silicon photovoltaic modules due to dust accumulation in Saharan environment ». Renewable and Sustainable Energy Reviews 124 (2020) 109787. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109787>.
- [26] Meral ME, Dinçer F. A « Review of the factors affecting operation and efficiency of Photovoltaic based electricity generation systems ». Renew Sustain Energy Rev 2011;15(5):2176–84.
- [27] Abderrezek M, Fathi M. « Experimental study of the dust effect on photovoltaic panels' energy yield. Sol Energy » 2017;142:308–20. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.12.040>.
- [28] Adinoyi MJ, Said SAM. « Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. Renew Energy » 2013;60:633–6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>. Technical note.
- [29] Mehmood U, Al-ahmed A, Al-sulaiman FA, Malik MI, Shehzad F, Ul A, et al. « Effect of temperature on the photovoltaic performance and stability of solid- state dyesensitized solar cells » : a review. Renew Sustain Energy Rev 2017;79:946–59. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.114>.
- [30] Tanesab J, Parlevliet D, Whale J, Urmee T, Pryor T. « The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone. Sol Energy» 2015;120:147–57. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2015.06.052>.
- [31] Javed W, Wubulikasimu Y, Figgis B, Guo B. « Characterization of dust accumulated on photovoltaic panels in Doha. Qatar. Sol Energy» 2017;142:123–35. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.053>.
- [32] Adinoyi MJ, Said SAM. Effect of dust accumulation on the power outputs of solar photovoltaic modules. Renew Energy 2013;60:633–6. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2013.06.014>. Technical note.
- [33] M. Humood, A. Beheshti, J. L. Meyer and A. A. Polycarpou, « Normal impact of sand particles with solar panel glass surfaces », Tribology International, vol. 102, p. 237–248, 2016.
- [34] D. C. Jordan and S. R. Kurtz, « Photovoltaic degradation rates— an analytical review », Progress in photovoltaics: Research and Applications, vol. 21, p. 12–29, 2013.
- [35] Boukais Sara, « Synthèse bibliographique des caractéristiques des sols sous pistachier de l'Atlas dans la wilaya de Laghouat »,Mémoire de master en biologie (Biodiversité et écologie végétale) , UNIVERSITE DE TIZI OUZOU ,2021
- [36] Station météorologique de Laghouat, DONNEES CLIMATOLOGIQUES 1996-2005 DE LA REGION DE LAGHOUAT AU PROFIT DE L'ETUDIANT : Halloub Makhoulf et Amani Mustapha .
- [37] Hussein A Kazem, Tamer Khatib, K. Sopian, Frank Buttinger, Wilfried Elmenreich, Ahmed Said Albusaidi. « Effect of Dust Deposition on the Performance of Multi-Crystalline Photovoltaic Modules Based on Experimental Measurements ». INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH Hussein A Kazem et al., Vol.3, No.4, 2013.

[38] Christian Schill, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany. Anne Anderson, Research Institutes of Sweden AB (RISE), Sweden. Christopher Baldus-Jeursen, CANMET Energy Technology Centre, Canada. Laurie Burnham, Sandia National Laboratories, USA. Leonardo Micheli, Universidad de Jaén, Spain. David Parlevliet, Murdoch University, Perth, Australia. Eric Pilat, CEA INES, France. Bengt Stridh, Mälardalens högskola, Sweden. Elías Urrejola, Atamostec, Chile. « Soiling Losses – Impact on the Performance of Photovoltaic Power Plants ». Ulrike Jahn, VDE Renewables, Alzenau, Germany. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS PROGRAMME. (2022).

[39] https://www.engineersedge.com/physics/viscosity_of_air_dynamic_and_kinematic_14483.htm. (vue le 06/06/2023).

[40] Aissa Hadjaissa, Tareq Samir Zaki Salameh, Ahmed Medjelled, Belkacem Bouali. « CONCENTRATION AND TURBULENT DIFFUSIVITY OF SAND PARTICLES IN THE ATMOSPHERE BASED ON MIXTURE MODEL THEORY ». Volume 50, Issue 3, 2023, pp. 17-31. International Journal of Fluid Mechanics Research.

[41] DIALLO Amadou Sadio. « Etude de l’Influence de l’inclinaison et des dépôts de poussière sur les performances des modules PV à Kamboinsé (site du 2iE) ». Mémoire pour l’obtention du master d’ingénierie en Eau et Environnement-Ingénieur 2iE option : ENERGIE ET PROCEDES INDUSTRIELS. Institut International de l’eau et Environnement 2iE. Juin 2010

[42] Tati meriem, Basmala Asma. « L'effet de la poussière sur les panneaux solaires photovoltaïques ». Mémoire de Master en physique énergétique option énergie renouvelable. Université de Ouergla.2019. (Mémoire langue arabe).

[43] Boukhalifa Amina. « Une étude expérimentale de l'effet de la poussière sur les propriétés électriques des panneaux solaires Photovoltaïque à Ouargla ». ». Mémoire de Master en physique énergétique option énergie renouvelable. Université de Ouergla.2018. (Mémoire langue arabe).

[44] <https://solarabic.com/learn/2019/05/solar-panels-tilting/> (vue le 24/06/2023)

[45] <https://www.gps-longitude-latitude.net/coordonnees-gps-de-laghouat> (vue le 24/06/2023)

[46] <https://abbassa.wordpress.com/long-lat-laghouat> (vue le 24/06/2023)

ملخص: يؤثر تراكم الغبار على قدرة الألواح الشمسية عن طريق خدشها و ترك شقوق في سطحها الخارجي المكون عادة من الزجاج و حجب وصول اشعة الشمس ،تختلف نسبة نقصان قدرة الألواح باختلاف منطقة تواجدها وتوجيهها وباختلاف نوع حبيبات الغبار، في بعض المناطق تصل نسبة نقصان القدرة الاعظمية للألواح حتى النصف في دراسة جرت في منطقة الظهران بالسعودية و بنسبة ١٢ بالمائة من القدرة المتوسطة في دراسة جرت في بوركينافاسو للوح شمسي من نوع متعدد البلورات في شهر ماي حيث تم ترك اللوح بدون تنظيف طيلة الشهر وفي دراسة اخرى في منطقة عمان تمت دراسة تأثير انواع مختلفة من الغبار حيث ان النوع " ASH " الاكثر تأثيرا حيث تم قياس قيمة نقصان توتر اللوح من نوع متعدد البلورات قدرت ب 25 بالمائة ، وهنا تم تطبيق قانون تراكم حبيبات الغبار التي تفسر تراكم الغبار وعلاقته بحجم حبيبات الغبار وقياس تدفق الغبار وجد ان حبيبات ذات القطر الأصغر 50 ميكروميتر هي من يكون تراكمها اكبر حيث تكون سرعتها شبه منعدمة حيث تم الاخذ بعين الاعتبار شروط المنطقة المدروسة حيث في حجم 1متر مكعب من الهواء يكون تركيز الغبار 10⁻⁵ وتكون سرعة الرياح 15 متر/ ثا على ارتفاع 2 متر كما تم أخذ اقطار مختلفة من 50 حتى 300 ميكرو متر وفرض شكلها الكروي. كما ان زيادة درجة الحرارة له تأثير على تراكم الغبار فزيادة درجة الحرارة يزيد تراكم الحبيبات. وبعد ما تم التوصل اليه من خلال نتائج الدراسات تم اقتراح افضل الحلول واقلها تكلفة.

Résumé : L'accumulation de poussière affecte la puissance des panneaux solaires en les rayant et en laissant des fissures dans leur surface extérieure, qui est généralement en verre et bloque l'accès à la lumière du soleil. Pour les panneaux jusqu'à la moitié dans une étude menée à Dhahran, en Arabie Saoudite, à un taux de 12 pour cent de la puissance moyenne Dans une étude menée au Burkina Faso pour un panneau solaire de type polycristallin en mai, où le panneau a été laissé sans nettoyage tout au long du mois Dans une autre étude dans la région d'Oman, l'effet de différents types a été étudié. De la poussière, car le type "ASH" est le plus influent, car la valeur de la diminution de la tension de la plaque polycristalline a été mesurée, estimée à 25%, et ici la loi de dépôt des particules a été appliquée, ce qui explique l'accumulation de poussière et sa relation avec la taille des grains de poussière. La mesure du débit de poussière a révélé que les granules de plus petit diamètre étaient de 50 micromètres. C'est celui dont l'accumulation est la plus importante, car sa vitesse est presque non-existante, car les conditions de la zone étudiée ont été prises en compte, où dans le volume de 1 mètre cube d'air, la concentration de poussière est de 10⁻⁵ et la vitesse du vent est de 15 m/s à une hauteur de 2 mètres, et différents diamètres ont été pris de 50 à 300 µm et de forme sphérique imposante. L'augmentation de la température a également un effet sur l'accumulation de poussière, car l'augmentation de la température augmente l'accumulation de granules. Après ce qui a été atteint grâce aux résultats des études, les solutions les meilleures et les moins coûteuses ont été proposées.

Abstract : Dust accumulation affects the power of solar panels by scratching them and leaving cracks in their outer surface, which is usually glass and blocks access to sunlight. For panels up to half in a study conducted in Dhahran, Saudi Arabia, at a rate of 12 percent of average power In a study conducted in Burkina Faso for a polycrystalline type solar panel in May, where the panel was left uncleaned throughout the month In another study in the region of Oman, the effect of different types was studied. Dust, because the "ASH" type is the most influential, because the value of the polycrystalline plate voltage decrease was measured, estimated at 25%, and here the particle deposition law was applied, which explains the accumulation of dust and its relation to dust grain size. The measurement of the dust flow revealed that the smallest diameter granules were 50 micrometers. This is the one with the greatest accumulation, since its velocity is almost non-existent, since the conditions of the studied area were taken into account. account, where in the volume of 1 cubic meter of air, the dust concentration is 10⁻⁵ and the wind speed is 15 m/s at a height of 2 meters, and different diameters were taken from 50 to 300 µm and imposing spherical shape. The increase in temperature also has an effect on the accumulation of dust, because the increase in temperature increases the accumulation of granules. After what was achieved thanks to the results of the studies, the best and least expensive solutions were proposed.